

# Directrices para la estimación de las emisiones de carbono negro de América del Norte: Métodos recomendados



Noviembre 2015

Citar como:

CCA (2015), *Directrices para la estimación de las emisiones de carbono negro de América del Norte: métodos recomendados*, Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal, 105 pp.

El presente informe fue elaborado por el Eastern Research Group, Inc., para el Secretariado de la Comisión para la Cooperación Ambiental. La información que contiene es responsabilidad de los autores y no necesariamente refleja los puntos de vista de la CCA o de los gobiernos de Canadá, Estados Unidos o México.

Se permite la reproducción de este material sin previa autorización, siempre y cuando se haga con absoluta precisión, su uso no tenga fines comerciales y se cite debidamente la fuente, con el correspondiente crédito a la Comisión para la Cooperación Ambiental. La CCA apreciará que se le envíe una copia de toda publicación o material que utilice este trabajo como fuente.

A menos que se indique lo contrario, el presente documento está protegido mediante licencia de tipo "Reconocimiento – No comercial – Sin obra derivada", de Creative Commons.



© Comisión para la Cooperación Ambiental, 2015.

ISBN: 978-2-89700-102-5 (versión electrónica)

*Available in English* – ISBN: 978-2-89700-101-8 (*electronic version*)

*Disponible en français* – ISBN: 978-2-89700-103-2 (*version électronique*)

Depósito legal: Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2015

Depósito legal: Library and Archives Canada, 2015

#### **Detalles de la publicación**

*Categoría del documento:* publicación de proyecto

*Fecha de publicación:* octubre de 2015

*Idioma original:* inglés

*Procedimientos de revisión y aseguramiento de la calidad:*

*Revisión final de las Partes:* junio de 2015

QA251

Proyecto: Plan Operativo 2013-2014: *Directrices para la estimación de las emisiones de carbono negro de América del Norte*

Si desea más información sobre ésta y otras publicaciones de la CCA, diríjase a:

#### **Comisión para la Cooperación Ambiental**

393 rue St-Jacques Ouest, bureau 200

Montréal (Québec), Canada, H2Y 1N9

Tel.: 514.350.4300 - fax: 514.350.4314

info@cec.org / www.cec.org



## Índice

<b>Acrónimos, siglas y abreviaturas .....</b>	<b>vi</b>
<b>Sinopsis.....</b>	<b>viii</b>
<b>Resumen ejecutivo.....</b>	<b>viii</b>
<b>1 Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Objetivos de las directrices.....	2
1.3 Síntesis de la revisión, evaluación y consulta con expertos (tareas 1 y 2) .....	2
1.3.1 Revisión documental y recomendaciones iniciales (tarea 1).....	2
1.3.2 Resumen de los principales documentos analizados .....	6
1.3.3 Evaluación y recomendaciones iniciales .....	10
1.3.4 Consultas entre expertos (tarea 2).....	11
<b>2 Uso de las directrices para la estimación de emisiones de carbono negro .....</b>	<b>15</b>
2.1 Esquema por niveles.....	16
2.2 Comprensión de las limitaciones en la estimación de emisiones de carbono negro .....	17
2.2.1 Definición de carbono negro .....	17
2.2.2 Incertidumbre en la especiación.....	19
2.3 Casos de uso para inventarios .....	20
2.3.1 Necesidad de resolución espacial y temporal.....	21
2.3.2 Registros nacionales .....	21
2.3.3 Inventarios regionales.....	22
2.3.4 Antecedentes de análisis de impacto.....	22
2.3.5 Análisis de proyección y mitigación .....	22
2.3.6 Aplicación de niveles a los casos de uso de inventarios.....	23
<b>3 Métodos para estimar las emisiones de carbono de sectores específicos.....</b>	<b>24</b>
3.1 Quema de biomasa .....	24
3.1.1 Quema a cielo abierto.....	25
3.1.2 Quema agrícola.....	28
3.2 Sectores energético e industrial.....	30
3.2.1 Fuentes industriales y de generación energética generales .....	30
3.2.2 Hornos ladrilleros en México .....	33
3.3 Fuentes móviles.....	35
3.3.1 Fuentes carreteras .....	36
3.3.2 Fuentes móviles que no circulan por carretera .....	40
3.3.3 Locomotoras .....	44
3.3.4 Embarcaciones.....	46

3.3.5	Aviación .....	49
3.4	Combustión doméstica .....	52
3.5	Otras fuentes.....	55
3.5.1	Cocina al carbón (cocina comercial) .....	55
3.5.2	Cremación de restos humanos .....	57
3.5.3	Incendios de edificios y vehículos.....	58
3.5.4	Quema de desechos sólidos urbanos a cielo abierto .....	60
<b>4</b>	<b>Recomendaciones para investigaciones ulteriores .....</b>	<b>64</b>
<b>5</b>	<b>Referencias.....</b>	<b>66</b>
	<b>Apéndice A: Manejo de información sobre emisiones .....</b>	<b>74</b>
	<b>Apéndice B: Validación e incertidumbre .....</b>	<b>77</b>
	Identificación y cuantificación de fuentes de incertidumbre .....	77
	Métodos de validación .....	82
	Factores de emisión y de especiación recomendados para el cálculo de emisiones de carbono negro con métodos de nivel 1 .....	85

## Lista de cuadros

Cuadro 1.3-1. Principales estudios examinados: fuentes completas .....	5
Cuadro 1.3-2. Expertos en métodos para estimar las emisiones de carbono negro.....	13
Cuadro 2.3-1. Niveles aplicables para los casos generales de uso .....	23
Cuadro 3.1-1. Posibles fuentes de datos de actividad, así como de factores de emisión y de especiación para quema a cielo abierto .....	26
Cuadro 3.1-2. Posibles fuentes de datos de actividad, así como de factores de emisión y de especiación para quema agrícola .....	29
Cuadro 3.2-1. Posibles fuentes de datos de actividad, así como de factores de emisión y de especiación para los sectores energético e industrial.....	32
Cuadro 3.2-2. Posibles fuentes de datos de actividad, así como de factores de emisión y de especiación para hornos ladrilleros en México.....	35
Cuadro 3.3-1. Posibles fuentes de datos de actividad, así como de factores de emisión y de especiación para fuentes carreteras.....	39
Cuadro 3.3-2. Posibles fuentes de datos de actividad, así como de factores de emisión y de especiación para fuentes móviles que no circulan por carretera.....	43
Cuadro 3.3-3. Posibles fuentes de factores de emisión y especiación, y de datos de actividad para locomotoras.....	45
Cuadro 3.3-4. Posibles fuentes de factores de emisión y especiación, y de datos de actividad para fuentes marítimas.....	48
Cuadro 3.3-5. Posibles fuentes de datos de actividad, así como de factores de emisión y de especiación para fuentes aeronáuticas .....	51
Cuadro 3.4-1. Posibles fuentes de factores de emisión y especiación, y de datos de actividad para la combustión doméstica.....	54
Cuadro 3.5-1 Posibles fuentes de factores de emisión y especiación, y de datos de actividad para operaciones de cocina al carbón (cocina comercial).....	57
Cuadro 3.5-2. Posibles fuentes de datos de actividad, así como de factores de emisión y de especiación para actividades de incineración .....	58
Cuadro 3.5-3. Posibles fuentes de datos de actividad, así como de factores de emisión y de especiación para incendios estructurales y de vehículos .....	59
Cuadro 3.5-4. Posibles fuentes de datos de actividad, así como de factores de emisión y de especiación para la combustión de desechos sólidos urbanos.....	62

## Lista de gráficas

Gráfica 2.1-1. Ejemplo de árbol de decisión para locomotoras .....	17
Gráfica 2.2-1. Fracciones de carbono negro y orgánico en emisiones de PM <sub>2.5</sub> para las categorías de fuentes no móviles que registran las mayores emisiones de carbono negro en Estados Unidos.....	20

## Acrónimos, siglas y abreviaturas

AEMA	Agencia Europea de Medio Ambiente
AIE	Agencia Internacional de Energía
AEO	Panorama anual de la energía ( <i>Annual Energy Outlook</i> ), Estados Unidos
APEI	Inventario de Emisiones de Contaminantes Atmosféricos ( <i>Air Pollutant Emission Inventory</i> ), Canadá
CE	carbono elemental
CCAC	Coalición por el Clima y el Aire Limpio (por sus siglas en inglés)
CCA	Comisión para la Cooperación Ambiental
CHIEF	<i>Clearinghouse for Inventories and Emission Factors</i> (Centro de Información para Inventarios y Factores de Emisión), Estados Unidos
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
CN	carbono negro
CO	carbono orgánico
Conafor	Comisión Nacional Forestal, México
EIA	Administración de Información sobre Energía ( <i>Energy Information Administration</i> ), Estados Unidos
EMEP	Programa Europeo de Monitoreo y Evaluación ( <i>European Monitoring and Evaluation Program</i> )
EPA	Agencia de Protección Ambiental ( <i>Environmental Protection Agency</i> ), Estados Unidos
ERG	Eastern Research Group, Inc.
FAA	Administración de la Aviación Federal ( <i>Federal Aviation Administration</i> ), Estados Unidos
FE	factor de emisión
GAINS	<i>Greenhouse Gas and Air Pollution Interactions and Synergies Model</i> (modelo de interacciones y sinergias entre gases de efecto invernadero y la contaminación atmosférica), Instituto Internacional para el Análisis de Sistemas Aplicados (IIASA)
GEI	gases de efecto invernadero
GREET	<i>Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation model</i> (modelo de gases de efecto invernadero, emisiones reguladas y uso de energía en el transporte), Estados Unidos
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, México
Inegi	Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México
IPCC	Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (por sus siglas en inglés)
kg	kilogramo(s)
kJ	kilojulio(s)
KVR	kilómetros-vehículo recorridos
kWh	kilovatio(s) por hora
lb	libra(s)
gas LP	gas licuado de petróleo
LTO	ciclos de aterrizaje y despegue (del inglés: <i>landing and take-off</i> )

MOVES	<i>Motor Vehicle Emissions Simulator model</i> (modelo para la simulación de emisiones de vehículos automotores), EPA de Estados Unidos
MJ	megajulios
NEI	Inventario Nacional de Emisiones ( <i>National Emissions Inventory</i> ), Estados Unidos
NIR	Informe del Inventario Nacional ( <i>National Inventory Report</i> ), Canadá
NONROAD	modelo por computadora creado en Estados Unidos para la elaboración de inventarios de emisiones de fuentes móviles (vehículos y equipo) que no circulan por carretera
NPRI	Inventario Nacional de Emisiones de Contaminantes ( <i>National Pollutant Release Inventory</i> ), Canadá
°C	grados Celcius
Pemex	Petróleos Mexicanos
PS	partículas suspendidas
PM <sub>2.5</sub>	partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 2.5 micrómetros (materia particulada fina)
PM <sub>10</sub>	partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 10 micrómetros
RES-D	<i>Report on Energy Supply and Demand</i> (informe sobre oferta y demanda de energía), Canadá
SCT	Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México
Semarnat	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México
Sener	Secretaría de Energía, México
SIG	sistemas de información geográfica
SNAP	proyecto Apoyo a la Iniciativa de Planificación Nacional sobre Contaminantes Climáticos de Vida Corta (del inglés: <i>Supporting National Planning for Action on Short-Lived Climate Pollutants</i> ), México
SPECIATE	base de datos de la EPA: reúne perfiles de fuentes de contaminación atmosférica (materia particulada, compuestos orgánicos volátiles y otros gases), Estados Unidos
ton	tonelada(s)
USDA	Departamento de Agricultura de Estados Unidos ( <i>US Department of Agriculture</i> )

## Sinopsis

Elaboradas por la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA), las presentes directrices para la estimación de las emisiones de carbono negro de América del Norte tienen por objetivo presentar una metodología compatible y uniforme para la elaboración de inventarios de carbono negro en Canadá, Estados Unidos y México, a fin de mejorar tanto la comparabilidad a escala transfronteriza como la evaluación de opciones de mitigación. Estas directrices ofrecen, además, recomendaciones por cuanto a la ejecución de investigaciones ulteriores con miras a uniformar las capacidades de los tres países, con atención especial en México. Como parte de la primera etapa del proyecto, se llevaron a cabo una revisión documental exhaustiva y una evaluación comparativa de fuentes de datos y métodos disponibles para la creación de inventarios de emisiones de carbono negro y de los inventarios subyacentes de emisiones de partículas suspendidas en América del Norte, Europa y Asia. Esta evaluación culminó con la formulación de una serie de recomendaciones sobre “prácticas óptimas” a aplicar respecto de cada uno de los principales sectores de emisión (fuentes móviles, quema a cielo abierto, combustión doméstica y sectores energético e industrial, entre otros), así como alternativas para los casos en que la instrumentación de prácticas óptimas a corto plazo no sea viable. Para ello se convocó a un grupo de expertos que se encargaría de revisar y aportar comentarios en torno a estas primeras recomendaciones con el propósito de asegurar un consenso sobre los métodos y fuentes de datos propuestos. Con base en esta labor inicial y las aportaciones del grupo de expertos, se compilaron las presentes directrices, que recopilan fuentes específicas de factores de emisión, datos de actividad y factores de especiación, a fin de generar información suficientemente detallada con la que los responsables de cada país puedan generar inventarios de emisiones de carbono negro para todos los sectores en América del Norte.

## Resumen ejecutivo

Los inventarios de emisiones constituyen herramientas de suma utilidad pues facilitan a investigadores y responsables de la definición de políticas la labor de evaluar la magnitud de las emisiones de contaminantes atmosféricos, la contribución de distintas categorías de fuentes y las estrategias de mitigación más prometedoras. En los últimos años, Canadá, Estados Unidos y México han elaborado inventarios de carbono negro (CN) de primera generación. Luego de evaluar estos inventarios, la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA) determinó que hacía falta un método sistemático para calcular las emisiones de CN, toda vez que las discrepancias entre un país y otro obstaculizan las comparaciones y evaluaciones de opciones de mitigación a escala transfronteriza (CCA, 2012). Con vistas a atender esta situación, la CCA emprendió en 2013 un proyecto encaminado a definir directrices para la estimación de emisiones de carbono negro, y para ello la CCA contrató a Eastern Research Group (ERG) y a sus socias, Joyce Penner, de la Universidad de Michigan, y Verónica Garibay Bravo, de ORG+CO, Inc. Estas directrices establecen un conjunto uniforme de métodos para aumentar la precisión de los cálculos de las emisiones de CN de América del Norte, con el objeto de generar inventarios confiables y compatibles a partir de los cuales puedan establecerse valores de referencia y determinarse prioridades para su reducción por categoría de fuente o lugar.

Una de las actividades de la tarea 1 del proyecto consistió en efectuar una revisión documental exhaustiva de estudios sobre emisiones de carbono negro realizados en América del Norte, Europa, Asia y África. A partir de esta revisión, el equipo evaluó métodos y fuentes de datos tomados de estudios y documentos centrados en Canadá, Estados Unidos, México y Europa, y preparó recomendaciones preliminares sobre la adopción de métodos para cada uno de los principales sectores fuente (generadores de emisiones). Las primeras búsquedas realizadas por ERG en las bases de datos en línea consultadas arrojaron un listado inicial de cerca de 8,000 estudios, mismo que se redujo para generar una lista maestra de material a revisar en forma detallada: artículos de revistas, informes e inventarios completos de emisiones pertenecientes a diferentes dependencias, incluidas la Agencia de Protección Ambiental (*Environmental*



Protection Agency, EPA) de Estados Unidos, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) de México, la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA), la propia CCA, el Consejo del Ártico y diversas instituciones académicas. Los documentos incluidos en la lista maestra de estudios corresponden no sólo a carbono negro, sino a los principales inventarios de partículas suspendidas. Esto obedece a que, para prácticamente todos los sectores emisores, los inventarios de emisiones de CN se derivan de los inventarios subyacentes de emisiones de partículas de materia fina. Por ello, los métodos y fuentes de datos utilizados para partículas suspendidas constituyen la base de las directrices recomendadas en relación con los inventarios de emisiones de carbono negro. Ahora bien, a efecto de formular directrices completas para la creación de inventarios de emisiones de CN a escala de América del Norte, era preciso tomar en consideración las disparidades que prevalecen entre los tres países del subcontinente en cuanto a metodología y fuentes de datos de uso en la producción de inventarios de partículas suspendidas. Así, el análisis realizado como parte de la tarea 1 del proyecto se centró simultáneamente tanto en los métodos y las fuentes de datos de los inventarios más recientes de emisiones de materia particulada en cada país, como en los registros de emisiones de CN de ellos derivados.

Las actividades de la tarea 2 consistieron en realizar consultas entre expertos en relación con la revisión documental y las recomendaciones preliminares compiladas como parte de la tarea 1. Se congregó a un grupo revisor, integrado por 29 especialistas en las principales categorías de sectores fuente (residencial, industrial, generación eléctrica, quema de biomasa, vehículos automotores carreteros, fuentes móviles que no circulan por carretera y otras fuentes) y con experiencia en investigación sobre emisiones de carbono negro y elaboración de inventarios en América del Norte, Europa y Asia. Con la conformación de este grupo se buscó también aportar una perspectiva en relación con temas de medición y especiación. El propósito de la serie de consultas entre los miembros del grupo de especialistas fue obtener comentarios en torno a la pertinencia de la revisión documental realizada y los métodos y fuentes de datos propuestos para cada sector. Los integrantes del grupo de especialistas convinieron en revisar el informe producto de la tarea 1 y enviar sus comentarios vía cuestionarios en línea, participación en seminarios web o comunicados por escrito. Los resultados de estas consultas y la forma en que se abordaron estos comentarios se hicieron llegar a la CCA en diciembre de 2014.

El presente documento es el producto final del proyecto de la CCA, en el marco de la tarea 3, consistente en formular directrices con las cuales los expertos en América del Norte puedan generar inventarios de emisiones de carbono negro que sean integrales y reflejen los métodos y fuentes de datos más recientes. Estas directrices plantean los métodos y fuentes de datos recomendados, aplicables en Canadá, Estados Unidos y México, para las principales categorías de fuentes emisoras. Con el objeto de establecer prácticas óptimas (y alternativas cuando no se disponga de la información pertinente), las directrices siguen el formato empleado por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) y adoptado por la comunidad de expertos en Europa, en el que se definen tres “niveles”, en función del grado de detalle requerido para la actividad y los factores de emisión en cuestión, así como del nivel de detalle del inventario resultante: el nivel 1 corresponde al más general y el nivel 3 al de mayor detalle. Estos niveles —descritos en los documentos de orientación del Programa Europeo de Monitoreo y Evaluación y del IPCC en torno a la creación de inventarios (IPCC, 2006; EMEP-AEMA, 2013)— ofrecen a los creadores de inventarios opciones para generar las estimaciones, dependiendo de la información disponible o el propósito del inventario. A cada nivel corresponden cierto método y fuentes de datos específicas (datos de actividad, factores de emisión y factores de especiación), mismos que se presentan en estas directrices, para los principales subsectores. Un método de nivel 1 consiste, por lo general, en datos de alcance nacional sobre combustibles u otros datos de actividad agregados aplicados conjuntamente con factores de emisión de partículas de materia fina de 2.5 micrómetros (PM<sub>2.5</sub>) y factores de especiación de carbono negro. El nivel 2 es similar al nivel 1, aunque en este caso los datos de actividad y los factores de emisión se caracterizan de acuerdo con el tipo de tecnología empleada. Los métodos de nivel 3, de ser posible su aplicación, por lo general se consideran los de mayor precisión y se basan en un nivel de detalle bastante más elevado que los niveles 1 o 2. Aunque podrían parecer similares a los de nivel 2, los métodos de nivel 3 emplean datos de actividad más detallados (por ejemplo,

carga de combustible específica para cada cultivo, tasas de emisión modelizadas, consumo de combustible específico a la tecnología, etcétera). La mayoría de los métodos se basa en la estimación de emisiones de  $PM_{2.5}$ , mismas que luego se convierten en emisiones de CN mediante la aplicación de un factor de especiación. Los factores de emisión y de especiación recomendados para los métodos de nivel 1 se presentan, en una serie de cuadros por sector fuente, en el apéndice B. Asimismo, a fin de respaldar los cálculos de las emisiones de carbono negro, estas directrices presentan recomendaciones sobre prácticas óptimas para el manejo de datos, el registro y la elaboración de informes, al igual que un análisis en torno a la validación y los niveles de incertidumbre de los inventarios.

Las directrices contienen también recomendaciones sobre la realización de investigaciones ulteriores, en general y por sector particular. Quizá el área de investigación de mayor relevancia sea el mejoramiento de los factores de especiación para carbono negro, en términos tanto de dar cuenta de propiedades de absorción de luz, como de uniformar estos factores al nivel de detalle encontrado en factores de emisión de otros componentes de partículas suspendidas. Uno de los objetivos a largo plazo sería establecer factores de especiación con base en una definición y un protocolo de medición uniformes en relación con el carbono fotoabsorbente, y lograr plena consonancia en el nivel de detalle de los factores de especiación y de emisión de otros componentes de partículas suspendidas. Es preciso adoptar programas de investigación cuyo objetivo sea alcanzar estas metas, a fin de aminorar el considerable grado de incertidumbre que actualmente se asocia con el uso de factores de especiación para integrar inventarios de carbono negro.

## 1 Introducción

### 1.1 Antecedentes

Los inventarios de emisiones constituyen herramientas de suma utilidad pues facilitan a investigadores y responsables de la definición de políticas la labor de evaluar la magnitud de las emisiones de contaminantes atmosféricos, la contribución de distintas categorías de fuentes y las estrategias de mitigación más prometedoras. En los últimos años, Canadá, Estados Unidos y México han elaborado inventarios de carbono negro (CN) de primera generación. Luego de evaluar estos inventarios, la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA) determinó que hacía falta un método sistemático para calcular las emisiones de CN, toda vez que las discrepancias entre un país y otro obstaculizan las comparaciones y evaluaciones de opciones de mitigación a escala transfronteriza (CCA, 2012). Con vistas a atender esta situación, la CCA emprendió en 2013 un proyecto encaminado a definir directrices para la estimación de emisiones de carbono negro, y para ello la CCA contrató a Eastern Research Group (ERG) y a sus socias, Joyce Penner, de la Universidad de Michigan, y Verónica Garibay Bravo, de ORG+CO, Inc. Estas directrices establecen un conjunto uniforme de métodos para aumentar la precisión de los cálculos de las emisiones de CN de América del Norte, con el objeto de generar inventarios confiables y compatibles a partir de los cuales puedan establecerse valores de referencia y determinarse prioridades para su reducción por categoría de fuente o lugar.

Una de las actividades de la tarea 1 del proyecto consistió en hacer una revisión documental exhaustiva de estudios sobre carbono negro realizados en América del Norte, Europa, Asia y África. A partir de esta revisión, el equipo evaluó métodos y fuentes de datos tomados de estudios y documentos centrados en Canadá, Estados Unidos, México y Europa, y preparó recomendaciones preliminares sobre la adopción de métodos para cada uno de los principales sectores fuente (generadores de emisiones). Los resultados de la tarea 1, en que se detalla el análisis realizado por ERG sobre inventarios de emisiones, métodos y material de orientación de que se dispone o en uso para emisiones de carbono negro, junto con las primeras recomendaciones para formular directrices a fin de generar inventarios de emisiones, se presentaron a la CCA en julio de 2014, en un informe inédito titulado: *North American Black Carbon Emissions Estimation Guidelines: Review of Methods for Estimating Black Carbon Emissions* [Directrices para la estimación de las emisiones de carbono negro de América del Norte: revisión de métodos].

Las actividades de la tarea 2 consistieron en realizar consultas entre expertos en relación con la revisión documental y las recomendaciones preliminares compiladas como parte de la tarea 1. Se congregó a un grupo revisor, integrado por 29 especialistas en las principales categorías de sectores fuente (residencial, industrial, generación eléctrica, quema de biomasa, vehículos automotores carreteros, fuentes móviles que no circulan por carretera y otras fuentes) y con experiencia en investigación sobre emisiones de carbono negro y elaboración de inventarios en América del Norte, Europa y Asia. Con la conformación de este grupo se buscó también aportar una perspectiva en relación con temas de medición y especiación. El propósito de la serie de consultas entre los miembros del grupo de especialistas fue obtener comentarios en torno a la pertinencia de la revisión documental realizada y los métodos y fuentes de datos propuestos para cada sector. Los resultados de estas consultas y la forma en que se abordaron estos comentarios se hicieron llegar a la CCA en diciembre de 2014, en otro informe inédito, titulado: *North American Black Carbon Emissions Estimation Guidelines: Summary of Expert Panel Comments, and Changes to Initial Emission Estimation Recommendations* [Directrices para la estimación de las emisiones de carbono negro de América del Norte: resumen de comentarios del grupo de expertos, y cambios a las recomendaciones iniciales en torno a la estimación de emisiones].

El presente documento es el producto final del proyecto de la CCA, en el marco de la tarea 3, consistente en formular directrices con las cuales los expertos en América del Norte puedan elaborar inventarios de emisiones de carbono negro que sean integrales y reflejen los métodos y fuentes de datos más recientes.

Además de plantear los métodos y fuentes de datos recomendados, aplicables en Canadá, Estados Unidos y México, para las principales categorías de fuentes emisoras, estas directrices examinan cuestiones de validación e incertidumbres de los inventarios, al igual que prácticas óptimas para el manejo de datos, el registro y la elaboración de informes. También incluyen recomendaciones para futuras investigaciones, con base en las mayores lagunas de información detectadas a lo largo del proyecto.

## **1.2 Objetivos de las directrices**

Las directrices para la estimación de las emisiones de carbono negro se proponen brindar un conjunto de métodos compatibles para crear inventarios de este elemento en Canadá, Estados Unidos y México, con el propósito de lograr, en la esfera transfronteriza, comparaciones más precisas y mejores evaluaciones de opciones de mitigación. Estas directrices ofrecen métodos y fuentes de datos concretos que los usuarios pueden consultar para generar un inventario de emisiones de carbono negro con un enfoque de microescala (*bottom-up*, es decir, a partir de información detallada de fuentes particulares y emisiones individuales). Las directrices presentan, asimismo, recomendaciones para futuras investigaciones a efecto de uniformar las capacidades de los tres países, con atención especial en México. Incluyen, también, herramientas que los responsables de la producción de inventarios y de la toma de decisiones de todos los sectores fuente pueden utilizar. Con el propósito de ayudar a los expertos a determinar el nivel de detalle necesario para su análisis, se aborda la forma en que se utilizarán los inventarios (casos de uso). Además, para establecer prácticas óptimas (y alternativas cuando no se disponga de la información pertinente), las directrices siguen el formato empleado por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) y adoptado por la comunidad de expertos en Europa, en el que se definen tres “niveles”, en función del grado de detalle requerido para la actividad y los factores de emisión en cuestión, así como del nivel de detalle del inventario resultante: el nivel 1 corresponde al más global y el nivel 3 al de mayor detalle. Estos niveles —descritos en los documentos de orientación del Programa Europeo de Monitoreo y Evaluación y del IPCC en torno a la creación de inventarios (IPCC, 2006; EMEP-AEMA, 2013)— ofrecen a los creadores de inventarios opciones para generar las estimaciones, dependiendo de la información disponible o el propósito del inventario. A cada nivel corresponden cierto método y fuentes de datos específicas (datos de actividad, factores de emisión y factores de especiación), mismos que se presentan en estas directrices, para los principales subsectores.

A fin de respaldar los cálculos de las emisiones de carbono negro, el presente documento brinda, además, una orientación general para el manejo de datos de emisiones (apéndice A) y presenta un análisis sobre la validación y los niveles de incertidumbre de los inventarios, acompañado de cuadros con los factores de emisión y de especiación recomendados (apéndice B).

## **1.3 Síntesis de la revisión, evaluación y consulta con expertos (tareas 1 y 2)**

### **1.3.1 Revisión documental y recomendaciones iniciales (tarea 1)**

En el marco de la tarea 1 del proyecto, ERG procedió a realizar una revisión documental exhaustiva a fin de identificar el material publicado sobre emisiones de carbono negro y los métodos para su cálculo. ERG llevó a cabo esta revisión desde distintas perspectivas: evaluó las categorías de fuentes, definió el alcance geográfico y estableció métodos experimentales para determinar los principales componentes de los inventarios (por ejemplo: factores de emisión, perfiles de especiación, datos de las actividades y enfoques de proyección). Integrado por expertos en la materia de cada uno de los principales sectores emisores de carbono negro que fueron objeto de la revisión, el equipo asignado por ERG para el proyecto recopiló una lista de informes particularmente relevantes sobre carbono negro o partículas suspendidas a considerar para el proyecto. Al mismo tiempo, personal de ERG realizó búsquedas bibliográficas con el propósito de

identificar otros estudios sobre carbono negro y partículas suspendidas, para lo cual recurrió a las bases de datos en línea de literatura científica ScienceDirect y ProQuest.

Las primeras búsquedas realizadas por ERG en las bases de datos en línea consultadas arrojaron un listado inicial de cerca de 8,000 estudios, que luego se filtró para incluir únicamente artículos de revistas y estudios publicados a partir de 2004. De los 1,200 estudios seleccionados, 584 contaban con sinopsis que podían descargarse en forma de archivos de texto. Luego de revisar las sinopsis, ERG eligió los estudios más relevantes; aquellos que no contaban con sinopsis se seleccionaron con base en el título. Se excluyeron de un análisis ulterior todos los estudios que carecían de información sobre métodos para estimar emisiones de carbono negro, sus factores de emisión o técnicas de mitigación. Por otro lado, aquellos que sólo se centraban en la distribución de las fuentes y la medición de concentraciones tampoco se consideraron para un análisis más a fondo, pues se determinó que guardaban una menor relevancia para la producción de un inventario de emisiones.

Una vez concluido este proceso de revisión, ERG seleccionó 138 estudios para someterlos a un análisis ulterior por su propio equipo de expertos, la CCA y el comité directivo del proyecto. Los integrantes del equipo de proyecto evaluaron cada uno de los estudios e identificaron otros que debían incluirse en la revisión a efectuar como parte de la tarea 1. De los comentarios y sugerencias obtenidos —sobre la inclusión o exclusión de estudios— se generó una lista maestra de material a revisar: artículos de revistas, informes e inventarios completos de emisiones pertenecientes a diferentes dependencias, incluidas la Agencia de Protección Ambiental (*Environmental Protection Agency*, EPA) de Estados Unidos, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) de México, la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA), la CCA, el Consejo del Ártico e instituciones académicas.

Cabe señalar que ERG se puso en contacto con funcionarios del ministerio de Medio Ambiente de Canadá (*Environment Canada*, EC) con el objeto de identificar inventarios de emisiones de carbono negro y PM<sub>2.5</sub>, así como informes y directrices en la materia a disposición para los análisis previstos en el marco de esta tarea 1 del proyecto. De acuerdo con información proporcionada por Environment Canada, los métodos y los datos de actividades y emisiones que se utilizan para producir los inventarios canadienses de numerosos sectores son similares a los empleados en Estados Unidos. Para fines del presente informe, cuando en el material bibliográfico consultado no se disponía de suficiente información detallada, se presupuso que los métodos aplicados en los inventarios canadienses guardaban similitud con los estadounidenses, es decir, los utilizados para el Inventario Nacional de Emisiones (*National Emissions Inventory*, NEI) y el *Report to Congress on Black Carbon* (Informe al Congreso sobre el carbono negro) de la EPA.

Los informes y estudios incluidos en la lista maestra de material a revisar se clasificaron conforme a las siguientes categorías: 1) aquellos que proporcionarían métodos y fuentes de datos completos para producir un inventario integral de emisiones de CN, 2) los que aportarían información complementaria o de base sobre emisiones de partículas suspendidas, 3) los relativos a nuevas fuentes de factores de emisión, y 4) aquellos que contuvieran caracterizaciones locales o regionales del CN. Los estudios incluidos en las categorías 1 y 2 fueron objeto de un análisis más a fondo: se consideró que aportaban la información más completa a partir de la cual podían formularse recomendaciones preliminares sobre métodos generales para la producción de inventarios, factores de emisión y fuentes de datos de actividades para los principales sectores emisores de carbono negro. Las fuentes identificadas en las categorías 3 y 4 se consideraron material que podría utilizarse para optimizar los enfoques básicos a partir de los cuales se formularían recomendaciones.

De la lista maestra de estudios candidatos, las fuentes enumeradas a continuación se seleccionaron para someterlas a una revisión exhaustiva por expertos de ERG en la materia:

- *Report to Congress on Black Carbon* [Informe al Congreso sobre el carbono negro] (EPA, 2013a).
- Inventario Nacional de Emisiones (*National Emissions Inventory*, NEI) de Estados Unidos, 2002, 2005, 2008 y 2011 (EPA, 2006, 2008, 2011a y 2013b).

- *Assessment of Emissions and Mitigation Options for Black Carbon for the Arctic Council* [Evaluación de emisiones de carbono negro y opciones de mitigación para el Consejo del Ártico] (Arctic Council, 2011).
- *Apoyo a la iniciativa de planificación nacional sobre contaminantes climáticos de vida corta en México* (INECC-CCAC-MCE<sup>2</sup>, 2013).
- *Inventario de emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México, 2010: gases de efecto invernadero y carbono negro* (Sedema, 2012).
- *Evaluación de la comparabilidad de los inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero y carbono negro en América del Norte, 2012* (CCA, 2012).
- *EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2013* [Guía EMEP-AEMA, 2013: guía para la producción de inventarios de emisiones de contaminantes atmosféricos del Programa Europeo de Monitoreo y Evaluación (EMEP, por sus siglas en inglés) y la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA)] (EMEP-AEMA, 2013).
- “A Technology-Based Global Inventory of Black and Organic Carbon Emissions from Combustion” [Inventario mundial de emisiones de carbono negro y orgánico por combustión, por tecnología] (Bond *et al.*, 2004).
- *Extension of the GAINS Model to Include Short-Lived Climate Forcers* [Extensión del modelo de interacciones y sinergias entre gases de efecto invernadero y la contaminación atmosférica (GAINS, por sus siglas en inglés) para incluir contaminantes de corta vida precursores del cambio climático] (Heyes *et al.*, 2011).
- “Emission Factors for Open and Domestic Biomass Burning for Use in Atmospheric Models” [Factores de emisión para quema doméstica y a cielo abierto de biomasa aplicables en modelos atmosféricos] (Akagi *et al.*, 2011).
- “Trace Gas and Particle Emissions from Domestic and Industrial Biofuel Use and Garbage Burning in Central Mexico” [Emisiones de gases y partículas en niveles traza provenientes del consumo de biocombustible y quema de basura a escalas doméstica e industrial en la región central de México] (Christian *et al.*, 2010).
- “Trace Gas and Particle Emissions from Open Biomass Burning in Mexico” [Emisiones de gases y partículas en niveles traza provenientes de la quema de biomasa a cielo abierto en México] (Yokelson *et al.*, 2011).
- “Fuel-Based Fine Particulate and Black Carbon Emission Factors from a Railyard Area in Atlanta” [Factores de emisión de partículas de materia fina y carbono negro con base en los combustibles, procedentes de un patio de maniobras ferroviarias en Atlanta] (Galvis *et al.*, 2013).
- *Life Cycle Analysis of Conventional and Alternate Marine Fuels in GREET* [Análisis de ciclo de vida de combustibles marinos convencionales y alternativos en el modelo de gases de efecto invernadero, emisiones reguladas y uso de energía en el transporte (modelo GREET, por sus siglas en inglés)] (Adom *et al.*, 2013).
- *Current Methodologies in Preparing Mobile Source Port-Related Emission Inventories* [Metodologías actuales para la preparación de inventarios de emisiones de fuentes móviles asociadas a puertos] (EPA, 2009a).
- *Investigation of Appropriate Control Measures (Abatement Technologies) to Reduce Black Carbon Emissions from International Shipping* [Investigación sobre medidas de control pertinentes — tecnologías de reducción— para mitigar las emisiones de carbono negro generadas por el transporte marítimo internacional] (Lack *et al.*, 2012).

- “An Algorithm to Estimate Aircraft Cruise Black Carbon Emissions for Use in Developing a Cruise Emission inventory” [Algoritmo para calcular las emisiones de carbono negro de aeronaves en modo crucero, a emplear en la producción de un inventario de emisiones en la fase crucero] (Peck *et al.*, 2013).
- “Estimation of County-level BC Emissions and Its Spatial Distribution in China in 2000” [Estimación de emisiones de carbono negro a escala de condados y su distribución espacial en China en 2000] (Qin y Xie, 2011).

En esta lista se incluyen los principales documentos en relación con inventarios no sólo de carbono negro, sino también de partículas suspendidas, y ello obedece a que prácticamente para todos los sectores emisores, los inventarios de emisiones de CN se derivan de los inventarios de partículas suspendidas subyacentes. Canadá, Estados Unidos y México han generado, de años atrás, inventarios de materia particulada como parte de sus planes de calidad del aire de alcance nacional, regional y local. Los métodos y fuentes de datos utilizados para partículas suspendidas, por lo tanto, constituyen la base de las directrices recomendadas para la producción de inventarios de emisiones de carbono negro. Será preciso que en la formulación de directrices detalladas para la creación de inventarios de emisiones de CN se atiendan las disparidades que prevalecen entre los tres países de América del Norte en cuanto a metodología y fuentes de datos de uso en la producción de inventarios de partículas suspendidas. Las fuentes que se analizaron como parte de la tarea 1 del proyecto se centraron simultáneamente en métodos y fuentes de datos tanto para las emisiones más recientes de materia particulada en cada país como en las emisiones de CN derivadas de estas fuentes. En este contexto, en el cuadro 1.3-1 se muestra la lista de estudios —agrupados por país y a un lado de los inventarios subyacentes de partículas suspendidas— que se sometieron a un análisis más a fondo.

**Cuadro 1.3-1. Principales estudios examinados: fuentes completas**

País	Inventario básico de emisiones de carbono negro	Inventarios de PS subyacentes
Estados Unidos	<i>Report to Congress on Black Carbon</i> (EPA, 2013a)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• EPA, NEI (2002-2005)</li> <li>• EPA, NEI (2011)</li> <li>• Inventarios de los organismos o entidades de planificación regional (detalles de la biomasa)</li> </ul>
Canadá	<i>Assessment of Emissions and Mitigation Options for Black Carbon for the Arctic Council</i> (Consejo del Ártico, 2011)	Inventario de Emisiones de Contaminantes Atmosféricos ( <i>Air Pollutant Emission Inventory</i> , APEI), que incluye información del Inventario Nacional de Emisiones de Contaminantes ( <i>National Pollutant Release Inventory</i> , NPRI) registrada por instalaciones
México	<i>Apoyo a la iniciativa de planificación nacional sobre contaminantes climáticos de vida corta en México</i> (INECC-CCAC-MCE <sup>2</sup> , 2013)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inventario Nacional de Emisiones de México 2005 (Semarnat, 2012)</li> <li>• Inventario Nacional de Emisiones de México 2008 (Semarnat, 2015)</li> </ul>
Todos los países europeos	<i>EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2013</i> (EMEP-AEMA, 2013)	Los mismos que para la guía EMEP-AEMA
Escala mundial	<i>A Technology-Based Global Inventory of Black and Organic Carbon Emissions from Combustion</i> (Bond <i>et al.</i> , 2004)	Incluidos en el modelo de CN

### Cuadro 1.3-1. Principales estudios examinados: fuentes completas

País	Inventario básico de emisiones de carbono negro	Inventarios de PS subyacentes
	<i>Extension of the GAINS Model to Include Short-Lived Climate Forcers (Heyes et al., 2011)</i>	Incluidos en el modelo de CN

Los expertos que participaron en la revisión se enumeran a continuación:

- Joyce Penner, Universidad de Michigan
  - Quema de biomasa a cielo abierto; subsectores: incendios forestales naturales, quema agrícola, quema prescrita
- Paula Fields Simms, ERG
  - Fuentes residenciales; subsectores: consumo doméstico de combustibles (biomasa, madera, petróleo, carbón, gas licuado de petróleo [gas LP], queroseno y gas natural)
- John Koupal, ERG
  - Fuentes móviles; subsector: vehículos carreteros
- Rick Baker, ERG
  - Fuentes móviles; subsector: vehículos y equipo que no circulan por carretera
- Richard Billings, ERG
  - Fuentes móviles; subsectores: transporte marítimo, ferroviario y aéreo
- Regi Oommen, ERG
  - Fuentes de los sectores energético e industrial; subsectores: generación pública de electricidad y térmica; refinación de petróleo; industrias manufactureras y de la construcción; sectores comercial e institucional; fugas y quema de gases sobrantes; transformación de combustibles sólidos; industria química; producción de cemento, cal, vidrio, ferroaleaciones, aluminio, cobre, y pulpa y papel; industria siderúrgica; techado de asfalto, e incineración de desechos
- Gopi Manne, ERG
  - Otras fuentes; subsectores: cocina al carbón y comercial, cremación, incendios de estructuras y vehículos, y combustión de desechos sólidos urbanos
- Verónica Garibay Bravo, ORG+CO
  - Fuentes en México; revisión de todos los documentos centrados en México

### 1.3.2 Resumen de los principales documentos analizados

En este apartado se analizan las conclusiones emanadas del proceso de revisión de los documentos enumerados en el apartado anterior, correspondientes a inventarios de emisiones de cada uno de los países de América del Norte, así como de Europa y otros de alcance mundial.



## Estados Unidos

### *Informe al Congreso sobre el carbono negro*

Publicado en 2013 por la Agencia de Protección Ambiental (*Environmental Protection Agency*, EPA), el *Report to Congress on Black Carbon* [Informe al Congreso sobre el carbono negro] constituye el documento más completo disponible en Estados Unidos sobre este elemento. Además de detallar los efectos del CN en la salud ambiental y pública, este informe presenta información derivada de observaciones y análisis amplios sobre opciones de mitigación y sus beneficios. Asimismo, muestra inventarios detallados de emisiones por sector — incluidas, entre otras, categorías como la de quema de biomasa a cielo abierto; fuentes móviles, y los sectores residencial, industrial, energético y de generación eléctrica—, para el año de referencia 2005, con proyecciones para años futuros.

Los inventarios de emisiones de carbono negro cubren todas las fuentes emisoras importantes en Estados Unidos y proporcionan estimaciones completas al respecto. En prácticamente todos los casos, el método utilizado para generar los inventarios de CN consiste en derivar las estimaciones a partir de los inventarios de partículas suspendidas de que se dispone. En el informe se describe cómo, para la mayor parte de los sectores emisores individuales, se utilizaron las emisiones de partículas de materia fina registradas en el Inventario Nacional de Emisiones (*National Emissions Inventory*, NEI) a fin de calcular las emisiones de CN en 2005, con base en factores de especiación (la proporción de carbono negro respecto del total de PS) derivados de las fuentes disponibles. En este sentido y en términos generales, lejos de presentar nuevos factores de emisión, actividad o especiación, el informe constituye una amplia compilación de cálculos disponibles reunidos para generar una estimación nacional completa.

### *Inventario Nacional de Emisiones de Estados Unidos*

Para poder entender los métodos y fuentes de datos empleados en la producción de inventarios de emisiones de carbono negro de Estados Unidos, es preciso referirse a los métodos y fuentes utilizados para calcular las emisiones de partículas suspendidas en el NEI. La EPA es la entidad encargada de recopilar la información para integrar el NEI, con el objeto de ofrecer una estimación completa —de alcance nacional— de emisiones atmosféricas anuales de contaminantes de criterio (esto es, contaminantes para los cuales se han establecido Normas Nacionales de Calidad del Aire [*National Ambient Air Quality Standards*, NAAQS]) y sus precursores, así como de contaminantes peligrosos emitidos por todos los sectores. Producido conforme a un ciclo trienal, en el NEI se registran retrospectivamente las emisiones anuales correspondientes a un año cada tercer año calendario. Las estimaciones más recientes de que se dispone corresponden a 2011. El *Informe al Congreso sobre el carbono negro* se basa en las estimaciones para 2005, las más recientes disponibles al momento de prepararse el informe. En el transcurso del ciclo de elaboración del NEI, la EPA trabaja estrechamente con dependencias ambientales de los órdenes estatal, local y tribal con miras a producir inventarios de emisiones para cada uno de los condados en Estados Unidos, hasta alcanzar niveles subsectoriales sumamente detallados. Resultado de esta recopilación, el NEI sirve de base a numerosas acciones, a saber: análisis de tendencias, planificación en materia de calidad del aire, formulación de normativas y estudios de la exposición para la salud.

El NEI no se publica como informe independiente per se, sino que la EPA mantiene el sitio web del Centro de Información para Inventarios y Factores de Emisión (*Clearinghouse for Inventories and Emission Factors*, CHIEF) como fuente nodular para realizar las estimaciones de emisiones del NEI, al igual que para tareas subyacentes de análisis y documentación (EPA, 2015a). Así, el equipo de ERG revisó la documentación disponible en el sitio web del CHIEF correspondiente a los sectores de interés, cuyas emisiones de materia particulada se registraron en el NEI 2005 y sirvieron de base para generar las estimaciones de CN en el informe de la EPA al Congreso. El equipo también revisó material relativo a los registros de 2008 y 2011 del NEI, a fin de identificar métodos y fuentes de datos actualizados que pudieran contribuir a mejorar los cálculos de 2005 utilizados en el *Informe al Congreso sobre el carbono negro*.

## México

### *Apoyo a la iniciativa de planificación nacional sobre contaminantes climáticos de vida corta en México*

El informe final del proyecto Apoyo a la Iniciativa de Planificación Nacional sobre Contaminantes Climáticos de Vida Corta en México (iniciativa SNAP [por sus siglas en inglés]) fue preparado por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) y el Centro Molina para Estudios Estratégicos sobre Energía y Medio Ambiente (*Molina Center for Strategic Studies in Energy and the Environment*, MCE<sup>2</sup>). La iniciativa SNAP —iniciativa transversal de la Coalición por el Clima y el Aire Limpio (CCAC, por sus siglas en inglés)— ayuda a países en desarrollo a integrar acciones de mitigación de emisiones de contaminantes de vida corta precursores del cambio climático en sus marcos nacionales de planificación. La CCAC, creada en 2012 por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), busca abordar el tema de estos contaminantes —principalmente metano, carbono negro y numerosos hidrofluorocarbonos— y cuenta actualmente con 82 países socios.

El informe SNAP integra estimaciones nacionales de emisiones de metano y carbono negro para nueve sectores clave en 2010, así como una proyección de referencia para el periodo 2010-2030 y dos escenarios de mitigación. En el apéndice D del informe, se describen las estimaciones correspondientes a cada categoría en términos del método, factores de emisión, datos de actividad e hipótesis principales aplicados; asimismo, se incluyen las principales áreas de oportunidad y una lista exhaustiva de referencias para factores de emisión y datos de actividad. El equipo de ERG analizó las estimaciones de emisiones de CN generadas por el sector de petróleo y gas (quema de gas residual); el transporte carretero; la combustión doméstica (estufas para cocinar); la quema de desechos a cielo abierto; los incendios forestales y de pastizales; la agricultura (quema previa a la zafra de la caña de azúcar); la generación de energía eléctrica; la demanda energética de los sectores de servicios, residencial, comercial, agrícola e industrial (acero, química, pulpa y papel, alimentos, bebidas, cemento, construcción, minería y producción de coque), y también los hornos ladrilleros.

Después de consultar a personal del INECC, ERG analizó también la información actualizada del inventario SNAP para 2013 (INECC-CCAC-MCE<sup>2</sup>, 2013). Aunque el informe de esta versión actualizada no se ha concluido, el equipo de ERG tuvo acceso al método, así como a once fichas técnicas que el INECC le proporcionó para los siguientes subsectores: petróleo y gas; generación de electricidad; sector industrial; incendios agrícolas; quema a cielo abierto de desechos; incineración de desechos peligrosos y biológicos; incendios forestales; transporte carretero, y transporte aéreo, marítimo y ferroviario. Todos estos métodos y sus fuentes de datos y factores de emisión asociados fueron objeto de análisis y se incorporaron, según convino, en las directrices.

### *Inventario Nacional de Emisiones de México*

Para los sectores no incluidos en el informe SNAP, pero que de alguna manera se consideraron fuentes significativas de carbono negro en los documentos de orientación europeos o el *Informe al Congreso* de Estados Unidos, el equipo de ERG analizó los resultados del Inventario Nacional de Emisiones de México (INEM) 2008, preparado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). La actualización más reciente del INEM —cuyo informe para 2008 está aún por publicarse— incluye estimaciones de emisiones de CN para distintos sectores. Cabe señalar que el método empleado para producir el INEM 2005 (Semarnat, 2012) resultó de suma utilidad para entender cómo se realizaron los cálculos de las emisiones de PM<sub>2.5</sub> para el INEM 2008. Esta información se complementó con la generada por personal de la Semarnat respecto de la forma en que se calcularon las emisiones de CN: básicamente se empleó la relación entre emisiones de CN y PM<sub>2.5</sub> de distintas fuentes (Battye *et al.*, 2002; Bond *et al.*, 2004). Se analizaron estimaciones de emisiones para las siguientes categorías: emisiones del transporte aéreo, marítimo y ferroviario; cocina al carbón; incendios estructurales, y equipo agrícola y de construcción.

## Canadá

En febrero de 2015, el gobierno canadiense presentó ante la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE) un inventario de emisiones de carbono negro, junto con un informe exhaustivo al respecto (*Informative Inventory Report, IIR*), que comprendía también emisiones de PM<sub>2.5</sub>. Además, se apoyó al Grupo de Trabajo del Consejo del Ártico (*Arctic Council Task Force*) en la elaboración de un inventario como parte del informe *Assessment of Emissions and Mitigation Options for Black Carbon for the Arctic Council* [Evaluación de emisiones de carbono negro y opciones de mitigación para el Consejo del Ártico] (Consejo del Ártico, 2011). El método utilizado para crear el inventario canadiense de carbono negro fue similar al utilizado en el *Informe al Congreso* de Estados Unidos, en cuanto a que se aplicaron factores de especiación a los inventarios de emisiones de partículas de materia fina subyacentes, reunidos como parte del Inventario de Emisiones de Contaminantes Atmosféricos (*Air Pollutant Emission Inventory, APEI*), para calcular las emisiones de CN. En el APEI se incluyen todas las emisiones de contaminantes atmosféricos de fuentes antropogénicas en Canadá, lo que comprende datos de fuentes fijas registrados por instalaciones, así como de fuentes móviles y de área (Environment Canada, 2014). Con el propósito de complementar la información relativa a los sectores industrial y energético, se produjeron inventarios de partículas suspendidas para los siguientes sectores: doméstico, fuentes móviles carreteras (transporte) y quema de biomasa a cielo abierto. El informe *First Black Carbon Inventory* [Primer inventario de carbono negro] de Canadá abarca emisiones de CN de sectores emisores clave correspondientes al año de registro 2013 (Environment Canada, 2015a).

Más allá del análisis contenido en el informe del Consejo del Ártico, se dispone de poca información detallada sobre los métodos y datos utilizados o que se planea utilizar para elaborar un inventario de emisiones de partículas de materia fina que, a su vez, pudiera utilizarse para efectuar estimaciones actualizadas de emisiones de carbono negro. Environment Canada explicó a ERG que sus métodos para producir inventarios nacionales de partículas suspendidas son, en términos generales, comparables tanto a los de la EPA como a los de Europa, sobre todo para los sectores responsables de la mayoría de las emisiones de CN (por ejemplo, transporte y combustión industrial). Por ello, este informe no aborda la metodología utilizada por Canadá para generar sus inventarios, salvo que se detalle en el informe del Consejo del Ártico y se obtenga del intercambio de información con compiladores de inventarios de Environment Canada. En el transcurso de la elaboración de las presentes directrices, Environment Canada preparó un informe sobre emisiones de CN para 2013 (Environment Canada, 2015a) durante el ciclo de registro 2015. Para los sectores de los que se disponía de información poco detallada, se presupuso que los métodos y fuentes de datos utilizados en Estados Unidos también eran similares a los de Canadá.

## Europa

La producción de inventarios de emisiones de carbono negro en Europa constituye una tarea de reciente incorporación como parte del programa de inventarios de emisiones atmosféricas de mayor alcance, dirigido por el Programa Europeo de Monitoreo y Evaluación (EMEP, por sus siglas en inglés) y la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA). En el marco de este programa, el Equipo de Tarea sobre Inventarios y Proyecciones de Emisiones (*Task Force on Emission Inventories and Projections*) ha elaborado y publicado una exhaustiva guía actualizada sobre la producción de inventarios en Europa, titulada *EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2013* (Guía EMEP-AEMA, 2013: guía para la producción de inventarios de emisiones de contaminantes atmosféricos del Programa Europeo de Monitoreo y Evaluación [EMEP, por sus siglas en inglés] y la Agencia Europea de Medio Ambiente [AEMA]) (EMEP-AEMA, 2013). En respuesta al Convenio sobre la Contaminación Atmosférica Transfronteriza a Gran Distancia (Convenio LRTAP) del Programa Europeo de Monitoreo y Evaluación, esta guía presenta métodos para generar inventarios de carbono negro. La guía EMEP-AEMA proporciona, además, información detallada sobre métodos, factores de emisión y fuentes de datos de actividad para los principales sectores emisores de carbono negro.

## Inventarios a escala mundial

El equipo analizó dos de los principales inventarios de emisiones de carbono negro a escala mundial, que ocupan un lugar destacado dentro de la literatura en la materia y se citan en varios de los estudios e informes descritos anteriormente. Uno de ellos, descrito en el estudio de Bond *et al.* (2004), es un inventario mundial de emisiones de CN provenientes de diversas fuentes de combustión: residenciales, comerciales e industriales, así como hornos ladrilleros, estufas para cocinar y vehículos motorizados, quema de biomasa a cielo abierto y quema de desechos urbanos. En el estudio de Bond se consideran aspectos relacionados con las prácticas de combustión, lo que incluye la combinación de combustibles (fósiles y biocombustibles), los tipos de combustión y los dispositivos de control de emisiones.

El otro inventario analizado corresponde a un modelo de interacciones y sinergias entre gases de efecto invernadero y la contaminación atmosférica (*Greenhouse Gas Air Pollution Interactions and Synergies*, GAINS), el cual estima las emisiones históricas de diez contaminantes atmosféricos y seis gases de efecto invernadero para cada uno de los 48 países europeos, Asia (China e India) y los países del Anexo I de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Los resultados de la expansión inicial de este modelo a fin de incluir a los contaminantes de vida corta precursores del cambio climático, entre ellos el carbono negro, se basan en el inventario europeo de emisiones EMEP de 2006 (Heyes *et al.*, 2011). El modelo GAINS estima los efectos que la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero de los países europeos pueden tener en el hemisferio norte, en el dominio del modelo EMEP, y en los glaciares alpinos y del ártico.

### 1.3.3 Evaluación y recomendaciones iniciales

Con base en estos análisis, el equipo de ERG concluyó que el modelo de orientación establecido en el marco de las directrices del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) —mismo que se aborda con gran detalle y amplía en la guía EMEP-AEMA— es un buen punto de partida también para la formulación de directrices para América del Norte. La guía EMEP-AEMA amplía la metodología determinada por el IPCC a fin de incluir emisiones de partículas de materia fina y carbono negro, por lo que se decidió tomarla como documento básico para fines de comparación en la elaboración del presente informe. Asimismo, la guía EMEP-AEMA establece múltiples niveles para cada sector, de tal manera que los responsables de la producción de inventarios tengan opciones de donde elegir al momento de integrar un inventario. En términos generales, estos niveles se diferencian en función del nivel de agregación de datos de actividad disponibles para el análisis en cuestión. Los factores de emisión se generan a partir de la misma fuente —con lo que se mantiene la uniformidad entre un nivel y otro—, aunque se agrupan para cada nivel de acuerdo con el nivel de agregación de los datos de actividad. Los puntos de orientación se presentan en forma de un árbol de decisión, que dirige al responsable de la producción de inventarios hacia un nivel en particular, en función del grado de detalle de la información disponible. Con base en la guía EMEP-AEMA, para algunos sectores de emisiones definidos como categorías clave únicamente pueden utilizarse los niveles 2 o 3, lo cual también se refleja en el árbol de decisión.

La guía EMEP-AEMA constituye un modelo de orientación de gran utilidad para América del Norte debido a que los creadores de inventarios en Canadá, Estados Unidos y México se enfrentan a desafíos similares en términos de disponibilidad de información, y deben optar por distintas metodologías en función de la información con que cuentan. La definición de niveles ofrece una forma sistemática de subsanar la falta de información para cualquier sector dado. En un enfoque de tres niveles, el nivel 3 corresponde a una práctica óptima, y el nivel 1 al método más bajo aceptable (por ejemplo, para un país que no cuenta con estimaciones de emisiones para un sector en particular). La metodología por niveles constituye una guía para iniciativas de acopio de información, dado que el paso de un nivel a otro (nivel 1 → nivel 2 → nivel 3) suele ser depender de la disponibilidad de detalles en torno a la actividad y emisiones de determinado sector. Otra de las ventajas de adoptar este método es que puede servir de base para lograr una uniformidad entre los países de América del Norte y con los de Europa.

Como primer paso para adaptar estos niveles al contexto de América del Norte, el equipo concibió una matriz —a poblar con cada subsector— que permitiría sistematizar la comparación de métodos entre países. En esta matriz se resumieron los niveles de la guía EMEP-AEMA en primera instancia. Luego, a juicio del equipo, se superpusieron los métodos empleados en Canadá, Estados Unidos y México a efecto de producir inventarios, en relación con los niveles de la guía EMEP-AEMA. Para la creación de esta matriz fue necesario comparar la metodología global con los factores de emisión, fuentes de datos de actividad, factores de especiación, proyecciones y estrategias de mitigación de cada país. El resultado fue una evaluación detallada de la forma en que cada uno de los tres países de América del Norte se compara entre sí y con los niveles adoptados en Europa. Las matrices comprendieron las categorías “< nivel 1” y “> nivel 3”, con el propósito de indicar en qué punto se consideraba que los métodos y fuentes de datos de América del Norte superaban el nivel 3 o quedaban por debajo del nivel 1 de Europa.

El último paso de la tarea 1 del proyecto consistió en formular recomendaciones preliminares con miras a la elaboración de directrices para la producción de inventarios de emisiones, por sector. Con este propósito, cada uno de los revisores se valió de las matrices de evaluación descritas para definir las metodologías conforme a los niveles 1, 2 y 3 pertinentes para América del Norte. Con el objeto de llevar a cabo el proceso para adaptar estos niveles a la región, fue necesario evaluar los métodos y fuentes de datos correspondientes a Canadá, Estados Unidos y México, y compararlos con los niveles definidos en la guía EMEP-AEMA. Si bien representan un punto de referencia de suma utilidad, los niveles de esta guía no siempre pudieron utilizarse directamente para establecer los niveles recomendados para América del Norte. Tal es el caso, sobre todo, cuando la evaluación de alguno de los países de América del Norte resultó “> nivel 3”, es decir, que la práctica óptima en América del Norte se consideró superior a la aplicada en Europa. Los parámetros del nivel 1 de la guía EMEP-AEMA a menudo se utilizaron directamente para representar el nivel 1 de América del Norte.

Los detalles completos sobre la revisión documental, la evaluación cruzada y las recomendaciones preliminares por sector se integraron en el informe de la tarea 1, presentado a la CCA en julio de 2014, con el título *North American Black Carbon Emissions Estimation Guidelines: Review of Methods for Estimating Black Carbon Emissions* [Directrices para la estimación de las emisiones de carbono negro de América del Norte: revisión de métodos].

#### **1.3.4 Consultas entre expertos (tarea 2)**

El punto central de la tarea 2 estribó en solicitar a especialistas en el tema que evaluaran tanto las conclusiones emanadas de la tarea 1 como las recomendaciones preliminares de ERG sobre los métodos para estimar las emisiones de carbono negro en América del Norte, y emitieran sus comentarios al respecto. A fin de identificar a los expertos participantes, ERG trabajó en colaboración con la CCA y miembros del comité directivo del proyecto en Canadá, Estados Unidos y México. Asimismo, con el propósito de impulsar la iniciativa y reclutar miembros para integrar el grupo de especialistas, personal de ERG presentó los resultados de la tarea 1 en el marco de la XVI conferencia de la Global Emissions Initiative (GEIA), celebrada en junio de 2014 en Boulder, Colorado, y aprovechó la oportunidad para buscar a expertos que pudieran participar.

Mediante un cuestionario en línea y comunicación de seguimiento por correo electrónico y llamadas telefónicas, se reclutó a 29 expertos en inventarios de carbono negro de entre los cinco principales sectores emisores (quema de biomasa, industrial y energético, fuentes móviles, residencial y otras fuentes) para integrar el grupo de especialistas. Con la conformación de este grupo se buscó también asegurar la representación de América del Norte, Europa y Asia, así como aportar una perspectiva sobre temas lo mismo de medición y especiación que de elaboración de inventarios. Una de las prioridades fue incorporar a usuarios finales de las directrices. Los miembros del grupo de especialistas convinieron en revisar el informe de la tarea 1 y enviar sus comentarios vía cuestionarios en línea, seminarios web o comunicados por escrito. La lista de especialistas que conformaron este grupo se muestra en el cuadro 1.3-2.

En agosto de 2014 se llevó a cabo un seminario web dirigido a todos los integrantes del grupo de especialistas, con el propósito de presentar un resumen del informe de la tarea 1 y las recomendaciones formuladas, así como para que se discutiera el proceso de revisión. Entre agosto y septiembre de 2014 se organizaron otros seminarios por Internet, cuya atención se centró en efectuar un análisis detallado sobre cada uno de los sectores principales. Si bien se invitó a todos los miembros del grupo a participar en cada uno de estos seminarios, la intención fue reunir comentarios de aquellos que hubieran indicado tener experiencia en el área temática a tratar en concreto. Asimismo, se llevó a cabo una reunión en la Ciudad de México en octubre de 2014 con el objetivo de poner atención especial en las iniciativas de México orientadas a generar inventarios de emisiones de carbono negro, y también para recibir comentarios en torno a las recomendaciones preliminares emanadas de la tarea 1 de los miembros mexicanos y del INECC del grupo de especialistas. Esta reunión estuvo presidida por Verónica Garibay Bravo, del equipo de ERG, y Luis Conde, del INECC.

A fin de motivar la conversación en torno a los temas principales y reunir comentarios y sugerencias que pudieran aplicarse en la revisión de las recomendaciones preliminares sobre los métodos para estimar emisiones de carbono negro, previo a la realización de cada reunión ERG envió a todos los expertos un cuestionario con varias preguntas, que se enumeran a continuación:

- En la revisión documental, ¿se omitió algún estudio clave que debiera considerarse para determinar los métodos o fuentes de datos para la producción de inventarios? Si su respuesta es “sí”, anote qué otros estudios incluiría.
- ¿Está de acuerdo en que el método de nivel 3 recomendado en el informe de la tarea 1 representa, en términos de metodología, una “práctica óptima” para el cálculo de emisiones de carbono negro? Si su respuesta es “no”, explique por qué.
- ¿Reflejan los métodos de niveles 1 y 2 alternativas razonables y pragmáticas a la práctica óptima? Si su respuesta es “no”, explique por qué.
- ¿Le preocupa la cuestión de la disponibilidad de información en relación con la aplicación de los métodos propuestos en Canadá, Estados Unidos y México? Si su respuesta es “sí”, explique por qué.

En noviembre de 2014 se llevó a cabo un seminario por Internet para presentar la versión preliminar del informe de la tarea 2 y revisar los comentarios recibidos a lo largo de los seminarios web realizados para los distintos sectores, las respuestas a estos comentarios y las recomendaciones finales del equipo de ERG. En ese momento se recibieron algunos comentarios más del grupo de especialistas, mismos que, junto con las recomendaciones actualizadas, se incorporaron al informe final, presentado a la CCA en diciembre de 2014, con el título *Summary of Expert Panel Comments, and Changes to Initial Emission Estimation Recommendations* [Resumen de los comentarios del grupo de expertos y cambios a las recomendaciones preliminares para la estimación de emisiones]. Los puntos a destacar son los siguientes:

- En general, los revisores estuvieron de acuerdo con los métodos recomendados para la producción de inventarios.
- Los revisores subrayaron las incertidumbres en los inventarios de emisiones y los factores de especiación, y solicitaron que este punto se abordara en las directrices.
- Se identificaron nuevos estudios, a someter a la revisión de ERG, sobre todo aquellos relacionados con la quema de biomasa. Por cuanto a México, la profunda actualización del INEM y las tareas de integración de inventarios de carbono negro a cargo del INECC se tradujeron en ajustes significativos de las recomendaciones formuladas para este país.
- La quema de desechos sólidos se agregó como uno de los subsectores incluidos en la categoría de “otras fuentes”.

Las directrices que se presentan en este documento incorporan las recomendaciones formuladas por el grupo de especialistas.

**Cuadro 1.3-2. Expertos en métodos para estimar las emisiones de carbono negro**

Nombre	Empleador u organización	Área de especialidad
José Andrés Aguilar	INECC (México)	Fuentes móviles
Michelle Bergin	Universidad Duke (Estados Unidos)	Fuentes móviles y transporte ferroviario
Steigvile Bycenkiene	Centro para Ciencias Físicas y Tecnología ( <i>Center for Physical Sciences and Technology</i> ) (Lituania)	Fuentes móviles
Beatriz Cárdenas	Comisión Ambiental de la Megalópolis (México)	Biomasa, otras fuentes
Santa Centeno	INECC (México)	Industrial y energético
Serena Chung	Universidad Estatal de Washington (Estados Unidos)	Biomasa
Jason Blake Cohen	Universidad Nacional de Singapur (Singapur)	Biomasa, otras fuentes
John Crouch	Hearth, Patio and Barbeque Association (Estados Unidos)	Residencial, otras fuentes
Xóchitl Cruz Núñez	UNAM (México)	Biomasa, fuentes móviles, otras fuentes
Nancy French	Instituto de Investigaciones Tecnológicas de Michigan ( <i>Michigan Tech Research Institute</i> ) (Estados Unidos)	Biomasa
Savitri Garivait	JGSEE-KMUTT (Tailandia)	Biomasa
Wei-Min Hao	Servicio Forestal ( <i>Forest Service</i> ) de Estados Unidos	Biomasa, otras fuentes
Brooke L. Hemming	ORD, EPA (Estados Unidos)	Biomasa, base de datos SPECIATE
Min Huang	Caltech-JPL (Estados Unidos)	Biomasa, fuentes móviles, industrial y energético, residencial
Edward Hyer	Laboratorio de Investigación Naval ( <i>Naval Research Laboratory</i> ) de Estados Unidos	Biomasa
Carolina Inclán	INECC (México)	Biomasa, otras fuentes
Jim Jetter	ORD, EPA (Estados Unidos)	Biomasa, residencial
Matthew Johnson	Universidad de Carleton (Canadá)	Industrial y energético
Karin Kindbom	Instituto Sueco de Investigación Ambiental ( <i>IVL Swedish Environmental Research Institute</i> ) (Suecia)	Biomasa, residencial
Jessica McCarty	Instituto de Investigaciones Tecnológicas de Michigan ( <i>Michigan Tech Research Institute</i> ) (Estados Unidos)	Biomasa
Luisa Molina	Centro Molina para Estudios Estratégicos sobre Energía y Medio Ambiente (México)	Todos los sectores
Abraham Ortínez	INECC (México)	Biomasa, otras fuentes



Nombre	Empleador u organización	Área de especialidad
Sean Raffuse	Sonoma Technology, Inc. (Estados Unidos)	Biomasa
Vankatesh Rao	OAR, EPA (Estados Unidos)	Biomasa, industrial y energético, residencial, otras fuentes
Luis Gerardo Ruiz Suárez	UNAM (México)	Residencial
Joshua Schwarz	CIRES-NOAA (Estados Unidos)	Medición y caracterización
Peter Sheldon	Centro Mundial de Monitoreo de Incendios ( <i>Global Fire Monitoring Center</i> ) (Alemania)	Biomasa, otras fuentes
Darrell Sonntag	OAR, EPA (Estados Unidos)	Fuentes móviles, especiación de partículas suspendidas
Don Stedman	Universidad de Denver (Estados Unidos)	Fuentes móviles
Carlo Trozzi	Techne Consulting (Italia)	Biomasa, fuentes móviles, industrial y energético, residencial
Fang Yan	Laboratorio Nacional de Argonne ( <i>Argonne National Laboratory</i> ) (Estados Unidos)	Fuentes móviles, industrial y energético
Bob Yokelson	Universidad de Montana (Estados Unidos)	Biomasa, residencial, otras fuentes

CIRES-NOAA = Instituto Cooperativo para la Investigación en Ciencias Ambientales (*Cooperative Institute for Research and Environmental Sciences*) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) de Estados Unidos

EPA = Agencia de Protección Ambiental (*Environmental Protection Agency*) de Estados Unidos

INECC = Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (México)

JGSEE-KMUTT = Escuela Universitaria Conjunta de Energía y Medio Ambiente (*Joint Graduate School of Energy and the Environment*)-Universidad de Tecnología Thonburi del Rey Mongkut (*King Mongkut's University of Technology Thonburi*)

JPL = Laboratorio de Propulsión a Chorro (*Jet Propulsion Laboratory*) del Instituto de Tecnología de California (*California Institute of Technology, Caltech*)

OAR = Oficina sobre Calidad del Aire y Radiación (*Office of Air and Radiation*) de Estados Unidos

ORD = Oficina de Investigación y Desarrollo (*Office of Research and Development*) de Estados Unidos

SPECIATE = base de datos de la EPA que reúne perfiles de fuentes de contaminación atmosférica (materia particulada, compuestos orgánicos volátiles y otros gases)

UNAM = Universidad Nacional Autónoma de México



## 2 Uso de las directrices para la estimación de emisiones de carbono negro

Resultado de un análisis exhaustivo realizado como parte de la tarea 1 del proyecto y de consultas entre especialistas en el marco de la tarea 2, las presentes directrices se elaboraron conforme a principios básicos establecidos en el curso de la revisión y evaluación de métodos disponibles para la generación de inventarios. A lo largo de este proceso, el equipo de ERG hizo algunas observaciones generales que ayudaron a formar juicios iniciales sobre el alcance, la forma y el enfoque de las directrices para la producción de inventarios de emisiones de carbono negro para América del Norte:

- Las directrices para la generación de inventarios de emisiones de CN se centrarán en inventarios de emisiones de materia particulada, puesto que la elaboración de estos últimos constituye un proceso permanente en los tres países de América del Norte. La metodología utilizada para la creación de inventarios de carbono negro mediante la especiación de emisiones de partículas de materia fina constituye la norma mundial para prácticamente todos los sectores; sin embargo, como se señala en este apartado, en la práctica actual normalmente se han utilizado sustitutos para el CN, como el carbono elemental (CE), debido a las limitaciones en términos de medición. Esta cuestión ha de tomarse en consideración al integrar inventarios de emisiones de CN.
- Los minuciosos análisis llevados a cabo confirman que el método común a todos los sectores para la generación de inventarios de emisiones de CN, lo mismo en los países de América del Norte que en Europa, sigue el enfoque general de microescala (*bottom-up*) por el que un inventario se integra a partir de información detallada. La siguiente ecuación es una síntesis general de la metodología empleada en todas las fuentes documentales sobre inventarios que se examinaron en el marco de la tarea 1:

$$\text{Emisiones}_{\text{CN}} = \text{factor de emisión}_{\text{PM}} \times \text{actividad (o sustituto)} \times \text{factor de especiación}_{\text{CN}}$$

- Los datos sobre emisiones que normalmente se obtienen de modelos o estudios publicados es objeto de un intercambio más expedito entre los países, que da cuenta de controles y factores específicos por país. Los datos de actividad tienden a ser específicos por país y generalmente se obtienen de información reunida o compilada por los gobiernos, ajena a las dependencias responsables de la producción de inventarios de emisiones. Un elemento de suma utilidad de las directrices consiste en identificar factores de emisión correspondientes a las prácticas óptimas para cada sector individual, a fin de permitir a los responsables de la generación de inventarios centrar los recursos en la recopilación de datos de actividad específicos por país.
- A escala sectorial, las directrices para la creación de inventarios de emisiones de CN en América del Norte habrán de centrarse en la identificación de métodos y fuentes de datos que constituyan las prácticas óptimas, así como en determinar las desviaciones respecto de las prácticas óptimas en cada país y formular recomendaciones a corto y no a largo plazo para optimizar los inventarios.

Estas observaciones derivaron en la formulación de recomendaciones preliminares sobre la redacción de directrices para la producción de inventarios de emisiones de CN a partir de la adaptación para América del Norte de la metodología “por niveles” utilizada por el IPCC y definida en la guía del EMEP-AEMA, con énfasis en las emisiones de partículas de materia fina subyacentes como base (IPCC, 2006). En los documentos de orientación del IPCC y el EMEP-AEMA, la producción de inventarios de emisiones se presenta por sectores principales, y se abordan la metodología global, los factores de emisión, las fuentes de actividad y las fuentes de datos de especiación. La forma en que los expertos de cada país puedan utilizar estas directrices por niveles dependerá del propósito del inventario, así como de la información con que cuenten para su elaboración. Otros elementos importantes a considerar en la producción de un

inventario de carbono negro son la definición del CN y la función de la especiación. En los siguientes apartados se resume el esquema por niveles y se analizan los puntos a considerar señalados.

## 2.1 Esquema por niveles

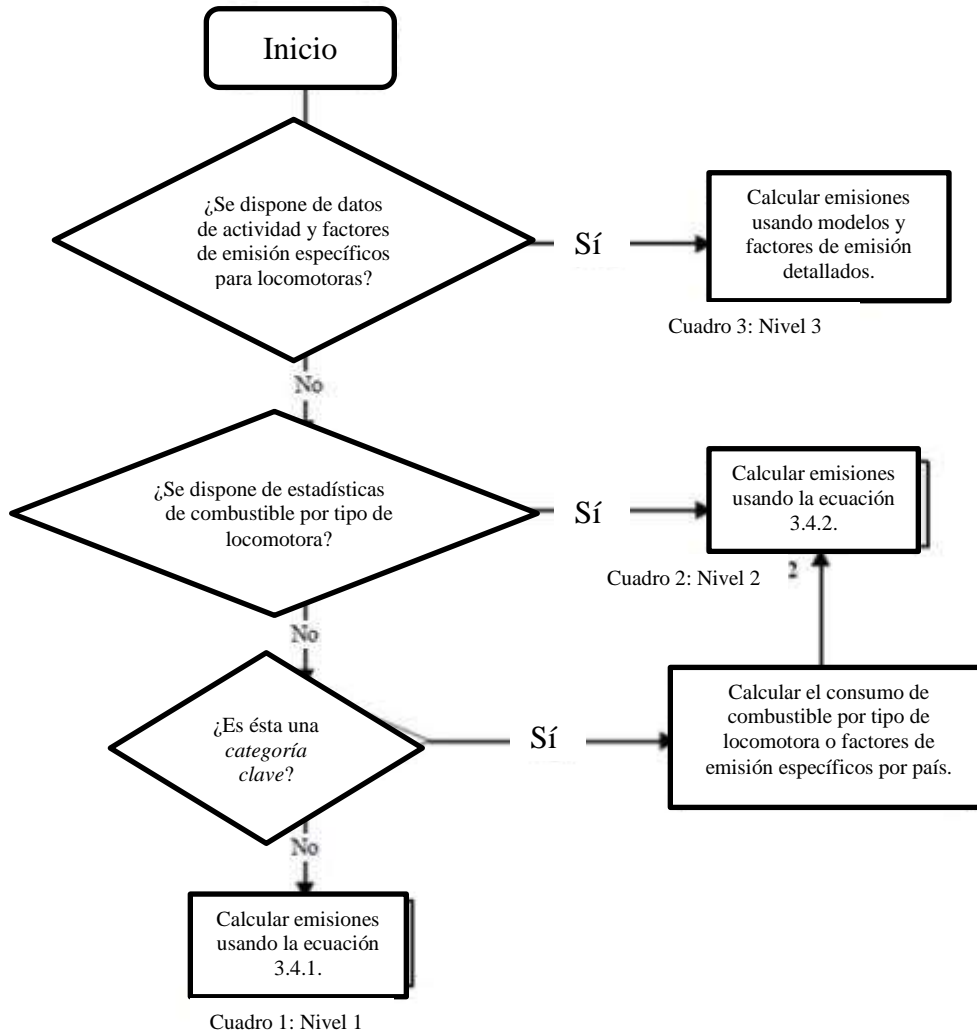
Con base en el análisis metodológico efectuado como parte de la tarea 1, el equipo de ERG concluyó que el modelo general de orientación establecido en términos de las directrices del IPCC, y detallado y ampliado en la guía EMEP-AEMA, supone un método adecuado también para la formulación de directrices de América del Norte. La guía EMEP-AEMA adopta la metodología utilizada por el IPCC y la amplía para cubrir tanto partículas suspendidas como carbono negro, por lo que en el presente informe se hará referencia a esta guía como documento primario con fines de comparación. Para cada sector, la guía EMEP-AEMA plantea múltiples niveles metodológicos, de manera que los responsables de la producción de inventarios tengan de dónde elegir al momento de compilar un inventario. Estos niveles se diferencian, por lo general, de acuerdo con el grado de agregación de los datos de actividad de que se disponga para el análisis. Con fines de uniformidad, en la guía EMEP-AEMA, los factores de emisión en todos los niveles a menudo corresponden a la misma fuente, aunque se agregan para cada nivel en función del nivel de agregación de los datos de actividad. Por ello, el enfoque se presenta en forma de un árbol de decisión, lo que dirige al creador del inventario hacia un nivel en particular, de lo global a lo más específico, con base en el grado de detalle de la información disponible. Según la guía EMEP-AEMA, para algunos sectores emisores definidos como categorías clave, únicamente podrán utilizarse los niveles 2 o 3, lo cual también se refleja en el árbol de decisión.

En la gráfica 2.1-1 se ilustra un ejemplo de árbol de decisión para locomotoras tomado de la guía EMEP-AEMA. En este caso, el nivel más elevado —es decir, el nivel 3— entraña los datos de actividad más detallados, la actividad y el factor de emisión específicos para locomotoras. Si no se cuenta con estos datos, entonces se examina la información para el siguiente nivel —el 2—, que se define por el consumo de combustible, por tipo de locomotora. Y, nuevamente, si no se dispone de estos datos, entonces el inventario se genera siguiendo el método de nivel 1, que se basa en un solo cálculo del consumo de combustible correspondiente a locomotoras en el país.

Aunque no todos los árboles de decisión se presentan en estas directrices, el enfoque es implícito en los métodos de nivel 1, 2 y 3 que se describen para cada sector. La decisión respecto de qué nivel debe aplicarse dependerá siempre de la disponibilidad de información para producir el inventario, y el uso que se pretenda darle. Este punto se analiza a fondo en el apartado 2.3.

El proceso de decisión descrito a detalle en la guía EMEP-AEMA puede aplicarse también a las directrices para América del Norte; sin embargo, se detectaron algunas diferencias metodológicas respecto de la guía europea al momento de determinar los niveles para Canadá, Estados Unidos y México. Si bien la guía EMEP-AEMA tiene por objetivo definir un conjunto de factores de emisión compatible y aplicable en todos los países de la Unión Europea (UE), en el caso de América del Norte las presentes directrices reflejan factores de emisión distintos para cada país, según convenga.

Gráfica 2.1-1. Ejemplo de árbol de decisión para locomotoras



Fuente: EMEP-AEMA, 2013.

## 2.2 Comprensión de las limitaciones en la estimación de emisiones de carbono negro

Antes de emprender la producción de un inventario de emisiones de carbono negro, es importante que los responsables de hacerlo comprendan las limitaciones que el cálculo de emisiones de CN guarda actualmente como práctica. Una de las mayores limitaciones estriba en que los inventarios de contaminantes atmosféricos se centran en las emisiones en masa, mientras que el carbono negro se define en función de sus propiedades ópticas, y las mediciones de las emisiones subyacentes y los factores de especiación no permiten una cuantificación completa de estas propiedades ópticas. Otra limitación es que los factores de especiación a posteriori no concuerdan con el nivel de detalle de los factores de emisión de partículas de materia fina para muchos de los sectores, lo que incorpora aún más errores en el proceso. Estos puntos se abordan en los apartados a continuación.

### 2.2.1 Definición de carbono negro

Lo que se entiende por “carbono negro” varía en los diversos trabajos de investigación y en la práctica de su medición. La definición que se le da al elemento también depende de si el análisis de CN se centra en factores de cambio climático o en aspectos de salud como resultado. Desde el punto de vista de los factores de cambio climático, el término carbono negro puede emplearse para hacer referencia al indicador más genérico de “carbono fotoabsorbente”, que comprende tanto el carbono elemental (CE) como el orgánico (CO) (también llamado, “carbono café”), ambos absorbentes de luz. Desde una perspectiva de salud, el carbono negro se ha definido en general sólo como la masa de carbono elemental (es decir, el componente de grafito) de las partículas suspendidas. Así, el CN puede referirse a la masa de CE únicamente o bien al carbono fotoabsorbente, definido en términos ópticos más amplios.

Para agravar esta falta de uniformidad, existen limitaciones en la metodología para medir tanto el carbono elemental como el fotoabsorbente. Con mediciones fotoacústicas es posible estimar las propiedades ópticas del carbono fotoabsorbente, pero la caracterización de su masa presenta limitaciones por la dificultad que entraña la conversión de estas propiedades ópticas en masa, dadas las variaciones en el tamaño de las partículas, su concentración, forma, edad y composición. La masa de CE, por otro lado, se mide utilizando métodos termoópticos que, en el proceso, eliminan el carbono orgánico. Se ha demostrado que la correlación entre la masa de carbono elemental estimada mediante el método termoóptico y la masa de carbono negro estimada a partir de mediciones fotoacústicas es adecuada para las fuentes donde el CE predomina en el total de partículas suspendidas, como sucede en los motores a diésel. Sin embargo, esta correlación no es conveniente para fuentes de emisiones con una elevada fracción de CO, como los incendios forestales naturales y los motores a gasolina (Hemming y Sonntag, 2015).

A la fecha, los estudios realizados en materia de inventarios de carbono negro —por ejemplo, el *Informe al Congreso sobre el carbono negro (Report to Congress on Black Carbon)*, EPA, 2013a— han mostrado una tendencia a utilizar un método basado en la medición del carbono elemental, al haber más información disponible para la masa de carbono elemental que para el carbono fotoabsorbente. Puesto que no se cubre la totalidad del carbono fotoabsorbente, se ha reconocido al CE como elemento representativo del carbono negro en tanto no se disponga de métodos de medición y datos más precisos. No obstante, como se señaló ya, el carbono elemental utilizado como elemento representativo del carbono fotoabsorbente constituye un sustituto deficiente para las fuentes con un contenido elevado de carbono orgánico, como los incendios forestales naturales.

Estas directrices están concebidas teniendo presente el factor flexibilidad: las ecuaciones aquí presentadas pueden aplicarse a un factor de especiación basado lo mismo en carbono elemental que en carbono fotoabsorbente. Sin embargo, las técnicas en vigor —principalmente las aplicadas en la base de datos SPECIATE de la EPA (EPA, 2011b)— son las que dictan, en última instancia, los factores de especiación que se recomienda utilizar. Esta base de datos se centra actualmente en la masa de CE, por tratarse de la práctica común. La EPA espera actualizar la base de datos SPECIATE de manera que incluya datos y factores de conversión que permitan calcular las emisiones de carbono fotoabsorbente, cuando se disponga de la información pertinente, lo que brindaría a los creadores de inventarios más opciones a utilizar en los factores de especiación, dependiendo del objetivo que persiga el inventario. Actualmente, SPECIATE se conforma a partir de información obtenida de documentos publicados. La EPA ha propuesto actualizar la base de datos con miras a incluir factores de emisión de CN con base en sus caracterizaciones alternativas más recientes —mediciones fotoacústicas, ópticas y de incandescencia inducida por láser—, así como ampliar el alcance de los factores de especiación de carbono negro y otros elementos para incluir una mayor diversidad de fuentes de emisión. El grado de expansión y optimización de la base de datos dependerá de los recursos disponibles y de la participación activa de la comunidad investigadora en el mejoramiento de las estimaciones de las emisiones de carbono negro.

## 2.2.2 Incertidumbre en la especiación

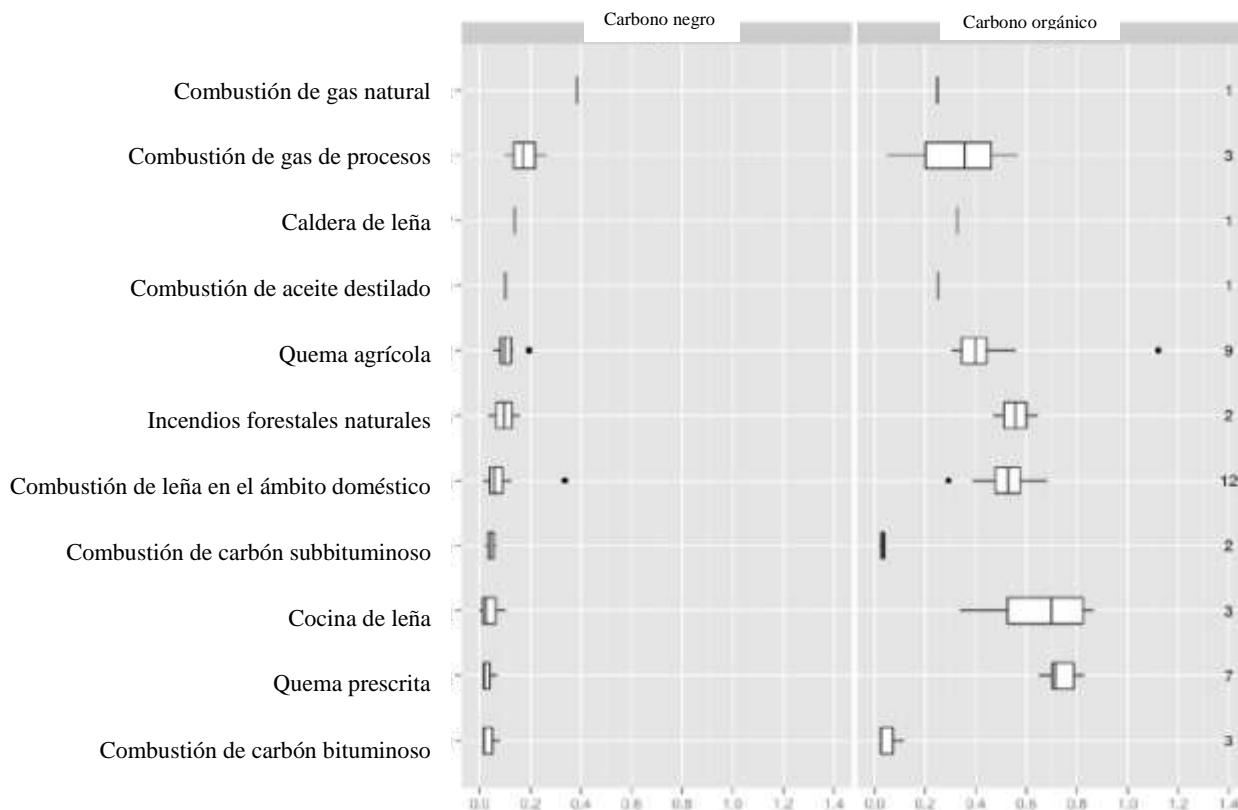
Además de entender la definición del carbono negro, los responsables de la elaboración de inventarios deben comprender en qué forma el proceso de especiación mismo incorpora incertidumbres en los inventarios de CN. Los de carbono negro son únicos entre los inventarios de emisiones de contaminantes atmosféricos, en el sentido de que el estado de práctica en vigor consiste en calcular las emisiones de totales de materia particulada —un superconjunto del CN— y luego aplicar a posteriori fracciones, conocidas como factores de especiación, para calcular las emisiones de CN. Ello obedece a que la medición directa del CN no constituye una práctica común (la normativa en vigor no lo estipula), y se requiere equipo especializado o análisis posteriores a las mediciones que no son un estándar en los sistemas de medición de partículas de materia fina ni en los programas de investigación en la materia. Los factores de especiación del CN se derivan de programas de investigación que aportan esta información, los cuales tienden a reflejar muestras más reducidas y condiciones de experimentación más limitadas que los programas para determinar los factores de emisión de las partículas de materia fina subyacentes. Esto significa que los factores de especiación, por lo general, no guardan absoluta consonancia con los inventarios de partículas suspendidas subyacentes, lo que genera una nueva fuente de errores y aumenta la incertidumbre de los inventarios.

La fracción que el carbono negro representa respecto del total de partículas suspendidas varía enormemente de una categoría de fuente a otra. La mayor fracción de CN corresponde a fuentes móviles que utilizan diésel como combustible, y en este caso el carbono elemental es un buen sustituto del CN para los cálculos de emisiones. De acuerdo con el informe de la EPA 2013a, el carbono elemental constituye cerca de 75 por ciento de las partículas de materia fina emitidas directamente por camiones de carga pesada a diésel. Esta fracción se reduce considerablemente en el caso de los vehículos equipados con filtros de partículas diésel, que eliminan gran parte del carbono negro producido por el motor. Tratándose de fuentes no móviles, el rango de los factores de especiación de todas las fuentes, y al interior de cada fuente, se muestra en los cálculos utilizados en el informe 2013a de la EPA (véase la gráfica 2.2-1).

Como se observa en la gráfica, la fracción de CN para fuentes no móviles es inferior a 0.4, lo que significa que el contenido de carbono negro en el total de partículas suspendidas es de menos de 40 por ciento. En esta gráfica, las cajas representan el intervalo entre los percentiles 25 y 75; las líneas horizontales, los percentiles 10 y 90. El rango de los factores de especiación muestra la incertidumbre inherente a la metodología basada en la especiación, lo que se exagera por la cantidad limitada de perfiles de especiación de que se dispone. Para el inventario de emisiones de CN en Estados Unidos, aproximadamente 300 factores obtenidos de la base de datos SPECIATE se aplicaron a unas 3,400 categorías de fuentes. SPECIATE es el centro de información de la EPA sobre perfiles de especiación para gases orgánicos volátiles y partículas suspendidas de fuentes de contaminación atmosférica. Entre las numerosas aplicaciones de los datos de especiación, estos perfiles de fuentes de emisión se emplean para crear inventarios de emisiones sometidas a especiación para la modelización a escala regional de niebla, partículas suspendidas, cambio climático y calidad fotoquímica del aire, así como de carbono negro.

A pesar de ser un elemento indispensable en esta fase de la elaboración del inventario de emisiones de CN, el proceso de especiación añade una elevada incertidumbre a los cálculos, como se analiza en el capítulo 4 de las directrices. Por esta razón, se consideró recurrir a una medición generalizada más precisa del carbono fotoabsorbente para la estimación de inventarios sin que la especiación fuera el objetivo prioritario de la investigación a largo plazo.

**Gráfica 2.2-1. Fracciones de carbono negro y orgánico en emisiones de PM<sub>2.5</sub> para las categorías de fuentes no móviles que registran las mayores emisiones de carbono negro en Estados Unidos**



Fuente: EPA, 2013a.

Nota: Las cajas representan el intervalo entre los percentiles 25 y 75; las líneas horizontales, los percentiles 10 y 90. Las líneas verticales dentro de las cajas representan los valores de la mediana para esa categoría de fuentes; los puntos, los valores atípicos.

### 2.3 Casos de uso para inventarios

Para elaborar un inventario de emisiones de carbono negro —y de cualquier otro contaminante—, debe tomarse en cuenta el propósito que se persigue. Los elementos fundamentales en cuanto a alcance de un inventario —por ejemplo: horizonte cronológico, área geográfica, resolución temporal y nivel de detalle de los sectores fuente— deben considerar el grado de detalle que requieren sus usuarios finales. Un inventario puede tener numerosas aplicaciones, a las que se denomina “casos de uso” (por ejemplo, de lo nacional a lo regional, estimaciones en retrospectiva o proyecciones futuras, agregaciones generales o estimaciones detalladas por sector). Las presentes directrices se elaboraron con el propósito de ofrecer una gama de opciones, de modo que los expertos puedan evaluar el alcance y grado de detalle necesarios del inventario final. En ocasiones la utilización deseada para el inventario no respaldará el nivel de detalle de la información disponible; es decir, puede ser que los inventarios de emisiones agregadas no sean suficientes, dependiendo del caso de uso. El nivel adecuado se determinará en función del alcance y grado de detalle tanto de la información disponible como de la que se requiere, según el uso que pretenda dársele.

Los principales casos de uso de los inventarios de CN, junto con algunas consideraciones pertinentes para la aplicación de las presentes directrices, se abordan en los apartados siguientes.

### **2.3.1 Necesidad de resolución espacial y temporal**

Partiendo de un referente de emisiones totales nacionales o anuales, el grado de detalle de la información espacial o temporal que se requiera dependerá de la utilización prevista para el inventario, y también de la posibilidad —o no— de optimizar los totales agregados mediante una cuantificación más pormenorizada, aplicando una metodología de microescala. Los inventarios cuya finalidad sea el registro nacional, la cuantificación a escala regional o los análisis con fines de mitigación no siempre requerirán una resolución espacial y temporal detallada. En cuanto a los inventarios que se emplean para evaluar los efectos del cambio climático, éstos precisan una resolución más detallada, puesto que el lugar de las emisiones representa un factor de suma importancia para evaluar estos efectos. La información espacial y temporal detallada puede mejorar los totales agregados de algunos sectores.

En los casos en que los inventarios de carbono negro se basan en los disponibles para partículas suspendidas, el nivel de detalle en términos espaciales y temporales se verá limitado por cuanto se haya hecho para integrar el inventario de partículas suspendidas; de ahí que los inventarios de CN no serán más detallados que los inventarios de partículas suspendidas subyacentes. Los inventarios de partículas suspendidas que se hayan preparado adecuadamente tendrán en cuenta importantes factores espaciales y temporales como la ubicación de las fuentes en el plano regional, los cambios estacionales en la actividad y los efectos de las condiciones meteorológicas en las emisiones.

La elaboración de estas directrices busca presentar métodos que puedan aplicarse a niveles de detalle espacial y temporal diferentes. Los métodos de microescala (que parten de información detallada) son, en términos generales, “escalables”: de un análisis minucioso (por ejemplo, por región o día) pasan a una clasificación más agregada, aunque la capacidad para hacerlo dependerá del grado de detalle disponible para los datos de actividad.

### **2.3.2 Registros nacionales**

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) tiene por objetivo estabilizar las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera a un nivel que haga posible prevenir y reducir la peligrosa interferencia de origen humano con el sistema climático. La capacidad de la comunidad internacional para alcanzar este objetivo dependerá de qué tan claro sea su conocimiento de las tendencias en las emisiones de GEI, así como de la capacidad colectiva para alterar estas tendencias. Las Partes (Estados miembro) presentan a la Secretaría de la CMNUCC inventarios nacionales de emisiones antropogénicas por fuentes y remociones por sumideros de GEI que no están controlados al amparo del Protocolo de Montreal sobre Sustancias Agotadoras de la Capa de Ozono. Asimismo, en términos de la Convención, las Partes aportan en sus comunicados nacionales información resumida de sus inventarios. Estos inventarios están sujetos a un proceso de revisión técnica anual (CMNUCC, 2015).

Los inventarios nacionales de GEI, que se presentan en observancia de los requisitos previstos por la CMNUCC, son de carácter retrospectivo y periodicidad anual (de 1990 en adelante), además de corresponder a totales agregados, por sector fuente principal (energía, procesos industriales y agricultura). Los sectores se dividen en subsectores específicos (el sector energético, por ejemplo, incluye fuentes más amplias, como la producción de combustibles fósiles y el consumo de combustibles fósiles por fuentes de transporte y domésticas), con un registro del total de emisiones. Este caso de uso, por consiguiente, requiere un inventario que sea completo en el sentido de que dé cuenta de todas las fuentes de emisiones que existen dentro del territorio nacional, pero sin resolución espacial o temporal detallada. En este caso también, pueden emplearse métodos más agregados para la creación de inventarios, lo que permite que se utilicen métodos de nivel 1, 2 o 3, dependiendo de la disponibilidad de información. Aunque no es un requisito presentar ante la CMNUCC inventarios de carbono negro, las presentes directrices para la elaboración de estos inventarios servirán de apoyo a los responsables de la producción de inventarios nacionales al proporcionar métodos para todas las categorías de fuentes principales, así como métodos

alternativos, dependiendo de la información de que se disponga. Los métodos y fuentes de datos presentados en estas directrices podrán aplicarse en la esfera nacional y año con año, aunque en muchos casos la producción de un inventario que represente variaciones regionales y estacionales redundará en cálculos más precisos del inventario de emisiones, incluso si el producto final sólo se requiere en el ámbito nacional y con una periodicidad anual.

### **2.3.3 Inventarios regionales**

La producción de inventarios regionales es una tarea que asumen los gobiernos estatales y locales para evaluar la calidad del aire, así como las contribuciones, proyecciones y controles de GEI. En Estados Unidos, las disposiciones reglamentarias para los contaminantes de criterio (por ejemplo, los Planes Estatales de Instrumentación que se requieren para mostrar observancia de las Normas Nacionales de Calidad del Aire [*National Ambient Air Quality Standards, NAAQS*]) o la información de entrada necesaria para la modelización de la calidad del aire determinarán el grado de detalle, los métodos y los factores de emisión a utilizar. Dado que los métodos para producir inventarios locales de carbono negro no están estandarizados —aunque los inventarios de partículas suspendidas en uso que normalmente servirán de base para generar inventarios de CN podrían haberse elaborado conforme a esos requisitos—, el grado de detalle y la amplitud de los inventarios regionales de CN dependen de sus objetivos y aplicaciones concretas (por ejemplo, para formulación de reglamentos en materia de cambio climático o análisis para su modelización). Los inventarios regionales de gases de efecto invernadero generalmente se elaboran con fines de planeación: para entender emisiones actuales, generar proyecciones con base en la extrapolación de las tasas actuales y evaluar los efectos de la adopción de distintas estrategias de mitigación. El inventario puede no incluir todos los sectores fuente, si la región no incluye dichas fuentes. La disponibilidad de datos de actividad para sustentar determinados sectores y niveles puede estar más restringida que para los inventarios nacionales, salvo que los responsables de generar el inventario tengan acceso a estudios de la actividad por región específica. Para estos análisis pueden emplearse métodos de niveles 1, 2 o 3, dependiendo de la información con que se cuente y el uso que vaya a darse al inventario. Si se busca utilizar un inventario regional con fines de análisis de medidas de mitigación, por lo general se requiere un nivel de detalle tres (véase el apartado 2.3.5).

### **2.3.4 Análisis de impacto**

Se han estudiado las repercusiones de las emisiones de carbono negro en el cambio climático mediante la aplicación de información sobre este tipo de emisiones en modelos de cambio climático en los que se evalúan agentes de radiación, el albedo de la nieve o hielo y otros factores. En este tipo de análisis, los detalles temporales, espaciales y de composición de los inventarios son de suma importancia para determinar los impactos. Esto es particularmente cierto en lo que toca al impacto del CN en la región del Ártico, donde las variaciones estacionales en las emisiones y el transporte de aquellas que proceden de fuera de la región influyen en los agentes de radiación y los efectos del albedo (Consejo del Ártico, 2011). Para fines de análisis de impacto, es posible que se requieran inventarios de emisiones más detallados producidos con métodos de nivel tres.

### **2.3.5 Análisis de estrategias de mitigación**

En el caso de los análisis de estrategias de mitigación, es preciso que los inventarios de emisiones tengan un grado de detalle equivalente al grado de especificidad de los controles o medidas de mitigación objeto de evaluación. En general, esto significa que para algunas fuentes estos análisis requerirán inventarios de nivel 3. Por ejemplo, para analizar los efectos de la aplicación de controles o medidas de mitigación específicos en fuentes fijas pueden requerirse datos sobre emisiones a escala de los procesos. Con el fin de evaluar el impacto de la conversión de vehículos a diésel es necesario calcular tanto el número de vehículos que habrán de someterse a la conversión como su antigüedad. En ambos ejemplos, el nivel de detalle



requerido se obtiene sólo con un método de nivel 3. Aplicar métodos de nivel 2 será conveniente siempre y cuando la estrategia de mitigación pueda analizarse en el nivel de agregación especificado para la actividad y los factores de emisión del sector afectado.

### **2.3.6 Aplicación de niveles a los casos de uso de inventarios**

El cuadro 2.3-1 muestra el nivel de detalle que requiere el inventario de emisiones producido para los casos generales de uso que se analizan en el apartado 2.3.

**Cuadro 2.3-1. Niveles aplicables para los casos generales de uso**

<b>Nivel</b>	<b>Registro nacional</b>	<b>Inventarios regionales</b>	<b>Análisis de impacto</b>	<b>Análisis de estrategias de mitigación</b>
1	✓	✓		
2	✓	✓		✓
3		✓	✓	✓

### **3 Métodos para estimar las emisiones de carbono de sectores específicos**

Este capítulo presenta métodos para la estimación de emisiones de carbono negro por sector y nivel. Un método de nivel 1 consiste generalmente en información sobre combustibles u otros datos de actividad agregados a escala nacional que se utilizan junto con factores de emisión de  $PM_{2.5}$  y factores de especiación de CN. Aunque el nivel 2 es similar al nivel 1, los datos de actividad y factores de emisión se clasifican por tipo de tecnología. Los métodos de nivel 3, siempre que se disponga de ellos, se consideran, en términos generales, los más precisos, y se basan en un grado de detalle mucho más minucioso que el empleado en los niveles 1 o 2. Pese a las similitudes que aparentemente guardan los métodos de nivel 2 y 3, estos últimos utilizan datos de actividad más específicos (por ejemplo, carga de combustible por cosecha específica, tasas de emisiones modelizadas y consumo de combustible por tecnología específica).

La mayor parte de los métodos se basa en cálculos de emisiones de  $PM_{2.5}$  que, al utilizar un factor de especiación, se convierten en emisiones de CN. En la mayoría de los casos, la fuente recomendada de factores de especiación es la base de datos SPECIATE de la EPA (EPA, 2011b). Como se señala en el apartado 2.2, SPECIATE no contiene factores para convertir directamente  $PM_{2.5}$  en carbono fotoabsorbente; los factores más bien permiten convertir  $PM_{2.5}$  en carbono elemental. La EPA está considerando poner al día la base de datos SPECIATE de modo que incluya factores para calcular el carbono fotoabsorbente también, y las ecuaciones presentadas a lo largo del presente capítulo de las directrices se formularon para permitir el empleo de cualquier método, dependiendo de las necesidades del encargado de realizar el inventario.

Los métodos presentados, por sector, para cada nivel, comprenden también información sobre las posibles fuentes de datos de actividad, así como factores de emisión y factores de especiación. Sin ser exhaustiva, esta información pretende dirigir a los usuarios hacia los recursos que resultaría conveniente utilizar para su área. Al igual que con cualquier iniciativa para elaborar inventarios de emisiones, el responsable de esta tarea deberá procurar usar la información más confiable, vigente y precisa posible, a fin de realmente alcanzar los objetivos del inventario a integrar, lo mismo si se trata de realizar estimaciones “de orden o magnitud”, concebir un plan de calidad del aire, aplicar en un modelo de calidad del aire o cualquier otra finalidad.

Los factores de emisión y de especiación recomendados para los métodos de nivel 1 se presentan, en una serie de cuadros por sector fuente, en el apéndice B. Si bien el nivel de detalle necesario impidió hacer lo mismo para los niveles 2 y 3, en los apartados que conforman el presente capítulo se proporcionan detalles y referencias claras al respecto.

#### **3.1 Quema de biomasa**

La quema de biomasa comprende incendios no provocados, incendios forestales y quema prescrita —categorías que generalmente se agrupan con el término “quema a cielo abierto”—, así como la quema de residuos agrícolas. Es importante observar que en América del Norte, la quema de madera y desechos vegetales constituye una fuente importante de emisiones de carbono negro. Nada más en Estados Unidos, la quema de biomasa es responsable de aproximadamente 35 por ciento de estas emisiones, mientras que, a escala mundial, dos terceras partes del total de emisiones de CN provienen de la quema de biomasa y de fuentes domésticas (EPA, 2013a).

### 3.1.1 Quema a cielo abierto

#### Método de nivel 1

Un método de nivel 1 para calcular las emisiones de la quema a cielo abierto consta de un solo factor de emisión por unidad de superficie, superficie quemada y un factor de especiación, y se basa en la siguiente ecuación:

$$E_{CN} = A \times FE_{PM_{2.5}} \times FS_{CN/PM_{2.5}}$$

Donde:

$E_{CN}$	=	emisiones de carbono negro
$A$	=	superficie quemada (por ejemplo, acres o hectáreas)
$FE_{PM_{2.5}}$	=	factor de emisión de $PM_{2.5}$ por área (por ejemplo, acres o hectáreas)
$FS_{CN/PM_{2.5}}$	=	factor de especiación para convertir $PM_{2.5}$ en carbono negro

#### Método de nivel 2

Un método de nivel 2 para estimar las emisiones generadas por la quema a cielo abierto se vale de factores de emisión con base en biomas específicos y características del combustible, y se basa en la siguiente ecuación:

$$E_{CN,k} = (0.45 \times A_k \times B_k \times a_k \times b_k) \times FE_{k,PM_{2.5}} \times FS_{k,CN/PM_{2.5}}$$

Donde:

$E_{CN,k}$	=	emisiones de carbono negro de bioma “k”
0.45	=	fracción de carbono en el combustible
$A_k$	=	superficie quemada de bioma “k”
$B_k$	=	carga de combustible (masa de combustible por superficie de bioma “k”)
$a_k$	=	fracción de biomasa superficial para bioma “k”
$b_k$	=	eficiencia de combustión (fracción de combustible quemado para bioma “k”)
$FE_{k,PM_{2.5}}$	=	factor de emisión para $PM_{2.5}$ para bioma “k” (emisiones por masa de carbono en el combustible [kg/kg-C en combustible])
$FS_{k,CN/PM_{2.5}}$	=	factor de especiación para convertir $PM_{2.5}$ en carbono negro para bioma “k”

#### Método de nivel 3

En un método de nivel 3 se emplearía la misma ecuación que para el nivel 2, aunque con factores de emisión forestales más específicos y basados en biomas, y se calcularían las emisiones con base en el tipo de quema (según se trate de combustión latente o de llama). Los datos de actividad para incendios forestales o de biomas corresponderían a la superficie quemada o combustible quemado por superficie unitaria, por tipo de bosque o bioma y combustible para corresponder con mayor precisión a los factores de emisión. De esta forma, podrían desagregarse aún más en las principales categorías climáticas y de suelos, y quizás en prácticas de manejo, con base en el entendimiento y mediciones locales. De la misma manera, para la especiación de incendios forestales y otros biomas se consideraría tanto el tipo de bioma sujeto a combustión como la variación porcentual de combustión latente y de llama (por quemas prescritas e incendios forestales naturales).

$$E_{CN,k} = (0.45 \times A_k \times B_k \times a_k \times b_k) \times (FE_{k,PM_{2.5,CL}} \times FS_{k,CN/PM_{2.5,CL}} \times fcl + FE_{k,PM_{2.5,LL}} \times FS_{k,CN/PM_{2.5,LL}} \times LL)$$

Donde:

$E_{CN,k}$	=	emisiones de carbono negro para bioma “k”
0.45	=	fracción de carbono en el combustible
$A_k$	=	superficie quemada de bioma “k”

$B_k$	=	carga de combustible (masa de combustible por superficie para bioma “k”)
$a_k$	=	fracción de biomasa superficial para bioma “k”
$b_k$	=	eficiencia de combustión (fracción de combustible quemado para bioma “k”)
$FE_{k,PM_{2.5},CL}$	=	factor de emisión para $PM_{2.5}$ para bioma “k”, combustión latente
$FE_{k,PM_{2.5},LL}$	=	factor de emisión para $PM_{2.5}$ para bioma “k”, combustión de llama (emisiones por masa de C en el combustible [kg/kg-C en el combustible])
$FS_{k,CN/PM_{2.5},CL}$	=	factor de especiación para convertir $PM_{2.5}$ en carbono negro para bioma “k”, combustión latente
$FS_{k,CN/PM_{2.5},LL}$	=	factor de especiación para convertir $PM_{2.5}$ en carbono negro para bioma “k”, combustión en llama
fcl	=	fracción de combustión en forma latente
LL	=	fracción de combustión en llama

### Posibles fuentes de datos de actividad, así como de factores de emisión y de especiación

En el cuadro 3.1-1 se muestran posibles fuentes de datos de actividad, factores de emisión y factores de especiación para la aplicación de los métodos de niveles 1, 2 y 3 a fin de calcular las emisiones de CN procedentes de la quema de biomasa a cielo abierto en América del Norte. Los factores de emisión y de especiación específicos recomendados para el nivel 1 se presentan en una serie de cuadros por sector o fuente, en el apéndice B.

**Cuadro 3.1-1. Posibles fuentes de datos de actividad, así como de factores de emisión y de especiación para quema a cielo abierto**

Parámetro	Canadá	Estados Unidos	México
<i>Nivel 1</i>			
Superficie quemada	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Randerson, 2012 (detección remota)<sup>a</sup></li> <li>• Otras fuentes, como registros de dependencias locales en Canadá: Centro Interinstitucional de Incendios Forestales de Canadá (<i>Canadian Interagency Forest Fire Centre, CIFFC</i>)</li> </ul>		Base de datos mensual, por tipo de vegetación: Comisión Nacional Forestal (Conafor)
Factor de emisión ( $PM_{2.5}$ )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Quema prescrita, sin incluir a Columbia Británica: documento AP-42 (EPA, 1995a)</li> <li>• Quema prescrita en Columbia Británica: <i>2000 Emission Inventory for the Canadian Portion of the Lower Fraser Valley Airshed</i> [Inventario de emisiones 2000 para la parte canadiense de la zona atmosférica del Bajo Valle de Fraser] (GVRD y FVRD, 2003)</li> </ul>	Documento AP-42 (EPA, 1995a)	AP-42 (EPA, 1995a)

Parámetro	Canadá	Estados Unidos	México
Factor de especiación (carbono negro)	Fracción promedio de CN: base de datos SPECIATE (véase la gráfica 2.1-1 <i>supra</i> ; se utiliza el factor de CE para CN); WRAP, 2005		Fracción promedio de CN: SPECIATE (véase la gráfica 2.1-1 <i>supra</i> ; se utiliza el factor de CE para CN)
<b>Nivel 2</b>			
Para cada bioma: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Superficie quemada</li> <li>• Carga de combustible</li> <li>• Fracción de la carga en la superficie</li> <li>• Eficiencia de combustión</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Superficie quemada: Randerson, 2012 (detección remota)<sup>a</sup> o información registrada por las dependencias locales</li> <li>• Carga de combustible y consumo por bioma: Van Leeuwen <i>et al.</i>, 2014; Akagi <i>et al.</i>, 2011; WRAP, 2005</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Superficie quemada: Conafor</li> <li>• Carga de combustible y consumo por bioma: no hay disponibles</li> <li>• Eficiencia de combustión: Akagi <i>et al.</i>, 2011</li> </ul>
Factor de emisión por bioma específico (PM <sub>2.5</sub> )	Akagi <i>et al.</i> , 2011; <sup>b</sup> May <i>et al.</i> , 2014		Akagi <i>et al.</i> , 2011; Yokelson <i>et al.</i> , 2011
Factor de especiación por bioma específico (carbono negro)	Akagi <i>et al.</i> , 2011; <sup>b</sup> May <i>et al.</i> , 2014		
<b>Nivel 3</b>			
Para cada bioma: el mismo que para el nivel 2, más el % por régimen de quema (% de combustión latente o % de combustión en llama)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Superficie quemada: Randerson, 2012 (detección remota)<sup>a</sup> complementada con información registrada por dependencias locales</li> <li>• Carga y consumo de combustible por bioma: Van Leeuwen <i>et al.</i>, 2014; Akagi <i>et al.</i>, 2011, o a juicio de expertos locales</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Superficie quemada: Conafor</li> <li>• Eficiencia de combustión: Akagi <i>et al.</i>, 2011</li> <li>• Carga y consumo de combustible por bioma: no hay datos disponibles</li> <li>• Porcentaje por régimen de quema (% de combustión latente o % de combustión en llama): no hay datos disponibles</li> </ul>
Factor de emisión por bioma y régimen de quema específicos (PM <sub>2.5</sub> )	Akagi <i>et al.</i> , 2011; <sup>b,c</sup> May <i>et al.</i> , 2014, o a juicio de expertos locales		Akagi <i>et al.</i> , 2011; <sup>b,c</sup> Yokelson <i>et al.</i> , 2011
Factor de especiación por bioma y régimen de quema específicos (CN)	Akagi <i>et al.</i> , 2011; <sup>b,c</sup> May <i>et al.</i> , 2014, o a juicio de expertos locales		

<sup>a</sup> Pueden utilizarse datos de detección remota sobre superficie quemada que provienen del sensor MODIS: instrumento espectrorradiómetro de formación de imágenes de resolución moderada (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), aunque este método podría pasar por alto incendios menores y aquellos que oculta la bóveda forestal.

<sup>b</sup> Las emisiones registradas utilizando la técnica del fotómetro de una sola partícula de hollín (SP2) pueden dar como resultado factores de emisión más altos (por un factor de 2), en comparación con los factores generados a partir de la técnica de filtros (May *et al.*, 2014). Por lo tanto, tal vez sea necesario aumentar factores de emisión anteriores obtenidos a partir del método de filtros si investigaciones ulteriores respaldan esta aseveración.

<sup>c</sup> Akagi *et al.* (2011) informan únicamente sobre factores de emisión o especiación globales promedio. No obstante, puesto que la fracción de quema que corresponde a combustión latente normalmente aumenta con el tiempo, la ecuación planteada considera por separado los factores de emisión y de especiación para referencia futura.

### 3.1.2 Quema agrícola

#### Método de nivel 1

Un método de nivel 1 para quema agrícola es el mismo que se utiliza para quema a cielo abierto, y consiste en un mismo factor de emisión por superficie unitaria, superficie quemada y factor de especiación. El método de nivel 1 se basa en la siguiente ecuación:

$$E_{CN} = R \times FE_{PM_{2.5}} \times FS_{CN/PM_{2.5}}$$

Donde:

$E_{CN}$  = emisiones de carbono negro  
 $R$  = cantidad de residuos quemados:

$$R = A \times Y \times s \times d \times p \times fC$$

Donde:

$A$  = superficie quemada  
 $Y$  = rendimiento de cosecha del cultivo (por superficie unitaria quemada)  
 $s$  = relación entre residuos y rendimiento de cosecha del cultivo  
 $d$  = contenido de materia seca del rendimiento de cosecha  
 $p$  = porción de residuos quemados  
 $fC$  = factor o eficiencia de combustión  
 $FE_{PM_{2.5}}$  = factor de emisión para  $PM_{2.5}$  por masa de combustible  
 $FS_{CN/PM_{2.5}}$  = factor de especiación para convertir  $PM_{2.5}$  en carbono negro

Se asume la utilización de valores promedio para todas las variables excepto en “A”. Es preciso cuantificar la masa de cualquier residuo removido y utilizado para otras actividades, lo que deberá restarse de la cantidad de residuos (“R”) calculados. El capítulo 2.4 de la *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero* sirve de base para calcular los valores Y y fC para trigo, maíz y arroz (se asume que  $d = 0.85$ ) (IPCC, 2006). Factores de especiación promedio para carbono negro se emplean para incendios agrícolas (0.075) (WRAP, 2005).

#### Método de nivel 2

En un método de nivel 2 para quema agrícola se emplean factores de emisión por cultivo específico y características del combustible, utilizando la misma ecuación que para el nivel 1 (aunque se distingue cada factor con información por cultivo específico):

$$E_{CN,c} = R_c \times FE_{c,PM_{2.5}} \times FS_{c,CN/PM_{2.5}}$$

Donde:

$E_{CN,c}$  = emisiones de carbono negro para cosecha “c”  
 $R_c$  = cantidad de residuos quemados para cosecha “c”:

$$R_c = A_c \times Y_c \times s_c \times d_c \times p_c \times fC_c$$

Donde:

$A_c$  = superficie quemada para cosecha “c”  
 $Y_c$  = rendimiento de cosecha del cultivo para cosecha “c” (por superficie unitaria quemada)  
 $s_c$  = relación entre residuos y rendimiento de cosecha del cultivo para cosecha “c”  
 $d_c$  = contenido de materia seca del rendimiento para cosecha “c”  
 $p_c$  = porción de residuos quemados para cosecha “c”  
 $fC_c$  = factor o eficiencia de combustión para cosecha “c”  
 $FE_{c,PM_{2.5}}$  = factor de emisión para  $PM_{2.5}$  por masa de combustible para cosecha “c”  
 $FS_{c,CN/PM_{2.5}}$  = factor de especiación para convertir  $PM_{2.5}$  en carbono negro para cosecha “c”

### Método de nivel 3

Un método de nivel 3 se vale de la misma ecuación que para los niveles 2 y 1, con parámetros por región o país específicos y con base en datos derivados de mediciones locales. Los datos de especiación para quema agrícola utilizando un método de nivel 3 se basarían en el tipo de cosecha.

### Posibles fuentes de datos de actividad, así como de factores de emisión y de especiación

En el cuadro 3.1-2 se muestran posibles fuentes de datos de actividad, factores de emisión y factores de especiación (cuando corresponda) para la aplicación de los métodos de niveles 1, 2 y 3 a fin de calcular las emisiones de CN procedentes de la quema agrícola en América del Norte. Los factores de emisión y de especiación específicos recomendados para el nivel 1 se presentan en una serie de cuadros por sector o fuente, en el apéndice B.

**Cuadro 3.1-2. Posibles fuentes de datos de actividad, así como de factores de emisión y de especiación para quema agrícola**

Parámetro	Canadá	Estados Unidos	México
<b>Nivel 1</b>			
Valores promedio para: <ul style="list-style-type: none"> <li>• superficie quemada</li> <li>• rendimiento (promedio)</li> <li>• residuos: rendimiento</li> <li>• contenido de materia seca</li> <li>• porción de residuos quemados</li> <li>• factor de combustión</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Superficie quemada (McCarty, 2011, detección remota) o informes de dependencias locales</li> <li>• Carga de residuos por cosecha: EMEP-AEMA, 2013, cuadro 3-2; Schreuder y Mavko, 2010; Van Leeuwen <i>et al.</i>, 2014; WRAP, 2005</li> <li>• Datos sobre el factor de combustión: Van Leeuwen <i>et al.</i>, 2014; Akagi <i>et al.</i>, 2011</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Superficie quemada: Unión Nacional de Cañeros, A.C., Estadísticas de la Agroindustria Azucarera Nacional</li> <li>• Residuos de cosecha: Valdez Vázquez <i>et al.</i>, 2010</li> <li>• Producción anual por cosecha: Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (Siacon) (Sagarpa, 2013)</li> </ul>	
Factor de emisión (PM <sub>2.5</sub> )	Akagi <i>et al.</i> , 2011; WRAP, 2005		Akagi <i>et al.</i> , 2011; Yokelson <i>et al.</i> , 2011; para caña de azúcar: Hall <i>et al.</i> , 2012
Factor de especiación (CE o CN)	Fracción promedio de CN: base de datos SPECIATE (gráfica 4-1, EPA, 2013a; se utiliza factor de CE para CN); WRAP, 2005		Fracción promedio de CN: base de datos SPECIATE (gráfica 4-1, EPA, 2013a; se utiliza el factor de CE para CN); para caña de azúcar: Hall <i>et al.</i> , 2012
<b>Nivel 2</b>			
Por tipo de cosecha: <ul style="list-style-type: none"> <li>• superficie quemada</li> <li>• rendimiento (promedio)</li> <li>• residuos: rendimiento</li> <li>• contenido de materia seca</li> <li>• porción de residuos quemados</li> <li>• factor de combustión</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Superficie quemada (McCarty, 2011, mediante teledetección) e informes de dependencias locales</li> <li>• Carga de residuos por cosecha: Schreuder y Mavko, 2010; Van Leeuwen <i>et al.</i>, 2014; <i>2002 Fire Emission Inventory for the WRAP Region—Phase II report 2005</i> (Inventario 2002 de emisiones de incendios para la región de la Alianza Regional del Oeste para la Calidad del Aire [<i>Western Regional Air Partnership</i>, WRAP: informe 2005 de la fase II])</li> <li>• Datos para el factor de combustión: Van Leeuwen <i>et al.</i>, 2014; Akagi <i>et al.</i>, 2011</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Superficie quemada: Unión Nacional de Cañeros, A.C., Estadísticas de la Agroindustria Azucarera Nacional</li> <li>• Producción anual por cosecha: Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (Siacon) (Sagarpa, 2013)</li> <li>• Parámetros para residuos de cosecha (Valdez Vázquez <i>et al.</i>, 2010)</li> </ul>	

Parámetro	Canadá	Estados Unidos	México
Factor de emisión por cosecha específica (PM <sub>2.5</sub> )	Schreuder y Mavko, 2010; Van Leeuwen <i>et al.</i> , 2014; Akagi <i>et al.</i> , 2011; WRAP, 2005		Para caña de azúcar: Hall <i>et al.</i> , 2012
Factor de especiación por cosecha específica (CE o CN)	Véase el nivel 1		
<b>Nivel 3</b>			
Por tipo de cosecha: <ul style="list-style-type: none"> <li>• superficie quemada</li> <li>• rendimiento (promedio)</li> <li>• residuos: rendimiento</li> <li>• contenido de materia seca</li> <li>• porción de residuos quemados</li> <li>• factor de combustión</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Superficie quemada (McCarty, 2011, mediante teledetección) e informes de dependencias locales</li> <li>• Carga de residuos por cosecha: Schreuder y Mavko, 2010; Van Leeuwen <i>et al.</i>, 2014; WRAP, 2005</li> <li>• Datos para el factor de combustión: Van Leeuwen <i>et al.</i>, 2014; Akagi <i>et al.</i>, 2011</li> </ul>		Véase el nivel 2
Factor de emisión por cosecha, clima y suelo específicos (PM <sub>2.5</sub> )	Schreuder <i>et al.</i> , 2010; Van Leeuwen <i>et al.</i> , 2014; Akagi <i>et al.</i> , 2011; WRAP, 2005		Para caña de azúcar: Hall <i>et al.</i> , 2012
Factor de especiación por cosecha específica (CE o CN)	Véase el nivel 1		

## 3.2 Sectores energético e industrial

Los sectores energético e industrial comprenden el consumo de combustible fósil para los siguientes fines: generación de electricidad; producción, procesamiento y refinación de petróleo y gas natural (fugas y quema de gases sobrantes incluidas); manufactura (que incluye motores estacionarios a diésel), y calderas industriales, institucionales o comerciales. La industria manufacturera incluida en este sector comprende, entre otros, la fabricación y elaboración de productos minerales, químicos, metálicos y de madera. Este sector abarca también la producción ladrillera en México.

Como una de las funciones del consumo de combustibles fósiles por fuentes industriales y de energía, se liberan a la atmósfera partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 2.5 micrómetros (PM<sub>2.5</sub>) y emisiones de CN. Distintos tipos de combustibles fósiles —entre otros: carbón, petróleo, gas natural, diésel, gas licuado de petróleo y gas de procesos— se utilizan para generar electricidad y suministrar energía a equipos industriales. Las emisiones procedentes del consumo de combustibles de biomasa se abordan en los apartados 3.1 (“Quema de biomasa”) y 3.4 (“Combustión doméstica”) de las presentes directrices.

### 3.2.1 Fuentes industriales y de generación energética generales

#### Método de nivel 1

Para las distintas industrias dentro de los sectores energético e industrial, sin contemplar los hornos ladrilleros, el método de nivel 1 permite calcular las emisiones de CN procedentes del consumo de combustible y un factor de emisión por defecto, por tipo de combustible consumido dentro de la industria seleccionada. El método de nivel 1 se basa en la siguiente ecuación:

$$E_{CN} = \sum_{i,I} (Q_{i,I} \times FE_{i,I,PM_{2.5}} \times FS_{i,I,CN/PM_{2.5}})$$

Donde:

$E_{CN}$  = emisiones de carbono negro procedentes del consumo de combustibles (la suma de emisiones de todos los combustibles)



i	=	tipo de combustible (por ejemplo: gas natural y carbón)
I	=	tipo de industria (por ejemplo: generación de electricidad, cementera y siderúrgica)
Q <sub>i,I</sub>	=	cantidad de combustible tipo “i” consumido en industria “I”
FE <sub>i,I,PM2.5</sub>	=	factor de emisión para PM <sub>2.5</sub> para combustible tipo “i” e industria “I”
FS <sub>i,I,CN/PM2.5</sub>	=	factor de especiación para convertir PM <sub>2.5</sub> en carbono negro para combustible tipo “i”

## Método de nivel 2

Con un método de nivel 2 es posible calcular las emisiones para cada combinación de combustible y tipo de tecnología empleados (excluidos los hornos ladrilleros). Los datos de actividad para el método de nivel 2 son de alcance nacional, estatal o regional, o bien otra escala espacial requerida para el inventario. El método de nivel 2 se basa en la siguiente ecuación:

$$E_{CN} = \sum_{i,j} (Q_{i,j} \times FE_{i,j,PM_{2.5}} \times SF_{i,CN/PM_{2.5}})$$

Donde:

E <sub>CN</sub>	=	emisiones de carbono negro
i	=	tipo de combustible
j	=	tipo de tecnología o equipo (por ejemplo: motores a diésel, calderas a base de gas natural y hornos de combustóleo)
Q <sub>i,j</sub>	=	cantidad de combustible “i” consumido en tecnología o equipo tipo “j”
FE <sub>i,j,PM2.5</sub>	=	factor de emisión para PM <sub>2.5</sub> para combustible tipo “i” y tecnología o equipo tipo “j”
FS <sub>i,CN/PM2.5</sub>	=	factor de especiación para convertir PM <sub>2.5</sub> en carbono negro para combustible tipo “i”

## Método de nivel 3

Un método de nivel 3 se basa en datos de mediciones por dispositivos específicos. A diferencia de las emisiones de PM<sub>2.5</sub>, no se dispone de métodos para medir las emisiones de CN con instrumentos (sondas de muestreo de chimeneas). Sin embargo, con base en estudios recientes, ha podido establecerse la relación entre carbono negro y PM<sub>2.5</sub> (CN:PM<sub>2.5</sub>), y la aplicación de esta relación se considera un seudométodo de nivel 3. Por ejemplo, las emisiones de partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 2.5 micrómetros, procedentes de calderas de gas natural de plantas generadoras de electricidad, se calculan con una sonda de muestreo de chimeneas (método de nivel 3) que permite medir la cantidad de masa atrapada por el filtro de PM<sub>2.5</sub> y parámetros de chimeneas (por ejemplo, el gasto). Una vez realizada la medición, se aplica la relación entre carbono negro y PM<sub>2.5</sub>.<sup>1</sup>

En la medida en que se disponga de datos de nivel 3 para la cobertura deseada del inventario, éstos podrán emplearse para la estimación de emisiones utilizando la siguiente ecuación:

<sup>1</sup>Para calcular la cantidad de masa de PM<sub>2.5</sub> con base en una prueba de fuentes, aplíquese la siguiente ecuación:

$$Emisiones_{PM_{2.5}} = \left( \frac{Cf}{Vm} \right) \times Qf$$

Donde:

Emisiones <sub>PM2.5</sub>	=	emisiones de PM <sub>2.5</sub> (gramos/minuto)
Cf	=	cantidad de PM <sub>2.5</sub> atrapadas en el filtro durante la prueba de fuentes (gramos)
Vm	=	volumen de gas en la muestra a temperatura y presión estándar (pies cúbicos estándar [scf, por sus siglas en inglés])
Qf	=	gasto durante la prueba de fuentes (pies cúbicos estándar por minuto)

$$E_{CN} = \sum_i (E_{i,PM_{2.5}} \times FS_{i,CN/PM_{2.5}})$$

Donde:

- $E_{CN}$  = emisiones de carbono negro procedentes del consumo de combustible (suma de emisiones de todos los combustibles)
- $E_{i,PM_{2.5}}$  = emisiones de  $PM_{2.5}$  calculadas a partir de mediciones directas (por ejemplo: muestreo por sonda) para combustible tipo “i”
- $FS_{i,CN/PM_{2.5}}$  = factor de especiación para convertir  $PM_{2.5}$  en carbono negro para combustible tipo “i”

Obsérvese que, aunque se disponga de datos de medición, su calidad puede ser cuestionable o haber incertidumbre respecto a qué tan representativos sean de la producción promedio o del consumo de combustible de una industria, instalación o unidad emisora determinada. En los casos en que la calidad sea cuestionable, un método viable para calcular las emisiones consistiría en aplicar los niveles de la siguiente manera: primer paso: instrumentar el nivel 3 (obtener datos de medición); segundo paso: con base en factores de emisión, comparar las emisiones medidas con las calculadas, o bien las medidas con las estimadas para otras instalaciones similares; tercer paso: si los datos de medición son cuestionables, es decir, que no se los pueda comparar con emisiones determinadas mediante otros métodos, deberá recurrirse al juicio de expertos para saber si se emplea un método de nivel 3 o uno de nivel 2.

### Posibles fuentes de datos de actividad, así como de factores de emisión y de especiación

En el cuadro 3.2-1 se muestran posibles fuentes de datos de actividad, factores de emisión y factores de especiación (cuando corresponda) para la aplicación de los métodos de niveles 1, 2 y 3 a fin de calcular las emisiones de CN procedentes de fuentes industriales y de generación energética en América del Norte. Los factores de emisión y de especiación específicos recomendados para el nivel 1 se presentan en una serie de cuadros por sector o fuente, en el apéndice B.

**Cuadro 3.2-1. Posibles fuentes de datos de actividad, así como de factores de emisión y de especiación para los sectores energético e industrial**

Parámetro	Canadá	Estados Unidos	México
<b>Nivel 1</b>			
Cantidad de combustible, por tipo de combustible	<i>Report on Energy Supply and Demand in Canada</i> (RESD) [Informe de oferta y demanda de energía en Canadá] (Statistics Canada, 2015a)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Annual Energy Outlook</i> (AEO) [Panorama anual de la energía] (EIA, 2015a)</li> <li>• Asociaciones industriales</li> </ul>	Agencia Internacional de Energía (AIE); Secretaría de Energía (Sener); Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi); INECC; Semarnat, y asociaciones industriales
Factor de emisión ( $PM_{2.5}$ )	WebFIRE (EPA, 2015b)		
Factor de especiación (CE o CN)	Base de datos SPECIATE (EPA, 2011b); se utiliza el factor de CE para CN		
<b>Nivel 2</b>			
Cantidad de combustible, por tipo de combustible y de tecnología o equipo	<i>Report on Energy Supply and Demand in Canada</i> (RESD) [Informe de oferta y demanda de energía en Canadá] (Statistics Canada, 2015a), asociaciones industriales y modelos especializados (por ejemplo para petróleo y gas no refinados)	AEO (EIA, 2015a) y asociaciones industriales	Véase el nivel 1

Parámetro	Canadá	Estados Unidos	México
Factor de emisión (PM <sub>2.5</sub> )	WebFIRE (EPA, 2015b)		
Factor de especiación (CE o CN)	Base de datos SPECIATE (EPA, 2011b); se utiliza el factor de CE para CN		
<b>Nivel 3</b>			
Emisiones de partículas de materia fina (PM <sub>2.5</sub> )	Mediciones directas de emisiones		
Factor de especiación (CE o CN)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Base de datos SPECIATE (EPA, 2011b); se utiliza el factor de CE para CN</li> <li>• Quema de gas sobrante: McEwen y Johnson, 2012</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Base de datos SPECIATE (EPA, 2011b); se utiliza el factor de CE para CN</li> </ul>	Base de datos SPECIATE (EPA, 2011b); se utiliza el factor de CE para CN

### 3.2.2 Hornos ladrilleros en México

En México, los ladrillos son el principal material de construcción; dependiendo del tipo, se fabrican utilizando diferentes técnicas: los ladrillos sólidos se producen por lo general en hornos tradicionales; los huecos o perforados, mediante procesos mecánicos. La fabricación industrial —que representa una producción diaria de hasta un millón de ladrillos en instalaciones enormes y altamente eficientes— da cuenta de aproximadamente 9 por ciento del total de esta actividad. El resto se produce en 17,052 hornos tradicionales, ubicados principalmente en los estados de Puebla, Jalisco, Guanajuato, San Luis Potosí, Michoacán, Durango, Chihuahua, Querétaro y el Estado de México, que consumen básicamente madera, entre otros combustibles. Estos estados comprenden cerca de 76 por ciento de la producción artesanal de ladrillos en México (Kato *et al.*, 2013).

Existen distintos tipos de hornos y combustibles para la elaboración tradicional de ladrillos en México. Dependiendo de la producción, los hornos son pequeños (con una capacidad de hasta 5,000 ladrillos por lote), medianos (de 10,000 a 15,000 ladrillos por lote) o grandes (de 30,000 a 35,000 ladrillos por lote). La producción total varía estacionalmente: en la temporada de seca, los hornos altamente productivos fabrican de uno a tres lotes al mes, en comparación con la temporada de lluvia, cuando su capacidad máxima es de un lote al mes (Cárdenas, 2012). En promedio, los hornos tienen una capacidad de producción de entre doce y catorce lotes al año, y pueden ser fijos o temporales (una de las razones por las que es difícil determinar exactamente cuántos hornos están en operación cada año). Los combustibles también varían: los artesanos utilizan básicamente restos de madera y aserrín, aunque en estos hornos también se queman plástico, llantas, estiércol, cáscaras de coco, cartón, carcasas de batería y aceite para motores usado (Stratus, 2012). A pesar de las acciones emprendidas para introducir hornos ladrilleros optimizados, como los hornos ecológicos “MK2”, junto con mejores sistemas de suministro de madera y aire, con miras a mitigar las emisiones y los efectos en la salud, gran parte de la producción artesanal se lleva a cabo en hornos tradicionales muy ineficientes.

Un proceso típico de fabricación de ladrillos comienza con la extracción de la arcilla, que luego se tamiza y mezcla con sal y agua; se procede a moldear los ladrillos, se dejan secar (al aire libre, al sol) y se cuecen (en el horno). Es esta última etapa la que implica combustión y en la que se genera la mayor parte de las emisiones de partículas de materia fina. Cuando inicia el proceso de cocción, el horno, que se deja descubierto, produce cantidades considerables de humo y hollín. Enseguida se cubre para que se estabilice, es decir, para que alcance y mantenga una temperatura de cuando menos 600 °C durante un periodo mínimo de una hora. El control de la temperatura depende de la experiencia y conocimientos de los artesanos, puesto que la mayoría de los hornos carece de sistemas para monitorear la temperatura. El proceso completo toma entre 14 y 24 horas, lapso en el que continuamente se suministra combustible al horno para conservar su temperatura (Stratus, 2012).

Se han realizado diversas investigaciones sobre el impacto de los hornos ladrilleros en la salud y en el cambio climático de distintas partes del mundo. El carbono negro que se emite depende en gran medida del combustible consumido, así como de la eficiencia del horno, la tecnología utilizada, las prácticas de operación, el tipo de arcilla y muchos otros factores que varían considerablemente de una región a otra.

### Método de nivel 1

El método de nivel 1 permite calcular las emisiones generadas por hornos ladrilleros en México con base en la producción total de toda el área sujeta a inventario, el tamaño promedio de los lotes y el factor de emisión promedio por lote. El método de nivel 1 se basa en la siguiente ecuación:

$$E_{CN} = \frac{\text{producción}}{\text{tamaño del lote}} \times FE_{PM_{2.5}, \text{lote}} \times FS_{CN/PM_{2.5}}$$

Donde:

$E_{CN}$	=	emisiones de carbono negro
producción	=	producción total de ladrillos en el área de inventario (kg)
tamaño del lote	=	tamaño promedio del lote de ladrillos (ladrillos/lote)
$FE_{PM_{2.5}, \text{lote}}$	=	factor de emisión de $PM_{2.5}$ (por lote)
$FS_{CN/PM_{2.5}}$	=	factor de especiación para convertir $PM_{2.5}$ en carbono negro

### Método de nivel 2

El método de nivel 2 se basa en datos de actividad y factores de emisión más precisos en comparación con el método de nivel 1. Además, en el nivel 2 se consideran la eficiencia promedio del horno y el consumo promedio de madera, y se estiman las emisiones de CN en función de la producción promedio de ladrillos y un solo factor de emisión, en el supuesto de que todos los hornos de ladrillos queman exclusivamente madera. El método de nivel 2 se basa en la siguiente ecuación:

$$E_{CN} = \text{producción} \times \frac{Ef_{\text{horno}}}{CC_{\text{madera}}} \times FE_{CN}$$

Donde:

$E_{CN}$	=	emisiones de carbono negro
producción	=	producción total de ladrillos en el área de inventario (kg)
$Ef_{\text{horno}}$	=	eficiencia promedio del horno (megajulios por kg [MJ/kg] de ladrillo)
$CC_{\text{madera}}$	=	capacidad calorífica de la madera (MJ/kg de madera seca)
$FE_{CN}$	=	factor de emisión del carbono negro (gramos/kg de madera seca)

### Método de nivel 3

El método de nivel 3 permite estimar las emisiones para cada combinación de tipo de combustible y tipo de horno. Los principales tipos de combustible son madera y combustóleo, que dan cuenta de aproximadamente 80 por ciento del combustible utilizado en hornos de ladrillos. Los datos de actividad en este caso dependerían del tipo de horno o de la región. El método de nivel 3 se basa en la siguiente ecuación:

$$E_{CN} = \sum_{i,j} \left( \text{cant}_{i,j} \times \frac{Ef_{\text{horno } j}}{CC_i} \times FE_{CN,i,j} \right)$$

Donde:

$E_{CN}$	=	emisiones de carbono negro
i	=	tipo de combustible (madera o combustóleo)
j	=	tipo de tecnología o equipo (por ejemplo: horno fijo, de campaña o MK2)
$\text{cant}_{i,j}$	=	cantidad de ladrillos producidos (kg) en horno tipo "j", usando combustible tipo "i"

$Ef_{\text{horno},j}$	=	eficiencia promedio del horno (MJ/kg de ladrillo) tipo “j”
$CC_i$	=	capacidad calorífica del combustible (MJ/kg de madera seca)
$FE_{\text{CN},i,j}$	=	factor de emisión de carbono negro por combustible tipo “i” y horno tipo “j”

### Posibles fuentes de datos de actividad, así como de factores de emisión y de especiación

En el cuadro 3.2-2 se muestran posibles fuentes de datos de actividad, factores de emisión y factores de especiación para la aplicación de los métodos de niveles 1, 2 y 3 a fin de calcular las emisiones de CN generadas por hornos ladrilleros en México. Los factores de emisión y de especiación específicos recomendados para el nivel 1 se presentan en una serie de cuadros por sector o fuente, en el apéndice B.

**Cuadro 3.2-2. Posibles fuentes de datos de actividad, así como de factores de emisión y de especiación para hornos ladrilleros en México**

Parámetro	México
<b>Nivel 1</b>	
Producción de ladrillos	Kato <i>et al.</i> , 2013
Tamaño promedio de los lotes de ladrillo	Cárdenas, 2012
Factor de emisión de $PM_{2.5}$	TCEQ, 2002; CARB, 2014
Factor de especiación	Christian <i>et al.</i> , 2010; Stratus, 2012
<b>Nivel 2</b>	
Producción de ladrillos	Kato <i>et al.</i> , 2013
Eficiencia promedio del horno	Cárdenas, 2012
Capacidad calorífica de la madera	INECC-CCAC-MCE <sup>2</sup> , 2013
Factor de emisión de CN, para madera	Christian <i>et al.</i> , 2010
<b>Nivel 3</b>	
Cantidad de ladrillos producidos, por tipo de horno	Kato <i>et al.</i> , 2013 <sup>a</sup>
Eficiencia promedio del horno, por tipo de horno	Cárdenas, 2012 <sup>a</sup>
Capacidad calorífica, por tipo de combustible	No se identificó ninguna
Factor de emisión de CN, para madera <sup>b</sup>	Christian <i>et al.</i> , 2010

<sup>a</sup> Los estudios con que se cuenta actualmente sólo contienen información sobre Guanajuato. Sería necesario llevar a cabo estudios similares para calcular las emisiones correspondientes al resto del país.

<sup>b</sup> Se están llevando a cabo distintos estudios que buscan cuantificar los factores de emisión del combustóleo por principales tipos de horno, aunque no se dispone de factores de emisión para el carbono negro para el combustóleo consumido en hornos ladrilleros en México.

<sup>c</sup> Los estudios que se realicen sobre producción por tipo de dosificación, grado de mecanización o tipo de arcilla permitirán en el futuro alcanzar estimaciones más precisas de las emisiones.

### 3.3 Fuentes móviles

El sector de fuentes móviles se divide en cinco grandes subsectores: vehículos carreteros (automóviles, camiones y autobuses, entre otros), vehículos y equipo que no circulan por carretera (equipo de construcción, agrícola e industrial), embarcaciones, aeronaves y locomotoras. Ante la prevalencia de motores a diésel, el sector de fuentes móviles representa uno de los principales generadores de emisiones de carbono negro. En Estados Unidos se han establecido métodos y datos para la elaboración de inventarios de partículas suspendidas que sirven de base para las recomendaciones correspondientes a los tres niveles en cada subsector. Los modelos por computadora creados en Estados Unidos para los sectores carretero (MOVES, del inglés: *Motor Vehicle Emission Simulator*) y de vehículos y equipo que no circulan por carretera (NONROAD) proporcionan una plantilla para recomendaciones de métodos de nivel 3. Una de

las ventajas que supone la estimación precisa de emisiones de CN para el sector de fuentes móviles estriba en que el consumo total de combustible puede rastrearse en cada subsector, lo que hace posible la formulación de recomendaciones de nivel 1. Las emisiones de CN generadas por fuentes móviles deberán ser una de las prioridades absolutas para los responsables de generar inventarios de emisiones, y las directrices que a continuación se presentan para cada sector facilitan la estimación de estas emisiones para cada país.

### 3.3.1 Vehículos carreteros

Las fuentes de emisión móviles que circulan por vías y carreteras incluyen los vehículos automotores que se utilizan para el transporte personal y de pasajeros, así como para servicios urbanos, movimiento de mercancías y actividades comerciales. Los subsectores de este tipo de fuente abarcan automóviles, camiones ligeros y de carga pesada, autobuses y motocicletas. Existen distintos combustibles que se utilizan en fuentes carreteras, a saber: gasolina, diésel, gas natural comprimido, gas licuado de petróleo (gas LP) y mezclas de etanol. Los agentes que más contribuyen a la generación de emisiones de CN y que pertenecen a la categoría de fuentes móviles carreteras son, con mucho, los vehículos a diésel, principalmente los camiones de carga pesada. La combustión incompleta de hidrocarburos de cadena larga que se encuentran en el combustible diésel produce el hollín que comúnmente se observa saliendo de este tipo de vehículo. En el caso de los camiones a base de diésel con tecnología obsoleta (aquellos sin filtros para partículas de diésel), el CN puede representar la mayor parte de las emisiones totales de partículas menores a 2.5 micrómetros, en términos de masa. La instalación de filtros para partículas de diésel tanto en camiones de tecnología innovadora como para la conversión de camiones tecnológicamente obsoletos es una de las maneras más eficaces de mitigar las emisiones de carbono negro.

Desde hace mucho tiempo se han integrado inventarios de  $PM_{2.5}$  en Canadá, Estados Unidos y México para vehículos carreteros. Con el propósito de producir estos inventarios, normalmente se han adaptado para Canadá y México modelos de factores de emisión concebidos en Estados Unidos, entre los que se incluyen los modelos PART5 (EPA, 1995b) y MOBILE6 (EPA, 2014a), creados por la Agencia de Protección Ambiental (*Environmental Protection Agency*, EPA). Estos modelos permiten calcular la cantidad de  $PM_{2.5}$  emitidas por kilómetro recorrido desde distintos tipos de vehículos, con base en datos de medición de emisiones. En 2010 en Estados Unidos, empezó a utilizarse el marco MOVES, modelo para simular emisiones, que resultaría en un importante avance en la estimación de emisiones de CN, por los siguientes motivos:

- Se incorpora una cantidad considerable de información nueva sobre emisiones de  $PM_{2.5}$ , generadas por automóviles y camiones ligeros y de carga pesada, y que es más realista que los cálculos obtenidos con anterioridad, lo que se traduce en estimaciones más altas de  $PM_{2.5}$  totales procedentes de fuentes carreteras.
- Es posible estimar directamente las emisiones de carbono elemental, a partir de una metodología de especiación detallada que da cuenta de factores de postratamiento de diésel y carga vehicular. De esta forma se logra una estimación de las emisiones de CN más precisa que con la especiación a posteriori, ya que el carbono elemental es un sustituto cercano del carbono negro.

La relación entre carbono elemental y el total de  $PM_{2.5}$  varía enormemente en función del tipo de combustible y de vehículo (equipado o no con dispositivos de tratamiento ulterior en la corriente de escape), por lo que se justificaba una estimación más detallada de las emisiones de carbono elemental en el modelo MOVES. Según el *Informe al Congreso sobre el carbono negro (Report to Congress on Black Carbon)* de Estados Unidos, el sector de fuentes móviles carreteras fue el único en supeditarse a estimaciones directas de CN y no a la especiación a posteriori (EPA, 2013a).

Dado que MOVES incorpora factores de emisión actualizados y produce estimaciones directas de carbono elemental, se recomienda la aplicación de este simulador, en particular el MOVES2014, de reciente

lanzamiento por la EPA y que contiene estimaciones optimizadas de carbono elemental. Este modelo constituye el medio idóneo para asegurar la uniformidad en las estimaciones de emisiones de CN de fuentes carreteras entre los tres países de América del Norte. Gracias a su diseño, MOVES facilita la elaboración de un inventario detallado que se consideraría de nivel 3. Las primeras acciones para adaptar el simulador MOVES a otros países han recibido el apoyo de la EPA. Por medio de esta iniciativa, conocida como MOVES International (Glover *et al.*, 2012), se estableció una metodología para ajustar las tasas de emisión del modelo MOVES, a fin de que quedaran reflejadas las diferencias en los estándares de emisión entre el país objetivo y Estados Unidos. Aunque se prefieren los datos de emisiones locales antes que ajustar las tasas a las de Estados Unidos, se reconoció que la mayoría de los países carece de la información detallada necesaria para reemplazar por completo las tasas de emisión estadounidenses contenidas en MOVES. Así, los niveles 1 y 2 se basarían en factores de emisión de MOVES agregados externamente al modelo, con base en la ejecución de modelos sencillos, aplicados a los datos de actividad y determinados para cada nivel.

### Método de nivel 1

El nivel 1 consiste en un método agregado, basado en combustibles, que parte de una única estimación nacional de consumo de combustible, por tipo (gasolina, diésel o gas natural comprimido) y por año calendario. (En MOVES, el gas natural comprimido —cuyas emisiones de partículas de materia fina son reducidas— sólo se aplica a autobuses urbanos, de ahí que se considere un tipo de combustible de menor prioridad.) Para ello, se requiere un cálculo sin la utilización específica de un modelo, pero en el que se incorporen tasas de emisión agregadas de ejecuciones simples de MOVES. Los factores de emisión que se obtendrían del modelo MOVES se agregarían a un factor de emisión único para CN basado en el combustible (suponiendo que fuera el mismo que el factor de emisión para carbono elemental), por año calendario. Para Canadá y México, es necesario realizar ajustes, mediante la metodología MOVES International de la EPA, para subsanar las diferencias en cuanto a estándares de emisión de vehículos. Si no es posible, una corrida sencilla de alcance nacional o anual de la versión estadounidense del modelo bastará para producir el factor de emisión necesario, expresado como carbono elemental por total de energía consumida para los distintos tipos de combustible. El total de energía consumida se convierte en el consumo de combustible utilizando el contenido energético de cada tipo de combustible por país. Los datos de actividad corresponderían al total de combustible consumido, por tipo de combustible únicamente. Los factores de especiación no se precisan cuando se emplea un factor de emisión de MOVES para carbono elemental.

El método de nivel 1 se basa en la siguiente ecuación:

$$E_{CN} = \sum_i (Q_i \times FE_{i,CE} \times 1/En_i)$$

Donde:

$E_{CN}$	=	emisiones de carbono negro de combustibles de fuentes carreteras (gasolina y diésel)
$Q_i$	=	cantidad de combustible tipo “i”
$FE_{i,CE}$	=	factor de emisión de carbono elemental con base en el combustible, para combustible tipo “i” (gramos CE/kJ de energía, de MOVES)
$En_i$	=	contenido energético de combustible tipo “i” (kJ/galón)

### Método de nivel 2

El nivel 2 es un método más detallado, basado en el combustible, que parte de estimaciones del consumo de combustible por tipo de combustible y clase de vehículo (automóviles, camiones ligeros y de carga pesada y autobuses). Para ello se requiere un cálculo sin la utilización específica de un modelo, pero en el que se empleen tasas de emisión basadas en el combustible y derivadas de ejecuciones simples de

MOVES. En este caso, los factores de emisión se obtendrían del simulador MOVES y se agregarían a un factor de emisión de CN (es decir, carbono elemental) único con base en el combustible, por año calendario, tipo de combustible y clase de vehículo. Para Canadá y México, es necesario realizar ajustes, mediante la metodología MOVES Internacional de la EPA, para incorporar las diferencias en cuanto a estándares de emisiones de vehículos. Si no es posible, una corrida sencilla de alcance nacional o anual de la versión estadounidense del modelo bastará para producir el factor de emisión necesario, expresado como carbono elemental por total de energía consumida. El total de energía consumida se convierte en el consumo de combustible utilizando el contenido energético de los distintos tipos de combustible por país. Los datos de actividad corresponderían al combustible consumido por clase de vehículo, tipo de combustible y año calendario. Los factores de especiación no se precisan cuando se emplea un factor de emisión del modelo MOVES para carbono elemental.

El método de nivel 2 se basa en la siguiente ecuación:

$$E_{CN} = \sum_{i,j} (Q_{i,j} \times FE_{i,j,CE} \times 1/En_i)$$

Donde:

$E_{CN}$	=	emisiones de carbono negro de vehículos carreteros (gasolina y diésel)
$Q_{i,j}$	=	cantidad de combustible tipo “i” para vehículo clase “j”
$FE_{i,j,CE}$	=	factor de emisión de carbono elemental con base en el combustible, para combustible tipo “i” vehículo clase “j” (gramos de CE/kJ de energía, de MOVES)
$En_i$	=	contenido energético de combustible tipo “i” (kJ/galón)

### Método de nivel 3

El nivel 3 consiste en un método detallado, basado en la actividad, para el cual se utiliza una versión del modelo MOVES pero adaptado a estándares de emisión de un país en particular y que utiliza datos específicos de la actividad vehicular, y demás, de cada país, para el que MOVES calcula directamente las emisiones de carbono elemental. En el caso de Canadá y México, el modelo puede personalizarse con información de entrada específica del país sobre kilómetros-vehículo recorridos (KVR), velocidades promedio, parámetros para combustibles, antigüedad de los vehículos e información meteorológica. El administrador de datos por país (*country data manager*, CDM) del modelo MOVES y sus funciones de dominio personalizado permiten al usuario alimentar esta información específica por país en forma directa y accesible. De los datos mencionados, los KVR son los que revisten mayor importancia. Si no se cuenta con esta información, debe recurrirse a un método de un nivel inferior. Los valores por defecto para Estados Unidos pueden utilizarse para otros datos de entrada, aunque no se recomiendan para otros países. En el caso de México se recomienda utilizar, de ser posible, el modelo MOVES Internacional a fin de reflejar las diferencias de estándares de emisiones vehiculares. No se requieren factores de especiación si se utilizan resultados del simulador MOVES para carbono elemental. Canadá y Estados Unidos cuentan con estándares de emisión armonizados, por lo que en ambos países pueden aplicarse tasas de emisión por defecto.

La razón por la cual no se muestra una ecuación para el método de nivel 3 obedece a que los cálculos se llevan a cabo internamente para MOVES, con base en los datos exhaustivos de actividad de entrada proporcionados por el usuario.

### Posibles fuentes de datos de actividad, así como de factores de emisión y de especiación

En el cuadro 3.3-1 se muestran posibles fuentes de datos de actividad, factores de emisión y factores de especiación (cuando corresponda) para la aplicación de los métodos de niveles 1, 2 y 3 a fin de calcular las emisiones de CN generadas por fuentes móviles carreteras en América del Norte. Los factores de emisión y



de especiación específicos recomendados para el nivel 1 se presentan en una serie de cuadros por sector o fuente, en el apéndice B.

**Cuadro 3.3-1. Posibles fuentes de datos de actividad, así como de factores de emisión y de especiación para fuentes carreteras**

Parámetro	Canadá	Estados Unidos	México
<b>Nivel 1</b>			
Cantidad de combustible consumido (por total de gasolina y diésel)	<i>Report on Energy Supply and Demand in Canada</i> (RESD) [Informe de oferta y demanda de energía en Canadá] (Statistics Canada, 2015a)	<i>Annual Energy Outlook</i> (AEO) [Panorama anual de la energía] (EIA, 2015a)	Petróleos Mexicanos (Pemex)
Factor de emisión (CE/total de energía [kJ])	El mismo que para Estados Unidos; ejecución de MOVES2014 con datos de entrada específicos para Canadá, si los hay (parque vehicular y antigüedad, entre otros). No es necesario actualizar las tasas de emisión gracias a la consonancia entre los estándares canadienses y los estadounidenses	Proceso posterior a la corrida de MOVES2014 en modo nacional o anual, dividiendo el CE entre el total de energía (por separado para gasolina y diésel)	El mismo que para Estados Unidos; ajustes a MOVES2014 para integrar diferencias en cuanto a estándares de emisiones entre México y Estados Unidos, de ser posible, y ejecutarlo con datos de entrada específicos para México (parque vehicular y antigüedad, entre otros)
Contenido energético (kJ/galón)	Obtenido del modelo GREET (ANL, 2015): gasolina E0: 122,481 gasolina E10: 118,287 diésel con bajo contenido de azufre: 135,562		
<b>Nivel 2</b>			
Cantidad de combustible consumido por clase de vehículo	Modificado a partir del informe RESD (Statistics Canada, 2015a), datos para combustible si se dispone de datos de flotas	Estadísticas sobre carreteras de la Administración Federal de Carreteras ( <i>Federal Highway Administration, FHWA</i> ) (FHWA, 2015)	Pemex
Factor de emisión (CE/total de energía [kJ])	El mismo que para Estados Unidos; ejecución de MOVES2014 con datos de entrada específicos para Canadá, si los hay (parque vehicular y antigüedad, entre otros). No es necesario actualizar las tasas de emisión gracias a la consonancia entre los estándares canadienses y los estadounidenses	Proceso posterior a la corrida de MOVES2014 en modo nacional o anual, dividiendo el CE entre el total de energía, para cada combustible y clase de vehículo	El mismo que para Estados Unidos; ajustes a MOVES2014 para integrar diferencias en cuanto a estándares de emisiones entre México y Estados Unidos, de ser posible, y ejecutarlo con datos de entrada específicos para México (parque vehicular y antigüedad, entre otros)
Contenido energético (kJ/galón)	Véase el nivel 1		

Parámetro	Canadá	Estados Unidos	México
<b>Nivel 3</b>			
Mínimo: kilómetros-vehículo recorridos (KVR); también pueden usarse: velocidad promedio y distribución de vías, entre otros	KVR: Transport Canada <sup>a</sup>	Valores nacionales por defecto para MOVES2014 (no se requieren datos de entrada)	KVR: INECC, Semarnat (Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire y Registro de Emisiones y Trasferencia de Contaminantes, DGGCARETC)
Factor de emisión (PM <sub>2.5</sub> )	Ejecución del modelo MOVES2014 con datos de entrada específicos para Canadá, si los hubiera (parque vehicular, antigüedad, etc). No es necesario actualizar las tasas de emisión gracias a la consonancia entre los estándares canadienses y los estadounidenses	Interno del modelo MOVES	Ajustes a MOVES2014 para integrar diferencias en cuanto a estándares de emisiones entre México y Estados Unidos, de ser posible, y ejecutarlo con datos de entrada específicos para México (parque vehicular y antigüedad, entre otros)

<sup>a</sup>Si desea consultar una descripción detallada de fuentes de datos de actividad, remítase al Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (*National Greenhouse Gas Inventory*) de Canadá (Environment Canada, 2015b).

### 3.3.2 Fuentes móviles que no circulan por carretera

Las emisiones de carbono negro procedentes de fuentes móviles que no circulan por carretera provienen principalmente del consumo de combustible diésel, mientras que la gasolina y combustibles gaseosos, como el gas natural y LP, tienen una contribución menor. Estas fuentes comprenden vehículos y equipo autopropulsados o bien portátiles (equipo de mano), de uso recreativo, industrial, agrícola y comercial; de construcción, mantenimiento de jardines (comerciales y residenciales) y tala; de apoyo terrestre en aeropuertos, en minería subterránea y en yacimientos petrolíferos; así como marítimo recreativo y de apoyo para ferrocarriles. (Los métodos para estimar las emisiones de fuentes como locomotoras, embarcaciones y aeronaves se tratan en los apartados 3.3.4 a 3.3.6). Los motores pequeños en cierto tipo de equipo normalmente consumen gasolina y vienen en configuraciones de dos y cuatro tiempos; los grandes, en cambio, por lo general consumen diésel, debido a las ventajas con respecto a potencia de salida y durabilidad. Cada uno de estos tipos de motor presenta características únicas en cuanto a emisiones de partículas de materia fina y carbono negro.

El método de nivel 1 depende de descripciones de categorías de fuentes agregadas simplificadas —por ejemplo, con fuentes agrupadas por tipo de combustible y categorías según las aplicaciones del equipo, a saber: a diésel para agricultura y construcción; de gasolina para el mantenimiento de jardines, e industrial, como montacargas, alimentado normalmente con combustibles gaseosos—, a utilizarse cuando no se dispone de datos de actividad más detallados y desagregados de los equipos. Los métodos de nivel 2 presuponen que el parque de equipo y los niveles de actividad pueden evaluarse con mayor detalle, por ejemplo, por tecnología de maquinaria general. Los métodos de nivel 3 son los que exigen mayor cantidad de datos, pero también son los más precisos: utilizan información sumamente detallada respecto de los equipos para estimar las emisiones en una base individual, con un enfoque de microescala (*bottom-up*). La conveniencia de un método concreto variará en función de la disponibilidad de fuentes de datos para cada categoría de equipo. Por ejemplo, puede ser que se disponga de estimaciones detalladas sobre las horas de uso de ciertas categorías de uso de equipo, como el agrícola a diésel, lo cual facilita la evaluación de nivel 3. Por otro lado, el uso de equipo para el mantenimiento de jardines tal vez sólo logre cuantificarse

a partir de estimaciones de macroescala sobre el consumo de combustible, lo que corresponde a un análisis de nivel 1.

### Método de nivel 1

Con el método de nivel 1 es posible estimar las emisiones de CN a partir del consumo total anual de combustible para una categoría de uso de equipo determinada y un factor de emisión por defecto específico por combustible. Los datos de actividad para este nivel metodológico son de alcance nacional, estatal o regional, o bien otra escala espacial requerida para el inventario. El método de nivel 1 se basa en la siguiente ecuación:

$$E_{CN} = \sum_i (Q_i \times FE_{i,PM_{2.5}} \times FS_{i,CN/PM_{2.5}})$$

Donde:

$E_{CN}$	=	emisiones de carbono negro para una categoría de equipo determinada
$i$	=	tipo de combustible
$Q_i$	=	consumo anual de combustible para cada uno de los combustibles tipo “i” (por ejemplo, en toneladas o litros)
$FE_{i,PM_{2.5}}$	=	factor de emisión para combustible tipo “i” (por ejemplo, en g/ton o g/litro de combustible)
$FS_{i,CN/PM_{2.5}}$	=	factor de especiación para convertir $PM_{2.5}$ en carbono negro para combustible tipo “i”

### Método de nivel 2

El método de nivel 2 da cuenta de distintas tecnologías de motores. Los datos de actividad para este nivel metodológico son de alcance nacional, estatal o regional, o bien otra escala espacial requerida para el inventario. El método de nivel 2 se basa en la siguiente ecuación:

$$E_{CN} = \sum_{c,i,t} (Q_{c,i,t} \times FE_{c,i,t,PM_{2.5}} \times FS_{i,t,CN/PM_{2.5}})$$

Donde:

$E_{CN}$	=	emisiones de carbono negro
$c$	=	categoría de uso de equipo
$i$	=	tipo de combustible
$t$	=	grado de tecnología (por ejemplo, antes de 1981, 1981 a 1990, 1991 a la fase I, fase I, fase II, fase IIIA)
$Q_{c,i,t}$	=	consumo de combustible (en toneladas, por ejemplo) para una categoría “c” de uso de equipo determinada, combustible tipo “i” y tecnología grado “t”
$FE_{c,i,t,PM_{2.5}}$	=	factor de emisión de $PM_{2.5}$ para una categoría “c” de uso de equipo determinada, combustible tipo “i” y tecnología grado “t”
$FS_{i,t,CN/PM_{2.5}}$	=	factor de especiación para convertir $PM_{2.5}$ en carbono negro para combustible tipo “i” y, posiblemente, por tecnología grado “t” (si está disponible)

### Método de nivel 3

El método de nivel 3 se apoya en características detalladas del equipo y estimaciones de actividad para poder calcular las emisiones sobre una base de caballos de fuerza por hora (o kilovatios por hora [kWh]). Este método es el de mayor aplicabilidad para la integración de inventarios cuando se dispone de conteos de equipo y datos de actividad en forma detallada y desagregada. El método de nivel 3 se basa en la siguiente ecuación:

$$E_{CN} = N \times HRS \times HP \times FC \times FE_i \times FS_{i,t,CN/PM_{2.5}}$$

Donde:

$E_{CN}$	=	emisiones de carbono negro
$N$	=	población fuente (número de unidades)
$HRS$	=	horas de uso
$HP$	=	potencia nominal promedio en caballos de fuerza
$FC$	=	factor de carga de motor típico (0-1.0)
$FE_i$	=	factor de emisión promedio de $PM_{2.5}$ por unidad de uso (por ejemplo, gramos/kWh)
$FS_{i,t,CN/PM_{2.5}}$	=	factor de especiación para convertir $PM_{2.5}$ en carbono negro (por combustible tipo “i” y posiblemente nivel de tecnología “t”, si está disponible)

Cuando se cuenta con los datos, los cálculos se dividen aún más, según se muestra a continuación:

- $N$ : el conteo de motores se divide por antigüedad y potencia
- $HRS$ : las horas al año para cada categoría de equipo varían en función de la antigüedad del equipo
- $HP$ : la potencia promedio en caballos de fuerza de motores varían por tipo de equipo y rango de potencia en caballos de fuerza
- $FE$ : diferentes factores de deterioro se aplican al factor de emisión, para reflejar las variaciones respecto de las horas de uso acumuladas

### Posibles fuentes de datos de actividad, así como de factores de emisión y de especiación

En el cuadro 3.3-2 se muestran posibles fuentes de datos de actividad, factores de emisión y factores de especiación para la aplicación de los métodos de niveles 1, 2 y 3 a fin de calcular las emisiones de CN correspondientes a fuentes móviles que no circulan por carretera en América del Norte. Los factores de emisión y de especiación específicos recomendados para el nivel 1 se presentan en una serie de cuadros por sector o fuente, en el apéndice B.

**Cuadro 3.3-2. Posibles fuentes de datos de actividad, así como de factores de emisión y de especiación para fuentes móviles que no circulan por carretera**

Parámetro	Canadá	Estados Unidos	México
<b>Nivel 1</b>			
Información sobre el consumo de combustible por tipo de combustible	<i>Report on Energy Supply and Demand in Canada</i> (RESD) [Informe de oferta y demanda de energía en Canadá] (Statistics Canada, 2015a) para el consumo total de combustible; se aplican cocientes de consumo de combustible de fuentes móviles que no circulan por carretera respecto del consumo total de combustible por tipo de combustible para EU tomados del <i>Annual Energy Outlook</i> [Panorama anual de energía] (EIA, 2015a) y el modelo NONROAD2008 (EPA, 2014b)	Modelo NONROAD2008 (EPA, 2014b); <i>Census of Agriculture</i> [Censo agrícola] del Departamento de Agricultura de Estados Unidos ( <i>US Department of Agriculture</i> , USDA) (para equipo agrícola)	Secretaría de Energía (Sener) para el consumo total de combustible; se aplican cocientes de consumo de combustible de fuentes móviles que no circulan por carretera respecto del consumo total de combustible por tipo de combustible para EU tomados del <i>Annual Energy Outlook</i> [Panorama anual de energía] (EIA, 2015a) y el modelo NONROAD2008 (EPA, 2014b)
Factor de emisión (PM <sub>2.5</sub> )	Modelo NONROAD2008 (EPA, 2014b)	Modelo NONROAD2008 (EPA, 2014b)	Modelo NONROAD-México
Factor de especiación (CE o CN)	Base de datos SPECIATE (EPA, 2011b); se utiliza el factor de CE para CN Informe de especiación a partir del modelo MOVES2014 (EPA, 2014c)		
<b>Nivel 2</b>			
Datos de consumo de combustible por tecnología de motor y categoría de uso del equipo	RESD (Statistics Canada, 2015a); <i>Annual Energy Outlook</i> [Panorama anual de energía] (EIA, 2015a); modelo NONROAD2008 (EPA, 2014b); cuestionarios, fuentes del sector privado	Modelo NONROAD2008 (EPA, 2014b)	Sener; <i>Annual Energy Outlook</i> [Panorama anual de energía] (EIA, 2015a); modelo NONROAD2008 (EPA, 2014b); cuestionarios, fuentes del sector privado
Factor de emisión (PM <sub>10/2.5</sub> )	Modelo NONROAD2008 (EPA, 2014b), ajustado para reflejar las diferencias respecto de los estándares de EU	Modelo NONROAD2008 (EPA, 2014b)	Modelo NONROAD-México
Factor de especiación (CE o CN)	Base de datos SPECIATE (EPA, 2011b); se utiliza el factor de CE para CN Informe de especiación a partir del modelo MOVES2014 (EPA, 2014c)		
<b>Nivel 3</b>			
Horas al año de uso de motor por categoría, tamaño de motor y tecnología	Población: bases de datos comerciales de ventas de equipo Actividad: cuestionarios, modelo NONROAD2008	Modelo NONROAD2008 (EPA, 2014b)	Modelo NONROAD-México
Factor de emisión (PM <sub>10/2.5</sub> )	Modelo NONROAD2008 (EPA, 2014b), ajustado para reflejar las diferencias respecto de los estándares de EU	Modelo NONROAD2008 (EPA, 2014b)	Modelo NONROAD-México
Factor de especiación (CE o CN)	Base de datos SPECIATE (EPA, 2011b); se utiliza el factor de CE para CN Informe de especiación a partir del modelo MOVES2014 (EPA, 2014c)		

### 3.3.3 Locomotoras

Las emisiones de carbono negro generadas por locomotoras son producto de la combustión de diésel que se asocia con el transporte de pasajeros y carga vía ferrocarril. Esto incluye trenes de carga que recorren distancias cortas y largas, trenes de pasajeros y locomotoras de maniobras que operan en los patios. Las emisiones de CN generadas por trenes eléctricos no se abordan en este apartado, ya que la fuente de emisión primaria en ese caso es la generación de la electricidad (véase el apartado 3.2.1). Obsérvese que tampoco se tratan en este apartado las operaciones de camiones en los patios de maniobras ni del equipo para el manejo de carga por ferrocarril, pero sí se abordan en el apartado correspondiente a fuentes carreteras (3.3.1) y fuentes móviles que no circulan por carretera (3.3.2), respectivamente.

El método de nivel 1 se basa en información agregada sobre combustibles; el método de nivel 2 permite estimar las emisiones para los tres tipos de actividad de locomotoras (trenes de carga y de pasajeros, y locomotoras de maniobras), y el método de nivel 3 se apoya en datos de prueba detallados por modelo de locomotora específico.

#### Método de nivel 1

El método de nivel 1 permite estimar las emisiones de CN a partir del consumo total anual de combustible y un factor de emisión por defecto para locomotoras. Los datos de actividad para este nivel metodológico son de alcance nacional, estatal o regional, o bien otra escala espacial requerida para el inventario. El método de nivel 1 se basa en la siguiente ecuación:

$$E_{CN} = Q \times FE_{PM_{2.5}} \times FS_{CN/PM_{2.5}}$$

Donde:

$E_{CN}$	=	emisiones de carbono negro
$Q$	=	cantidad de combustible utilizado por locomotora
$FE_{PM_{2.5}}$	=	factor de emisión de $PM_{2.5}$ correspondiente al combustible de la locomotora
$FS_{CN/PM_{2.5}}$	=	factor de especiación para convertir $PM_{2.5}$ en carbono negro, para locomotoras

#### Método de nivel 2

El método de nivel 2 representa los diferentes tipos de locomotora. Los datos de actividad para este nivel metodológico son de alcance nacional, estatal o regional, o bien otra escala espacial requerida para el inventario. Para aplicar este método, tal vez sea necesario trabajar con empresas de ferrocarriles y asociaciones gremiales, a fin de obtener los datos de actividad requeridos. El método de nivel 2 se basa en la siguiente ecuación:

$$E_{CN} = \sum_i (Q_i \times FE_{i,PM_{2.5}}) \times FS_{CN/PM_{2.5}}$$

Donde:

$E_{CN}$	=	emisiones de carbono negro
$i$	=	tipo de operación ferroviaria (tren de carga o de pasajeros, y patio de maniobras)
$Q_i$	=	cantidad de combustible para locomotora consumido, por operación ferroviaria tipo “i”
$FE_{i,PM_{2.5}}$	=	factor de emisión de $PM_{2.5}$ para operación ferroviaria tipo “i”
$FS_{CN/PM_{2.5}}$	=	factor de especiación para convertir $PM_{2.5}$ en CN para locomotoras

#### Método de nivel 3

El método de nivel 3 se basa en características detalladas de las locomotoras (combinación de marca de locomotora y motor; por ejemplo: locomotora GE ES40DC equipada con motor GEVO-12), así como de la

actividad, que tiene mayor aplicabilidad en la integración de inventarios locales cuando se dispone de información detallada sobre el movimiento de trenes. Para obtener los datos de actividad y de pruebas de motores con el grado de detalle que se requiere para la aplicación de este método, será necesario trabajar con empresas de ferrocarriles y fabricantes de motores. El método de nivel 3 se basa en la siguiente ecuación:

$$E_{CN} = \sum_c (H_c \times FE_{c,PM_{2.5}}) \times FS_{CN/PM_{2.5}}$$

Donde:

- $E_{CN}$  = emisiones de carbono negro
- $c$  = combinación de marca de locomotora y motor
- $H_c$  = horas de operación para combinación de marca de locomotora y motor “c”
- $FE_{c,PM_{2.5}}$  = factor de emisión para combinación de marca de locomotora y motor “c”. Si se dispone de información detallada, los factores de emisión deben ponderarse para los diferentes ajustes de potencia del motor (muecas en el controlador), con base en cuánto tiempo normalmente se coloca en cada muesca de ajuste. Con ello se generaría un factor de emisión agregado que puede aplicarse al total de horas de operación.
- $FS_{CN/PM_{2.5}}$  = factor de especiación para convertir  $PM_{2.5}$  en carbono negro para locomotoras

### Posibles fuentes de datos de actividad, así como de factores de emisión y de especiación

En el cuadro 3.3-3 se muestran posibles fuentes de datos de actividad, factores de emisión y factores de especiación para la aplicación de los métodos de niveles 1, 2 y 3 a fin de calcular las emisiones de CN generadas por locomotoras en América del Norte. Los factores de emisión y de especiación específicos recomendados para el nivel 1 se presentan en una serie de cuadros por sector o fuente, en el apéndice B.

**Cuadro 3.3-3. Posibles fuentes de factores de emisión y especiación, así como de datos de actividad para locomotoras**

Parámetro	Canadá	Estados Unidos	México
<b>Nivel 1</b>			
Datos sobre el consumo de combustible	<i>Report on Energy Supply and Demand in Canada</i> (RESO) [Informe de oferta y demanda de energía en Canadá] (Statistics Canada, 2015a)	Administración de Información sobre Energía ( <i>Energy Information Administration</i> , EIA) (EIA, 2015b)	Pemex
Factor de emisión ( $PM_{2.5}$ )	Estudio sobre factores de emisión de locomotoras de la EPA (EPA, 2009b)		
Factor de especiación (CE o CN)	Modelo MOVES (EPA, 2014a)		
<b>Nivel 2</b>			
Consumo de combustible por tipo de locomotora	Operadores de ferrocarriles; Asociación Canadiense del Transporte Ferroviario ( <i>Railway Association of Canada</i> )	Operadores de ferrocarriles; Asociación Estadounidense de Ferrocarriles ( <i>Association of American Railroads</i> ); Asociación Estadounidense de Trenes de Cercanías y Regionales	Operadores de ferrocarriles; Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT)

Parámetro	Canadá	Estados Unidos	México
		( <i>American Short Line and Regional Railroad Association</i> ); datos del informe R-1 de la Comisión de Transporte Terrestre de Estados Unidos ( <i>US Surface Transportation Board, STB</i> ) (STB, 2015)	
Factor de emisión (PM <sub>2.5</sub> )	Estudio sobre factores de emisión de locomotoras de la EPA (EPA, 2009b)		
Factor de especiación (CE o CN)	Modelo MOVES (EPA, 2014a)		
Nivel 3			
Datos de actividad por locomotora específica	Operadores de ferrocarriles		
Factor de emisión (PM <sub>2.5</sub> )	Fabricantes de locomotoras; documento de orientación de la EPA (apéndice 6-6, EPA, 1992)		
Factor de especiación (CE o CN)	Modelo MOVES (EPA, 2014a)		

### 3.3.4 Embarcaciones

Las emisiones de carbono negro generadas por embarcaciones marinas comerciales son el producto de la combustión de diésel o mezclas de carburantes residuales asociada con el movimiento de carga y la prestación de servicios marítimos asociados con la pesca, el apoyo a actividades de extracción petrolera y de gas en aguas profundas, la investigación y las operaciones militares. Ello incluye lo mismo embarcaciones de gran calado que transitan por aguas internacionales, que barcos pequeños utilizados para operaciones en aguas costeras y continentales nacionales.

En este apartado no se abordan las emisiones generadas por el suministro de corriente a embarcaciones en muelles portuarios, puesto que la fuente de emisión primaria en este caso es la generación de la electricidad (véase el apartado 3.2.1). Obsérvese, además, que las actividades de transbordo de carga y el equipo para el manejo de carga a pie de muelle tampoco se tratan en este apartado, pero sí en el correspondiente a fuentes carreteras (apartado 3.3.1) y fuentes móviles que no circulan por carretera (apartado 3.3.2), respectivamente.

El método de nivel 1 se basa en datos agregados sobre combustible; el de nivel 2, en datos de actividad en términos de kilovatio por hora (kWh), por tipo de embarcación, y el método de nivel 3 también utiliza los datos en kWh, pero se apoya en datos por embarcación específica para cuantificar la electricidad generada por las embarcaciones, con lo cual se puede obtener una estimación más precisa de las emisiones en comparación con los métodos de niveles inferiores. Cabe señalar que quizás la solución más conveniente para ciertos inventarios sea una combinación de niveles (por ejemplo, el rastreo de embarcaciones de gran calado mediante datos del Sistema de Identificación Automática [*Automatic Identification System, AIS*], para facilitar el uso del método de nivel 3, mientras que para embarcaciones de menor tamaño bastará con un método de nivel 1 basado en el consumo de combustible).

#### Método de nivel 1

Con el método de nivel 1 pueden estimarse las emisiones de CN a partir del consumo total anual de combustible y un factor de emisión predeterminado para embarcaciones. A fin de obtener los datos adecuados sobre el consumo de combustible, tal vez sea necesario ponerse en contacto con las



dependencias de energía correspondientes en el país de interés que llevan un registro del consumo de combustible marítimo. El método de nivel 1 se basa en la siguiente ecuación:

$$E_{CN} = \sum_i (Q_i \times FE_{i,PM_{2.5}} \times FS_{i,CN/PM_{2.5}})$$

Donde:

$E_{CN}$	=	emisiones de carbono negro del consumo total de combustible marítimo
$i$	=	tipo de combustible (diésel o mezcla de carburantes residuales)
$Q_i$	=	cantidad de combustible marítimo utilizada, por combustible tipo “i”
$FE_{i,PM_{2.5}}$	=	factor de emisión de $PM_{2.5}$ para combustible marítimo tipo “i”
$FS_{i,CN/PM_{2.5}}$	=	factor de especiación para convertir $PM_{2.5}$ en carbono negro para combustible tipo “i”

### Método de nivel 2

El método de nivel 2 requiere datos de actividad, en términos de horas de operación al año por tipo de embarcación y operación navieras, ya sea de alcance nacional, estatal o regional, o bien otra escala espacial requerida para el inventario. A fin de obtener los datos de actividad por embarcación pertinentes, tal vez sea necesario ponerse en contacto con las dependencias de transporte dentro del país de interés que registran los movimientos navieros. El método de nivel 2 se basa en la siguiente ecuación:

$$E_{CN} = \sum_{i,j,k} (H_{i,j,k} \times PE_i \times FC_j \times FE_{k,PM_{2.5}} \times FS_{k,CN/PM_{2.5}})$$

Donde:

$E_{CN}$	=	emisiones de carbono negro
$H_{i,j,k}$	=	horas de operación por embarcación tipo “i” en modo de operación “j” utilizando combustible tipo “k”
$i$	=	tipo de embarcación (por ejemplo, buque pesquero, transbordador, portacontenedores o cisterna)
$j$	=	modo de operación marítima (de crucero, de velocidad reducida, de maniobra y en estacionamiento)
$k$	=	tipo de combustible marítimo (diésel o mezcla de carburantes residuales)
$PE_i$	=	potencia de la embarcación para embarcación típica “i”
$FC_j$	=	factores de carga de operación típica para modalidad “j”
$FE_{k,PM_{2.5}}$	=	factor de emisión de $PM_{2.5}$ para combustible tipo “k”
$FS_{k,CN/PM_{2.5}}$	=	factor de especiación para convertir $PM_{2.5}$ en carbono negro para combustible tipo “k”

### Método de nivel 3

El método de nivel 3 se basa en características detalladas de las embarcaciones y datos de actividad para embarcaciones individuales que operan en el área de inventario. A fin de obtener los datos de actividad pertinentes, tal vez sea necesario ponerse en contacto con dependencias de transporte o puertos que registran los movimientos navieros, o bien recurrir a datos de rastreo satelital (por ejemplo, datos del AIS) para el movimiento individual de buques. El método de nivel 3 utiliza la ecuación del nivel 2, aunque los datos de actividad y factores de emisión se basan en operaciones por embarcación específica.

### Posibles fuentes de datos de actividad, así como de factores de emisión y de especiación

En el cuadro 3.3-4 se muestran posibles fuentes de datos de actividad, factores de emisión y factores de especiación para la aplicación de los métodos de niveles 1, 2 y 3 a fin de calcular las emisiones de CN generadas por fuentes marítimas en América del Norte. Los factores de emisión y de especiación específicos recomendados para el nivel 1 se presentan en una serie de cuadros por sector o fuente, en el apéndice B.

**Cuadro 3.3-4. Posibles fuentes de factores de emisión y especiación, así como de datos de actividad para fuentes marítimas**

Parámetro	Canadá	Estados Unidos	México
<b>Nivel 1</b>			
Datos sobre el consumo de combustible	<i>Report on Energy Supply and Demand in Canada</i> (RESO) [Informe de oferta y demanda de energía en Canadá] (Statistics Canada, 2015a)	Administración de Información sobre Energía ( <i>Energy Information Administration</i> , EIA) (EIA, 2015b)	Pemex
Factor de emisión (PM <sub>2.5</sub> )	Declaración de Análisis de Impacto de la Reglamentación ( <i>Regulatory Impact Analysis</i> ) de la EPA de EU (Categorías 1 y 2, EPA, 2007; Categoría 3, EPA, 2009c) y <i>Reduction of GHG Emission From Ships</i> [Mitigación de las emisiones de GEI de buques] de la Organización Marítima Internacional (OMI) (OMI, 2014)		
Factor de especiación (CE o CN)	<i>Informe al Congreso sobre el carbono negro (Report to Congress on Black Carbon)</i> de la EPA (EPA, 2013a, pp. 276- 278)		
<b>Nivel 2</b>			
Actividad (kWh) por tipo de embarcación	Cuestionario sobre transporte marítimo costero [ <i>Coastwise Shipping Survey</i> ]: Informe sobre transporte marítimo nacional; formulario S.1 [ <i>Domestic Shipping Report—S.1</i> ], e Informe sobre transporte marítimo; formulario S.4: operadores de remolcadores y transbordadores [ <i>Shipping Report—Towboat and Ferry Operators</i> ] (Statistics Canada, 2012)	Datos de ingreso y despacho de embarcaciones: Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos ( <i>US Army Corps of Engineers</i> , USACE) (USACE, 2015a), y Centro de Estadísticas de Comercio Marítimo ( <i>Waterborne Commerce Statistics Center</i> ) (USACE, 2015b)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• SCT</li> <li>• Datos de ingreso y despacho de embarcaciones: Secretaría de Marina</li> </ul>
Factor de emisión (PM <sub>2.5</sub> )	Declaración de Análisis de Impacto de la Reglamentación ( <i>Regulatory Impact Analysis</i> ) de la EPA de EU (Categorías 1 y 2, EPA, 2007; Categoría 3, EPA, 2009c) y <i>Reduction of GHG Emission From Ships</i> [Mitigación de las emisiones de GEI de buques] de la Organización Marítima Internacional (OMI) (OMI, 2014)		
Factor de especiación (CE o CN)	<i>Informe al Congreso sobre el carbono negro (Report to Congress on Black Carbon)</i> de la EPA (EPA, 2013a, pp. 276-278)		
<b>Nivel 3</b>			
Operaciones por embarcación específica	Datos aportados por puertos; ministerio de Transporte de Canadá ( <i>Transport Canada</i> ); datos AIS de la Guardia Costera	Datos de ingreso y despacho de embarcaciones: Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos ( <i>US Army</i>	Datos de ingreso y despacho de embarcaciones: Secretaría de Marina y datos AIS suministrados por

Parámetro	Canadá	Estados Unidos	México
	Canadiense ( <i>Canadian Coast Guard, CCG</i> ) (CCG, 2015)	<i>Corps of Engineers, USACE</i> (USACE, 2015a), y datos AIS de la Guardia Costera de Estados Unidos ( <i>US Coast Guard</i> )	proveedores
Características de las embarcaciones	Registro de buques de IHS ( <i>IHS Registry of Ships</i> ) (IHS, 2015)		
Factor de emisión (PM <sub>2.5</sub> )	Declaración de Análisis de Impacto de la Reglamentación ( <i>Regulatory Impact Analysis</i> ) de la EPA de EU (Categorías 1 y 2, EPA, 2007; Categoría 3, EPA, 2009c) y <i>Reduction of GHG Emission From Ships</i> [Mitigación de las emisiones de GEI de buques] de la Organización Marítima Internacional (OMI) (OMI, 2014)		
Factor de especiación (CE o CN)	<i>Informe al Congreso sobre el carbono negro (Report to Congress on Black Carbon)</i> de la EPA (EPA, 2013a, pp. 276-278)		

### 3.3.5 Aviación

Las emisiones de carbono negro generadas por actividades aeronáuticas proceden de la combustión de gasolina de aviación y carburante para turbinas (o turbosina) asociada al transporte de pasajeros y carga, al igual que a otras actividades aeronáuticas como monitoreo de tráfico, extinción de incendios y operaciones militares. Estas actividades se efectúan con aeronaves de dos tipos: avionetas de ala fija y helicópteros pequeños de pistones que utilizan gasolina de aviación, por un lado, y helicópteros y aviones medianos y grandes, equipados con turbopropulsores, turbofanos y motores de reacción o propulsión de chorro que consumen turbosina.

El método de nivel 1 se basa en datos agregados sobre el combustible; el de nivel 2 genera estimaciones a escala de aeropuerto, por tipo de aeronave en general (por ejemplo: comercial, taxi aéreo, aviación general y militar), y el nivel 3 requiere información detallada sobre los movimientos de las aeronaves para combinaciones específicas de modelos de aeronave y motor, y rutas específicas. Por ello, cuando se requiera generar un inventario integral adecuado, tal vez será necesario adoptar un método multinivel. Por ejemplo, quizá se disponga de información detallada para operadores aéreos comerciales que utilizan aeropuertos internacionales, mientras que, para aeropuertos urbanos regionales, sólo se disponga de conteos de ciclos de aterrizajes y despegues (*landing and take-off, LTO*) por tipo de aeronave, lo que implicaría adoptar una metodología híbrida que aplique los niveles 2 y 3.

Es importante señalar que el tema de los vehículos y equipo de apoyo en tierra en los aeropuertos se trata en los apartados 3.3.1 (“Fuentes carreteras”) y 3.3.2 (“Fuentes móviles que no circulan por carretera”), respectivamente. Para calcular las emisiones de otras fuentes estacionarias que operan en un aeropuerto, como calderas, generadores de electricidad e incineradores, se recomienda la aplicación de los métodos presentados en el apartado 3.2. Las presentes directrices no incluyen las emisiones generadas por cohetes.

#### Método de nivel 1

El método de nivel 1 permite estimar las emisiones de CN a partir del consumo total anual de combustible y un factor de emisión por defecto para actividades aeronáuticas. A fin de obtener los datos pertinentes sobre el consumo de combustible, tal vez sea necesario ponerse en contacto con dependencias de energía en cada país de interés que lleven un registro del consumo de combustible de operaciones de aviación. El método de nivel 1 se basa en la siguiente ecuación:

$$E_{CN} = \sum_i (Q_i \times FE_{i,PM_{2.5}} \times FS_{i,CN/PM_{2.5}})$$

Donde:

$E_{CN}$	=	emisiones de carbono negro procedentes del consumo total de combustible en operaciones aeronáuticas
$i$	=	tipo de combustible (gasolina de aviación o turbosina [carburante para turbinas]). Obsérvese que los motores de pistones asociados con aeronaves y helicópteros pequeños consumen gasolina de aviación, mientras que la turbosina (carburante para turbinas) se utiliza en helicópteros y aviones grandes equipados con turbopropulsores, turbofanes y motores de reacción o propulsión de chorro
$Q_i$	=	cantidad de combustible de aviación consumido, por combustible tipo “i”
$FE_{i,PM_{2.5}}$	=	factor de emisión de $PM_{2.5}$ para combustible de aviación tipo “i”
$FS_{i,CN/PM_{2.5}}$	=	factor de especiación para convertir $PM_{2.5}$ en carbono negro para combustible tipo “i”

### Método de nivel 2

El método de nivel 2 requiere datos de actividad en términos de ciclos de aterrizaje y despegue (LTO, por sus siglas en inglés) en un aeropuerto en un año, por tipo de aeronave en general (operadores aéreos comerciales, taxi aéreo, aviación general y operaciones militares), por lo que es preciso ponerse en contacto con las dependencias de transporte encargadas de monitorear movimientos aeronáuticos. Con el propósito de incluir las emisiones de CN generadas en la modalidad “de crucero”, es necesario adoptar el método de nivel 1 de combustible total; la diferencia entre las estimaciones obtenidas por el método de nivel 1 y el de nivel 2 ofrece una aproximación agregada de las emisiones en crucero. El método de nivel 2 se basa en la siguiente ecuación:

$$E_{CN} = \sum_{i,j} (LTO_{i,j} \times FE_{i,j,PM_{2.5}} \times FS_{i,j,CN/PM_{2.5}})$$

Donde:

$E_{CN}$	=	emisiones de carbono negro
$LTO_{i,j}$	=	ciclos de actividades anuales de aterrizaje y despegue en un aeropuerto para aeronave tipo “i” utilizando combustible tipo “j”
$i$	=	tipo de aeronave (operadores aéreos comerciales, taxis aéreos y aviación general y militar)
$j$	=	tipo de combustible para aeronaves (gasolina de aviación o turbosina [carburante para turbinas])
$FE_{i,j,PM_{2.5}}$	=	factor de emisión de $PM_{2.5}$ para aeronave tipo “i” y combustible tipo “j”
$FS_{i,j,CN/PM_{2.5}}$	=	factor de especiación para convertir $PM_{2.5}$ en carbono negro para combustible tipo “j”

### Método de nivel 3

Cuando se cuenta con información detallada sobre actividades aeronáuticas, se recomienda la adopción de un método de nivel 3, lo que implica utilizar el modelo más reciente para el cálculo de emisiones de la Administración de la Aviación Federal (*Federal Aviation Administration*, FAA) de Estados Unidos: la Herramienta de manejo ambiental para la industria aeronáutica (*Aviation Environmental Design Tool*,

AEDT) (FAA, 2015a). Environment Canada creó un modelo propio, conocido como AGEM,<sup>2</sup> que se emplea lo mismo para el Informe del Inventario Nacional (*National Inventory Report*, NIR) que para el Inventario de Emisiones de Contaminantes Atmosféricos (*Air Pollutant Emission Inventory*, APEI). Estos modelos se emplean para calcular emisiones a escala de aeropuerto para ciclos de aterrizaje y despegue por aeronave individual. Debe señalarse que la nueva versión del modelo AEDT no incluye un componente que permita estimar las emisiones en modalidad de crucero, aunque se prevé que una futura versión de este modelo tal vez incorpore el Sistema para evaluar las emisiones mundiales de la aviación (*System for Assessing Aviation's Global Emissions*, SAGE) de la FAA, que comprendería las emisiones de crucero (FAA, 2015b). Hasta que se integren estos dos modelos, será necesario ejecutarlos por separado. La información necesaria para correr estos modelos puede obtenerse de dependencias o aeropuertos que monitorean tráfico aéreo; o tal vez haya que ponerse en contacto directamente con las aerolíneas para obtener información detallada sobre su flota y nivel de actividad.

### Posibles fuentes de datos de actividad, así como de factores de emisión y de especiación

En el cuadro 3.3-5 se muestran posibles fuentes de datos de actividad, factores de emisión y factores de especiación para la aplicación de los métodos de niveles 1, 2 y 3 a fin de calcular las emisiones de CN generadas por fuentes aeronáuticas en América del Norte. Los factores de emisión y de especiación específicos recomendados para el nivel 1 se presentan en una serie de cuadros por sector o fuente, en el apéndice B.

**Cuadro 3.3-5. Posibles fuentes de datos de actividad, así como de factores de emisión y de especiación para fuentes aeronáuticas**

Parámetro	Canadá	Estados Unidos	México
<i>Nivel 1</i>			
Consumo agregado de combustible	<i>Report on Energy Supply and Demand in Canada</i> (RESO) [Informe de oferta y demanda de energía en Canadá] (Statistics Canada, 2015a)	Oficina de Estadísticas del Transporte del Departamento de Transporte ( <i>Department of Transportation/ Bureau of Transportation Statistics</i> ) (BTS, 2015a)	Pemex
Factor de emisión (PM <sub>2.5</sub> )	APEI (Environment Canada, 2014)	Inventario Nacional de Emisiones ( <i>National Emissions Inventory</i> ) de Estados Unidos (EPA, 2013a)	
Factor de especiación (CN)	<i>Informe al Congreso sobre el carbono negro</i> ( <i>Report to Congress on Black Carbon</i> ) de la EPA (EPA, 2013a, pp. 278-279)		
<i>Nivel 2</i>			
Datos LTO, por tipo de aeronave	Estadísticas sobre el movimiento de aeronaves (Transport Canada, 2015)	Datos de pronósticos en terminales aéreas de la FAA (FAA, 2015c)	SCT
Factor de emisión (PM <sub>2.5</sub> )	APEI (Environment Canada, 2014)	Inventario Nacional de Emisiones ( <i>National Emissions Inventory</i> ) de Estados Unidos (EPA, 2011a)	
Factor de especiación (CN)	<i>Informe al Congreso sobre el carbono negro</i> ( <i>Report to Congress on Black Carbon</i> ) de la EPA (EPA, 2013a, pp. 278-279)		

<sup>2</sup> Modelo de emisiones de gases de efecto invernadero generadas por la industria aeronáutica (*Aviation Greenhouse Gas Emission Model*, AGEM); disponible en: <[www.ledevoir.com/documents/pdf/bilan\\_ONU.pdf](http://www.ledevoir.com/documents/pdf/bilan_ONU.pdf)>.

Parámetro	Canadá	Estados Unidos	México
<i>Nivel 3</i>			
Datos de actividad por aeronave específica	NAV Canada	Aerolíneas o aeropuertos; información de la base de datos T-100 de la Oficina de Estadísticas del Transporte del Departamento de Transporte ( <i>Department of Transportation/Bureau of Transportation Statistics</i> ) (BTS, 2015b)	Aerolíneas o aeropuertos
Factor de emisión (PM <sub>2.5</sub> )	Herramienta de manejo ambiental para la industria aeronáutica ( <i>Aviation Environmental Design Tool, AEDT</i> ) (FAA, 2015a); Sistema para evaluar las emisiones mundiales de la aviación ( <i>System for Assessing Aviation's Global Emissions, SAGE</i> ) (FAA, 2015b)		
Consumo de combustible por aeronaves en modo de crucero	Para aeronaves no incluidas en el SAGE, pueden requerirse datos de la Base de Datos de la Aviación ( <i>Base of Aircraft Data, BADA</i> ) de la Organización Europea para la Seguridad de la Navegación Aérea (Eurocontrol) o información proporcionada por fabricantes de aeronaves		
Factor de especiación (CN)	<i>Informe al Congreso sobre el carbono negro (Report to Congress on Black Carbon)</i> de la EPA (EPA, 2013a, pp. 278-279)		

### 3.4 Combustión doméstica

La combustión doméstica comprende aquella que se lleva a cabo en un contexto “de hogar” para cocina, calefacción u otros fines en el ámbito residencial. Los combustibles que se consumen con fines domésticos comprenden: petróleo, carbón, gas licuado de petróleo (gas LP), queroseno, gas natural y madera. Entre los aparatos de combustión que normalmente se utilizan en casa figuran: calentadores de poca capacidad, calefactores, estufas, chimeneas —incluidas las empotradas—, braseros de leña para calefacción y estufas de leña y de madera granulada (*pellet*). Las estufas de leña pueden desagregarse aún más en función del tipo de tecnología; por ejemplo: convencionales, certificadas, avanzadas y de eficiencia energética.

Se calcula que, sólo en México, entre 22 y 25 millones de personas utilizan madera para cocinar o como calefacción, principalmente en zonas rurales de los estados de Chiapas, Guanajuato, Guerrero, Hidalgo, Michoacán, Oaxaca, Puebla, Quintana Roo, Tabasco, Veracruz y Yucatán. Estimaciones recientes muestran que la leña supuso 34 por ciento del abasto de energía para consumo doméstico en el país en 2009, cifra que se ha mantenido relativamente constante en los últimos años. Aunque la adopción de estufas más limpias y eficientes aumenta gradualmente, los fogones abiertos tradicionales y menos eficientes siguen predominando (GIRA, 2012). Según estudios recientes, resulta particularmente difícil encontrar información sobre el consumo de leña en México, porque la mayor parte de la madera se adquiere y consume al margen del mercado formal. Además, hay una enorme variabilidad en cuanto al consumo entre una región y otra del país (es decir, la diversidad vegetal, factor que determina la disponibilidad de leña, cambia en función de la situación geográfica y las condiciones meteorológicas), además de que es cada vez mayor el número de hogares rurales que recurre a una combinación de combustibles (esto es, gas LP y madera), al disponerse de gas LP en más regiones. Asimismo, actualmente es imposible diferenciar entre el uso de los distintos combustibles: si se utilizan como calefacción o para cocinar (GIRA, 2012, p. 10). Sin embargo, cada vez se dispone de más material publicado en torno a factores de emisión, sobre todo para estimar los beneficios en cuanto a mitigación del cambio climático y para la salud que supone la introducción de estufas eficientes en hogares rurales, donde predominan los fogones tradicionales para la cocina y la calefacción. De igual manera, los datos de actividad —número y tipo de artefactos para cocinar— cada vez son más precisos, sobre todo para zonas donde las políticas públicas están encaminadas a reemplazar los fogones abiertos por estufas cerradas y más eficientes. De

estos estudios se derivan datos de actividad y sobre factores de emisión pertinentes para estimar las emisiones de carbono negro.

### Método de nivel 1

Un método de nivel 1 permite estimar las emisiones de CN a partir de datos sobre el consumo de combustible a escala nacional para todos los tipos de combustible. Este método —que es el mismo que se emplea para fuentes de los sectores energético e industrial— se basa en la siguiente ecuación:

$$E_{CN} = \sum_i (Q_i \times FE_{i,PM_{2.5}} \times FS_{i,CN/PM_{2.5}})$$

Donde:

$E_{CN}$	=	emisiones de carbono negro procedentes del consumo de combustible (suma de emisiones de todos los combustibles)
$i$	=	tipo de combustible
$Q_i$	=	cantidad de combustible “i”
$FE_{i,PM_{2.5}}$	=	factor de emisión de $PM_{2.5}$ para combustible tipo “i”
$FS_{i,CN/PM_{2.5}}$	=	factor de especiación para convertir $PM_{2.5}$ en CN, para combustible tipo “i”

### Método de nivel 2

Con un método de nivel 2 se diferencian los factores de emisión por artefacto o tecnología utilizada, y tipo de combustible. Los datos de actividad para este método 2 son de alcance nacional, estatal o regional, o bien otra escala espacial requerida para el inventario. El método de nivel 2 se basa en la siguiente ecuación:

$$E_{CN} = \sum_{i,j} (Q_{i,j} \times FE_{i,j,PM_{2.5}}) \times FS_{CN/PM_{2.5}}$$

Donde:

$E_{CN}$	=	emisiones de carbono negro
$i$	=	tipo de combustible
$j$	=	tipo de artefacto o tecnología
$Q_{i,j}$	=	cantidad de combustible “i” consumido en el artefacto o tecnología tipo “j”
$FE_{i,j,PM_{2.5}}$	=	factor de emisión de $PM_{2.5}$ para combustible tipo “i” y artefacto o tecnología tipo “j”
$FS_{CN/PM_{2.5}}$	=	factor de especiación para convertir $PM_{2.5}$ en carbono negro

Con el objeto de estimar la cantidad de madera quemada y las emisiones generadas a partir de la combustión doméstica de madera en Estados Unidos, puede aplicarse el método de nivel 2 utilizando la herramienta para estimar las emisiones de combustión doméstica de madera (*Residential Wood Combustion [RWC] Emission Estimation Tool*) (EPA, 2013b). Esta herramienta aporta los perfiles de los artefactos (la distribución de hogares en un condado que emplean los distintos tipos de artefacto) y las tasas de combustión (esto es, la cantidad de madera que quema cada artefacto en un año). Dado que contiene datos obtenidos de cuestionarios realizados con el propósito de generar los perfiles de los artefactos y las tasas de combustión correspondientes a escala de condado, el uso de esta herramienta resulta pertinente únicamente para estimar emisiones generadas por la combustión doméstica de madera en Estados Unidos. Si se opta por emplear el método de nivel 2 respecto de otros combustibles, será necesario disponer de fuentes de datos locales a fin de determinar la cantidad de combustible consumido en artefactos específicos, lo que podría resultar un método poco viable en numerosas iniciativas de elaboración de inventarios.

En México puede emplearse el método de nivel 2 para estimar las emisiones generadas por la cocina y la calefacción en fuentes residenciales a partir de datos a escala de los hogares, lo mismo para la combustión de madera únicamente que para el consumo combinado de madera y gas LP.

### Método de nivel 3

El método más viable para estimar emisiones generadas por la combustión doméstica se basa en datos para una superficie extensa, a saber: una ciudad, condado o municipio, estado o provincia, o país. Por ello, los métodos de nivel 1 o 2 resultan los más convenientes para este sector. Hasta el momento, no se ha determinado un método de nivel 3.

### Posibles fuentes de datos de actividad, así como de factores de emisión y de especiación

En el cuadro 3.4-1 se muestran posibles fuentes de datos de actividad, factores de emisión y factores de especiación (cuando corresponda) para la aplicación de los métodos de niveles 1 y 2 a fin de calcular las emisiones de CN procedentes del consumo doméstico de combustibles en América del Norte. Los factores de emisión y de especiación específicos recomendados para el nivel 1 se presentan en una serie de cuadros por sector o fuente, en el apéndice B.

**Cuadro 3.4-1. Posibles fuentes de factores de emisión y especiación, así como de datos de actividad para la combustión doméstica**

Parámetro	Canadá	Estados Unidos	México
<b>Nivel 1</b>			
Cantidad de combustible	<i>Report on Energy Supply and Demand in Canada</i> (RESD) [Informe de oferta y demanda de energía en Canadá] (Statistics Canada, 2015a)	AEO (EIA, 2015a)	GIRA, 2012
Factor de emisión	WebFIRE (EPA, 2015b); Inventario Nacional de Emisiones ( <i>National Emissions Inventory</i> , NEI) de Estados Unidos 2011 (EPA, 2013b); Consejo de Recursos Atmosféricos de California ( <i>California Air Resources Board</i> , CARB), 2014	PM <sub>2.5</sub> ; WebFIRE (EPA, 2015b); NEI, 2011 (EPA, 2013b); CARB, 2014	Christian <i>et al.</i> (2010), <i>BC for cooking fires and cook stoves</i> [CN emitido por fogones y estufas para cocinar]
Factor de especiación (CE o CN)	Base de datos SPECIATE (EPA, 2011b); se utiliza el factor de CE para CN	Base de datos SPECIATE (EPA, 2011b); se utiliza el factor de CE para CN	No procede
<b>Nivel 2</b>			
Cantidad de combustible (por tecnología o artefacto)	<ul style="list-style-type: none"> <li>RESD (Statistics Canada, 2015a)</li> <li>Información obtenida de proveedores de combustible y empresas particulares</li> <li>Estudios sobre conservación de energía y mitigación de los efectos del cambio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><i>Para madera:</i> Herramienta para estimar las emisiones de combustión doméstica de madera (<i>Residential Wood Combustion [RWC] Emission Estimation Tool</i>) de la EPA (EPA, 2013b)</li> <li><i>Para otros combustibles:</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>Información obtenida de los proveedores de</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Total de hogares; porcentaje de hogares totales que utilizan leña como combustible: Inegi</li> <li>Porcentaje de hogares que utilizan leña exclusivamente, y otros combustibles (a escala municipal): GIRA, 2012</li> <li>Ocupación promedio por</li> </ul>



Parámetro	Canadá	Estados Unidos	México
	climático para los sectores pertinentes <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cuestionarios aplicados en los sectores residencial, comercial, institucional y agrícola</li> <li>• Modelización de la demanda energética</li> </ul>	combustible y empresas particulares <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Estudios sobre conservación de energía y mitigación de los efectos del cambio climático para los sectores pertinentes</li> <li>○ Cuestionarios aplicados en los sectores residencial, comercial, e institucional y agrícola</li> <li>○ Modelización de la demanda energética</li> </ul>	hogar (promedio nacional): GIRA, 2012 <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ocupación promedio por hogar: Conapo</li> <li>• Consumo per cápita de madera, por tipo de madera, en función de la región macroecológica (a escala municipal): GIRA, 2012</li> <li>• Consumo y eficiencia de combustible, por tipo de tecnología</li> </ul>
Factor de emisión (PM <sub>2.5</sub> ) (por combustible y artefacto)	PM <sub>2.5</sub> : EMEP-AEMA, 2013 (capítulo 1.A.4)	PM <sub>2.5</sub> para madera: Herramienta para estimar las emisiones de combustión doméstica de madera de la EPA (EPA, 2013b)	Christian <i>et al.</i> (2010), <i>BC for cooking fires and cook stoves</i> [CN emitido por fogones y estufas]
Factor de especiación (CE o CN) (por combustible y artefacto)	Base de datos SPECIATE (EPA, 2011b); se utiliza el factor de CE para CN	Base de datos SPECIATE (EPA, 2011b); se utiliza el factor de CE para CN	Zhang, 2012; base de datos SPECIATE (EPA, 2011b); en la base de datos SPECIATE, se utiliza el factor de CE para CN

### 3.5 Otras fuentes

El sector correspondiente a otras fuentes comprende diferentes fuentes de combustión que no forman parte de los sectores específicos cubiertos en las presentes directrices, a saber: cocina al carbón o comercial; cremación; incendios estructurales y de vehículos, y quema de desechos sólidos urbanos a cielo abierto.

Entre otras fuentes objeto de investigación como parte del sector de otras fuentes se incluye polvo por tránsito en caminos pavimentados y sin pavimentar, y suelos en instalaciones industriales y de productos lácteos. En el curso de la fase correspondiente a la revisión documental no se identificaron estudios para la categoría de suelos de instalaciones industriales y de explotaciones lecheras. Se dispone, en cambio, de métodos para estimar partículas suspendidas procedentes de polvo por tránsito en caminos pavimentados y sin pavimentar en el documento AP-42 sobre factores de emisión para contaminantes atmosféricos de la EPA (EPA, 1995a). Las emisiones de carbono negro procedentes del polvo generado por el tránsito en vías pavimentadas y no pavimentadas corresponden principalmente a vehículos automotores y están cubiertas dentro del sector de fuentes móviles. Además, debido a la incertidumbre asociada con los métodos de estimación para el polvo por el tránsito en caminos pavimentados y sin pavimentar y su contribución relativamente baja a las emisiones de CN, los métodos correspondientes a esta categoría no se incluyeron en las presentes directrices.

#### 3.5.1 Cocina al carbón (cocina comercial)

La combustión incompleta durante actividades de cocina al carbón o a la parrilla da lugar a emisiones de CN y PM<sub>2.5</sub>. Las instalaciones comerciales de este tipo de cocina constituyen una fuente importante de emisiones de materia particulada con diámetros aerodinámicos iguales o menores de 10 µm (PM<sub>10</sub>) y de 2.5 µm (PM<sub>2.5</sub>) en el conjunto de los inventarios de emisiones de fuentes no puntuales. La magnitud de emisiones de partículas de materia fina depende, en gran medida, del tipo de equipo que se utilice para cocinar, así como de la carne a asar. Una de las principales fuentes de partículas suspendidas son

precisamente los asadores con la fuente de calor en la parte inferior, en comparación con otras operaciones con equipo para asar a la parrilla. Los asadores al carbón con la fuente de calor en la parte inferior constan de tres componentes principales: una fuente de calor, una superficie de cocción por calor radiante a alta temperatura y una parrilla ranurada. La carne se coloca sobre la parrilla para exponerla a la superficie de calor radiante que se encuentra en la parte inferior. En el momento en que la grasa de la carne cae sobre la superficie radiante a alta temperatura es cuando se generan las emisiones de partículas de materia fina. El combustible que se utiliza con mayor frecuencia para los asadores de carne con la fuente de calor en la parte inferior es el gas natural, aunque también llegan a utilizarse otro tipo de combustibles (sólidos). Esta categoría —que comprende asadores, parrillas, fogones y parrillas a fuego directo— contribuye a la mayor parte de las emisiones procedentes del sector de cocina comercial.

### **Método de nivel 1**

El método de nivel 1 para estimar emisiones procedentes de la cocina al carbón se basa en el tipo de equipo utilizado para tal fin. Este método se sustenta en factores de emisión per cápita y la población del área de inventario. Los factores de emisión por persona dependen del tipo de equipo que se utilice para las actividades de cocina al carbón y comercial (parrillas de banda, parrillas con fuente de calor en la parte inferior, planchas planas y dobles, y freidoras). Los datos de actividad para el método de nivel 1 son de alcance nacional, estatal o regional, o bien otra escala espacial requerida para el inventario. El método de nivel 1 para esta categoría de fuente es independiente del consumo y tipo de combustible. Este método se basa en la siguiente ecuación, para los distintos tipos de equipo de cocina:

$$E_{CN} = \sum_j (POB_j \times FE_{j,PM_{2.5}}) \times FS_{CN/PM_{2.5}}$$

Donde:

$E_{CN}$	=	emisiones de carbono negro
$j$	=	tipo de equipo (parrillas de banda, parrillas con fuente de calor en la parte inferior, planchas planas y dobles, y freidoras)
$POB$	=	población de dispositivos de equipo tipo “j” en área de inventario
$FE_{j,PM_{2.5}}$	=	factor de emisión de $PM_{2.5}$ per cápita para equipo tipo “j”
$FS_{CN/PM_{2.5}}$	=	factor de especiación para convertir $PM_{2.5}$ en carbono negro

### **Métodos de nivel 2 y 3**

El método más viable para estimar las emisiones procedentes de operaciones de cocina al carbón se basa en datos de un área extensa, a saber: una ciudad, condado o municipio, estado o provincia, o país, así como en el tipo de equipo utilizado, como se muestra en el método de nivel 1. Por ello, datos de actividad más detallados, así como datos de medición o por instalación específica, que serían indicativos de un método de nivel 2 o 3, no resultan convenientes para este sector.

### **Posibles fuentes de datos de actividad, así como de factores de emisión y de especiación**

En el cuadro 3.5-1 se muestran posibles fuentes de datos de actividad, factores de emisión y factores de especiación para la aplicación del método de nivel 1 a fin de calcular las emisiones de CN procedentes de operaciones de cocina al carbón (cocina comercial) en América del Norte. Los factores de emisión y de especiación específicos recomendados para este nivel se presentan en una serie de cuadros por sector o fuente, en el apéndice B.

**Cuadro 3.5-1 Posibles fuentes de factores de emisión y especiación, así como de datos de actividad para operaciones de cocina al carbón (cocina comercial)**

Parámetro	Canadá	Estados Unidos	México
<i>Nivel 1</i>			
Población	Población y demografía de Canadá (Statistics Canada, 2015b)	Oficina de Censos de EU ( <i>US Census Bureau</i> ) (US Census Bureau, 2015)	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi, 2015)
Factor de emisión (PM <sub>2.5</sub> )	Inventario Nacional de Emisiones ( <i>National Emissions Inventory</i> , NEI) de Estados Unidos 2011 (EPA, 2013b)		
Factor de especiación (CE o CN)	Base de datos SPECIATE (EPA, 2011b); se utiliza el factor de CE para CN		

### 3.5.2 Cremación de restos humanos

La cremación consiste la reducción a cenizas de la caja mortuoria o ataúd, el cadáver y otros componentes de la caja, y por tanto entraña el consumo de combustibles, con mayor frecuencia: gas natural, combustóleo y electricidad.

Las partículas suspendidas en forma de polvo, hollín, ceniza y otras sin quemarse son producto de la combustión de la caja para cremación y su contenido, incluidos los restos humanos. Las tasas de emisión de materia particulada dependen del diseño del crematorio, la temperatura de combustión, el tiempo de retención de gases, el diseño y la temperatura de los ductos, junto con los dispositivos de control que se utilizan.

#### Método de nivel 1

El método de nivel 1 permite estimar las emisiones de partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 2.5 micrómetros (PM<sub>2.5</sub>) a partir de estadísticas nacionales sobre el número de cremaciones de restos humanos, para el que se aplica un factor de especiación de carbono negro. Puede utilizarse información detallada en vez de los factores por defecto, siempre que se disponga de ésta. El método de nivel 1 se basa en la siguiente ecuación:

$$E_{CN} = mortalidad_{tasa} \times \%_{cremación} \times peso_{prom} \times FE_{PM_{2.5}} \times FS_{CN/PM_{2.5}}$$

Donde:

$E_{CN}$	=	emisiones de carbono negro
$mortalidad_{tasa}$	=	número estimado de fallecimientos en el área de inventario
$\%_{cremación}$	=	porcentaje de cadáveres cremados
$peso_{prom}$	=	peso promedio de los cuerpos
$FE_{PM_{2.5}}$	=	factor de emisión de PM <sub>2.5</sub>
$FS_{CN/PM_{2.5}}$	=	factor de especiación para convertir PM <sub>2.5</sub> en carbono negro

#### Métodos de nivel 2 y 3

El método más viable para estimar emisiones procedentes de actividades de cremación se basa en datos correspondientes a un área extensa, a saber: una ciudad, condado o municipio, estado o provincia, o país. Por ello, datos de actividad más detallados o de medición y para instalaciones específicas que serían indicativos de un método de nivel 2 o 3 no resultan convenientes para este sector.

#### Posibles fuentes de datos de actividad, así como de factores de emisión y de especiación

En el cuadro 3.5-2 se muestran posibles fuentes de datos de actividad, factores de emisión y factores de especiación para la aplicación del método de nivel 1 a fin de calcular las emisiones de CN generadas por

actividades de cremación en América del Norte. Los factores de emisión y de especiación específicos recomendados para este nivel se presentan en una serie de cuadros por sector o fuente, en el apéndice B.

**Cuadro 3.5-2. Posibles fuentes de datos de actividad, así como de factores de emisión y especiación para actividades de cremación**

Parámetro	Canadá	Estados Unidos	México
<i>Nivel 1</i>			
Número de fallecimientos	Asociación de Crematorios de América del Norte ( <i>Cremation Association of North America, CANA</i> ), asociaciones de crematorios y contacto directo con operadores de crematorios	Contacto directo con operadores de crematorios	Asociaciones de crematorios y contacto directo con operadores de crematorios
% <sub>cremación</sub>	Asociación de Crematorios de América del Norte (CANA, 2015)		
Peso <sub>prom</sub>	Estudio de la EPA sobre crematorios (EPA, 1999)		
Factor de emisión (PM <sub>2.5</sub> )	Inventario Nacional de Emisiones ( <i>National Emissions Inventory, NEI</i> ) de Estados Unidos 2011 (EPA, 2013b)		
Factor de especiación (CE o CN)	Base de datos SPECIATE (EPA, 2011b); se utiliza el factor de CE para CN		

### 3.5.3 Incendios de edificios y vehículos

Entre los casos de incendio de estructuras se incluye la quema accidental de edificios y su contenido. Los materiales estructurales —como aislantes y madera—, junto con el contenido de los edificios —mobiliario, alfombras, ropa, papel y plástico—, al arder dan lugar a emisiones de PM<sub>2.5</sub>. Las emisiones producidas por los incendios de edificios dependen del tipo de estructura y materiales combustibles, así como de la cantidad de material que se consuma. Dadas las diferencias respecto de las combinaciones y cantidades de materiales combustibles presentes en estructuras comerciales, en comparación con las residenciales, las primeras se excluyen de esta categoría.

Las emisiones al aire procedentes de incendios accidentales de vehículos se incluyen en esta categoría. Al igual que los incendios de edificios, los vehiculares dependen de la carga de combustible (los componentes y el contenido del vehículo). Por lo general, todos los componentes no metálicos del vehículo —llantas, tapicería, molduras de madera, cinturones de seguridad, mangueras y partes de plástico— son susceptibles de combustión.

#### Método de nivel 1

El método de nivel 1 permite estimar las emisiones de PM<sub>2.5</sub> con base en estadísticas nacionales sobre el número de incendios de estructuras o vehículos. Este método se basa en la siguiente ecuación:

$$E_{CN} = TA_{incendios} \times FE_{PM_{2.5}} \times FS_{CN/PM_{2.5}}$$

Donde:

- $E_{CN}$  = emisiones de carbono negro
- $TA_{incendios}$  = tasa de actividad lo mismo para incendios de estructuras que de vehículos (número de incendios de estructuras o vehículos registrados en el área de inventario)
- $FE_{PM_{2.5}}$  = factor de emisión de PM<sub>2.5</sub> para incendios de estructuras o vehículos
- $FS_{CN/PM_{2.5}}$  = factor de especiación para convertir PM<sub>2.5</sub> en carbono negro para incendios de estructuras o vehículos

## Método de nivel 2

Aunque guarda similitud con el método de nivel 1, el nivel 2 da cuenta de datos sobre la carga de combustible en la esfera local. En el caso de incendios estructurales, los datos sobre la carga de combustible toman en cuenta el material estructural combustible, junto con el contenido de la estructura, la superficie quemada y el índice de pérdida. En cuanto a los incendios de vehículos, los datos sobre la carga de combustible incluyen los componentes combustibles del vehículo, junto con su contenido y la masa quemada. Los factores de carga de combustible por defecto pueden utilizarse en caso de no disponerse de datos locales. El método de nivel 2 se basa en la siguiente ecuación:

$$E_{CN} = TA_{incendios} \times CC \times FE_{PM_{2.5}} \times FS_{CN/PM_{2.5}}$$

Donde:

$E_{CN}$	=	emisiones de carbono negro
$TA_{incendios}$	=	tasa de actividad lo mismo para incendios de estructuras que de vehículos (número de incendios de estructuras o vehículos registrados en el área de inventario)
CC	=	carga de combustible (esto es, toneladas quemadas por incendio)
$FE_{PM_{2.5}}$	=	factor de emisión de $PM_{2.5}$
$FS_{CN/PM_{2.5}}$	=	factor de especiación para convertir $PM_{2.5}$ en carbono negro

## Método de nivel 3

Un método de nivel 3 por lo general implica datos y estimaciones para modelización o a escala de instalación, pero actualmente no se dispone de ellos para esta categoría de fuente.

### Posibles fuentes de datos de actividad, así como de factores de emisión y de especiación

En el cuadro 3.5-3 se muestran posibles fuentes de datos de actividad, factores de emisión y factores de especiación para la aplicación de los métodos de niveles 1 y 2 a fin de calcular las emisiones de CN procedentes de incendios tanto de estructuras como de vehículos en América del Norte. Los factores de emisión y de especiación específicos recomendados para el nivel 1 se presentan en una serie de cuadros por sector o fuente, en el apéndice B.

**Cuadro 3.5-3. Posibles fuentes de datos de actividad, así como de factores de emisión y especiación para incendios estructurales y de vehículos**

Parámetro	Canadá	Estados Unidos	México
<i>Nivel 1</i>			
Número de incendios estructurales y de vehículos	Cuerpos de bomberos locales y voluntarios; Consejo Canadiense de Jefes y Comisionados de Bomberos ( <i>Council of Canadian Fire Marshals and Fire Commissioners</i> )	Administración de Bomberos de Estados Unidos ( <i>US Fire Administration</i> , USFA) (USFA, 2015); Asociación Nacional para la Prevención de Incendios ( <i>National Fire Protection Association</i> , NFPA) (NFPA, 2015); cuerpos de bomberos locales y voluntarios; contacto directo con la jefatura de bomberos; EPA de EU	Cuerpos de bomberos locales y voluntarios; contacto directo con la jefatura de bomberos

Parámetro	Canadá	Estados Unidos	México
Factor de emisión (PM <sub>2.5</sub> )	Inventario de emisiones de Noruega (Aasestad, 2007)		
Factor de especiación (CE o CN)	Base de datos SPECIATE (EPA, 2011b); se utiliza el factor de CE para CN		
<b>Nivel 2</b>			
Carga de combustible (incendios estructurales y de vehículos)	Distrito Regional del Área Metropolitana de Vancouver ( <i>Greater Vancouver Regional District</i> , GVRD) y Distrito Regional del Valle Fraser ( <i>Fraser Valley Regional District</i> , FVRD), 2003	Consejo de Recursos Atmosféricos de California ( <i>California Air Resources Board</i> , CARB) (CARB, 1994); juicio de expertos pertenecientes a cuerpos de bomberos locales y regionales	
Factor de emisión (PM <sub>2.5</sub> )	GVRD y FVRD, 2003	Consejo de Recursos Atmosféricos de California ( <i>California Air Resources Board</i> , CARB) (CARB, 1994); Programa para el Mejoramiento de Inventarios de Emisiones ( <i>Emission Inventory Improvement Program</i> , EIIP) de la EPA de Estados Unidos (EPA, 2000)	
Factor de especiación (CE o CN)	Base de datos SPECIATE (EPA, 2011b); se utiliza el factor de CE para CN		

### 3.5.4 Quema de desechos sólidos urbanos a cielo abierto

Esta categoría de fuente cubre emisiones atmosféricas producidas por la quema de desechos sólidos urbanos (DSU) al aire libre. En términos generales, la quema a cielo abierto de desechos sólidos domésticos suele llevarse a cabo en zonas rurales, donde no hay recolección de basura y donde la quema se considera una alternativa más fácil y económica que el relleno sanitario. En algunas regiones se han establecido leyes que prohíben la quema de desechos sólidos en sitio. En México, la quema a cielo abierto también tiene lugar en algunos rellenos sanitarios y tiraderos al descubierto, con el objeto de aumentar su capacidad. Las emisiones atmosféricas generadas dependen del volumen y la composición de los desechos quemados. Los desechos sólidos urbanos incluyen papel, plásticos, metales, madera, vidrio, hule, piel, textiles y residuos alimentarios. (La parte no combustible de los desechos, como el vidrio y los metales, se considera no quemada.) La combustión incompleta de combustibles (de las partes combustibles de los DSU) genera emisiones de partículas de materia fina.

En el apartado 3.1 se presenta información detallada sobre la quema de biomasa a cielo abierto. Los desechos recolectados por las dependencias locales encargadas del manejo de DSU normalmente se incineran o se vierten en rellenos sanitarios, por lo que no se incluyen en esta categoría de fuente. Tampoco se incluyen desechos generados por operaciones de desmonte o de jardinería.

#### Método de nivel 1

El método de nivel 1 permite estimar las emisiones de PM<sub>2.5</sub> a partir de la cantidad y composición de los desechos generados dentro del área de inventario, así como de un factor de emisión por defecto. Este método se basa en tasas de generación de desechos per cápita y en el contenido de combustibles (%). La ecuación para el método de nivel 1 que se presenta a continuación se basa en el supuesto de que 100 por ciento de la población practica la quema a cielo abierto. Los compiladores de inventarios deben recabar información sobre las prácticas de quema a escala local para modificar la ecuación según sea necesario (por ejemplo, habrá que multiplicar por 0.4 si únicamente 40 por ciento de la población en el área de inventario practica la quema a cielo abierto). El método de nivel 1 se basa en la siguiente ecuación:

$$E_{CN} = población \times Q_{desechos} \times comb_{desechos} \times FE_{PM_{2.5}} \times FS_{CN/PM_{2.5}}$$

Donde:

$E_{CN}$	=	emisiones de carbono negro
población	=	población en el área de inventario que practica la quema a cielo abierto
$Q_{desechos}$	=	tasa de generación de desechos per cápita
$comb_{desechos}$	=	contenido combustible en los desechos (porcentaje del total de desechos que sí se quema)
$FE_{PM_{2.5}}$	=	factor de emisión de $PM_{2.5}$ (lb/ton)
$FS_{CN/PM_{2.5}}$	=	factor de especiación para convertir $PM_{2.5}$ en carbono negro

### Método de nivel 2

Para el método de nivel 2 se recurre a datos de actividad por localidad específica (por ejemplo, tasa de generación de desechos y su composición) para estimar las emisiones de  $PM_{2.5}$ . Este método se basa en un factor de carga de combustible y un factor de emisión de  $PM_{2.5}$  con el propósito de estimar las emisiones de partículas de materia fina.

El factor de carga de combustible para el área de inventario se calcula a partir de información detallada sobre la generación de desechos (sujetos a la recolección, reciclaje, compostaje o depósito, o en rellenos sanitarios) y su composición, de la siguiente forma:

$$Comb_{carga} = [DSU_{gen} - (DSU_{relleno} + DSU_{reciclaje} + DSU_{otra\ elim})] \times Comb_{desechos}$$

Donde:

$Comb_{carga}$	=	factor de carga de combustible (la cantidad de desechos quemados, en toneladas)
$DSU_{gen}$	=	cantidad total de desechos sólidos urbanos generados en el área de inventario
$DSU_{relleno}$	=	cantidad de desechos sólidos urbanos que se envía a rellenos sanitarios
$DSU_{reciclaje}$	=	cantidad de desechos sólidos urbanos que se envía a reciclaje
$DSU_{otra\ elim}$	=	cantidad de desechos sólidos urbanos que se elimina mediante otros métodos
$Comb_{desechos}$	=	contenido de combustible en los desechos

Con base en el factor de carga de combustible, las emisiones se estiman de la siguiente forma:

$$E_{CN} = Comb_{carga} \times FE_{PM_{2.5}} \times FS_{CN/PM_{2.5}}$$

Donde:

$E_{CN}$	=	emisiones de carbono negro
$FE_{PM_{2.5}}$	=	factor de emisión de $PM_{2.5}$ (lb/ton)
$FS_{CN/PM_{2.5}}$	=	factor de especiación para convertir $PM_{2.5}$ en carbono negro

### Método de nivel 3

El método más viable para estimar las emisiones de carbono negro producidas por la combustión de desechos sólidos urbanos (DSU) se basa en datos para una superficie extensa, a saber: una ciudad, condado o municipio, estado o país. Por ello, un método lo mismo de nivel 1 que de nivel 2 resulta el más conveniente para este sector. Hasta el momento, no se ha determinado un método de nivel 3.

### Posibles fuentes de datos de actividad, así como de factores de emisión y de especiación

En el cuadro 3.5-4 se muestran posibles fuentes de datos de actividad, factores de emisión y factores de especiación para la aplicación de los métodos de niveles 1 y 2 a fin de calcular las emisiones de CN

generadas por la quema de desechos sólidos urbanos a cielo abierto en América del Norte. Los factores de emisión y de especiación específicos recomendados para el nivel 1 se presentan en una serie de cuadros por sector o fuente, en el apéndice B.

**Cuadro 3.5-4. Posibles fuentes de datos de actividad, así como de factores de emisión y especiación para la combustión de desechos sólidos urbanos**

Parámetro	Canadá	Estados Unidos	México
<i>Nivel 1</i>			
Población	Ministerio de Estadística de Canadá ( <i>Statistics Canada</i> ) (Statistics Canada, 2015b)	Oficina de Censos de EU ( <i>US Census Bureau</i> ) (US Census Bureau, 2015)	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi, 2015)
Tasa de generación de desechos per cápita	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cantidad anual de desechos domésticos generados por persona, por provincia o territorio (Statistics Canada, 2004)</li> <li>• Porcentaje de la población rural por provincia o territorio que practicó la actividad de quema a cielo abierto; porcentaje de la población rural que empleó un método de quema en particular; porcentaje de desechos quemados al practicar la quema a cielo abierto (Gartner Lee, 2003)</li> </ul>	EPA de EU (EPA, 2015c); empresas dedicadas al manejo de desechos sólidos	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi, 2013); empresas dedicadas al manejo de desechos sólidos
Contenido combustible en los desechos	US EPA (EPA, 1994 y 1996); Minnesota (MPCA, 2010); empresas dedicadas al manejo de desechos sólidos		Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi, 2013); empresas dedicadas al manejo de desechos sólidos
Factor de emisión (PM <sub>2.5</sub> )	Inventario Nacional de Emisiones ( <i>National Emissions Inventory</i> , NEI) de Estados Unidos 2011 NEI (EPA, 2013b)		Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC-CCAC-MCE <sup>2</sup> , 2013); CN: Christian <i>et al.</i> , 2010; NEI, 2011 (EPA, 2013b)
Factor de especiación (CE o CN)	Base de datos SPECIATE (EPA, 2011b); se utiliza el factor de CE para CN		Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC-CCAC-MCE <sup>2</sup> , 2013); Christian <i>et al.</i> , 2010; base de datos SPECIATE (EPA, 2011b); se utiliza el factor de CE para CN



Parámetro	Canadá	Estados Unidos	México
<i>Nivel 2</i>			
Carga de combustible	Departamentos locales de salud pública y saneamiento, operadores de rellenos sanitarios y empresas dedicadas al manejo de desechos sólidos		Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi, 2013); Christian <i>et al.</i> , 2010; departamentos locales de salud pública y saneamiento, operadores de rellenos sanitarios y empresas dedicadas al manejo de desechos sólidos
Factor de emisión (PM <sub>2.5</sub> )	Inventario Nacional de Emisiones ( <i>National Emissions Inventory</i> , NEI) de Estados Unidos 2011 (EPA, 2013b)		Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC-CCAC-MCE <sup>2</sup> , 2013); Christian <i>et al.</i> , 2010; Inventario Nacional de Emisiones ( <i>National Emissions Inventory</i> , NEI) de Estados Unidos 2011 (EPA, 2013b)
Factor de especiación (CE o CN)	Base de datos SPECIATE (EPA, 2011b); se utiliza el factor de CE para CN		Base de datos SPECIATE (EPA, 2011b); Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC-CCAC-MCE <sup>2</sup> , 2013); Christian <i>et al.</i> , 2010

## 4 Recomendaciones para investigaciones ulteriores

En el *Informe al Congreso sobre el carbono negro (Report to Congress on Black Carbon)* de la Agencia de Protección Ambiental (*Environmental Protection Agency, EPA*) de Estados Unidos se consideran como puntos prioritarios en investigaciones futuras en torno al carbono negro: “mejorar los inventarios de emisiones de carbono negro a escala mundial, regional y nacional con más información de laboratorio y de campo sobre niveles de actividad, condiciones de operación y configuraciones tecnológicas, aunada a técnicas de estimación más precisas de emisiones actuales y futuras” (EPA, 2013a). Las investigaciones que sirvieron para formular las presentes directrices demuestran la importancia de atender tales necesidades.

Tal vez el área que requiere mayor investigación sea la de mejoramiento de los factores de especiación para CN, en términos tanto de la cuantificación de las propiedades fotoabsorbentes como de la unificación de estos factores con el nivel de detalle que puede encontrarse para los factores de emisión de partículas de materia fina subyacentes. Uno de los objetivos a largo plazo consistiría en generar factores de especiación con base en un protocolo de definición y medición sistemático en relación con el carbono fotoabsorbente, con la plena consonancia entre el nivel de detalle de los factores de especiación y los factores de emisión de materia particulada subyacente. Es necesario establecer programas de investigación que se centren en estos objetivos con el propósito de reducir la enorme incertidumbre asociada actualmente con la aplicación de factores de especiación para producir inventarios de carbono negro.

El equipo de ERG ha compilado otras recomendaciones que se centran en mejoras para sectores específicos, a saber:

- Quema de biomasa:
  - Para determinar la superficie y la cantidad de combustible quemados con base en datos de detección remota, deben obtenerse mejores instrumentos satelitales (que probablemente no alcancen a percibir el sotobosque, pero que podrían detectar con mayor precisión incendios pequeños). De lo contrario, sería necesario que cada país generara un inventario de estas variables para cada caso de incendio.
  - En cuanto a la carga de combustible, se recomienda obtener información espacialmente precisa generada a partir de experimentos de campo.
  - Para los factores de emisión o especiación, cabría analizar y generar un inventario del grado de humedad en las materias combustibles y de la velocidad del viento durante la combustión, y luego relacionar estos datos, y los correspondientes a la carga de combustible, con el grado de combustión latente y de llama. De esta manera mejorará la precisión de los factores de emisión y de especiación, así como de la forma en que se refleja el grado de combustión de llama y latente.
- Fuentes carreteras:
  - Es necesario mejorar los datos de actividad vehicular (distancia recorrida, distribución de velocidad y edad del parque vehicular) en Canadá y México como información de entrada del modelo MOVES.
  - Cabría mejorar la información sobre las tasas de emisión de Canadá y México. Un punto de partida consiste en adaptar las tasas de emisión correspondientes a Estados Unidos y reemplazarlas con información local recogida a lo largo del tiempo.

- Fuentes móviles que no circulan por carretera:
  - Se recomienda crear fuentes estandarizadas de población de equipo y actividad.
  - Cabría reunir y aplicar datos más precisos sobre el tipo de equipo de modo que los perfiles genéricos de aeronaves y embarcaciones puedan reemplazarse con datos por aeronave o embarcación específica para calcular las emisiones correspondientes.
  - Es necesario aumentar la representatividad de los factores de carga para las embarcaciones marinas, además de dar cuenta de las variaciones en el terreno para las locomotoras.
  - Deben examinarse y reflejarse los cambios en la carga operativa (con carga y sin carga) que pudieran no reflejarse con precisión en los factores de emisión de partículas de materia fina.
  - Ha de examinarse la repercusión que ejerce la antigüedad de los motores en las emisiones de partículas de materia fina y dar cuenta de ella.
  - Deben llevarse a cabo pruebas más integrales sobre CN en aeronaves, embarcaciones y locomotoras en uso para generar perfiles de especiación más representativos o factores de emisión de CN directos.
  - Se recomienda realizar investigaciones más a fondo sobre el efecto que las distintas opciones de control tienen en las emisiones de partículas de materia fina y CN, con el propósito de evaluar con mayor precisión la eficacia de los controles de partículas suspendidas actualmente instrumentados, que podrían reflejarse en el inventario.
- Sectores industrial y energético y hornos ladrilleros en México:
  - Es necesario generar estimaciones sobre la producción de ladrillo y la eficiencia del sector, por principales tipos de horno, con base en muestras representativas obtenidas de las regiones de mayor producción de ladrillo (la información de la que se dispone actualmente corresponde únicamente a pruebas realizadas en una entidad en México).
  - Cabría concebir factores de emisión de CN por principales tipos de horno ladrillero, lo mismo de madera que de combustóleo, en lugar de los factores de emisión que se utilizan actualmente (los cuales se basan en la quema de madera únicamente en un número de hornos sumamente reducido).
- Fuentes residenciales (combustión doméstica y estufas para cocinar) en México:
  - Se recomienda aplicar cuestionarios para determinar el uso de madera per cápita, por municipio, en lugar de utilizar las estadísticas que se aplican actualmente (estimadas a partir de un modelo, por ecorregión).
  - Deben producirse factores de emisión para CN a partir de una muestra representativa de quema a cielo abierto y estufas, en lugar de los factores de emisión que se utilizan actualmente (los cuales se obtuvieron a partir de una muestra reducida de casos de quema a cielo abierto y estufas en una localidad).
- Otras fuentes y quema de desechos sólidos urbanos en México:
  - Es necesario generar estimaciones de la carga de combustible por región, así como de factores de emisión de CN a partir de una muestra representativa, en vez de utilizar las estadísticas y factores de emisión que se emplean actualmente (generadas a partir de datos obtenidos de un solo sitio).

## 5 Referencias

- Aasestad, K. (comp.) (2007), *Documentation of methodologies for estimating emissions of greenhouse gases and long-range transboundary air pollutants*, en: *The Norwegian Emission Inventory 2007*, informe 2007/38, Oficina de Estadística de Noruega; disponible en: <[www.ssb.no/a/publikasjoner/pdf/rapp\\_200738\\_en/rapp\\_200738\\_en.pdf](http://www.ssb.no/a/publikasjoner/pdf/rapp_200738_en/rapp_200738_en.pdf)>.
- AEMA (2006), *EMEP/CORINAIR Atmospheric emission inventory guidebook*, informe técnico núm. 11/2006, Agencia Europea para el Medio Ambiente; disponible en: <[www.eea.europa.eu/publications/EMEPCORINAIR4](http://www.eea.europa.eu/publications/EMEPCORINAIR4)>.
- Adom, F., J. B. Dunn, A. Elgowainy, J. Han y M. Wang (2013), “Life cycle analysis of conventional and alternative marine fuels in GREET”, Argonne National Laboratory [Laboratorio Nacional de Argonne], en: <<https://greet.es.anl.gov/publication-marine-fuels-13>>.
- Akagi, S. K., R. J. Yokelson, C. Wiedinmyer, M. J. Alvarado, J. S. Reid, T. Karl, J. D. Crouse y P. O. Wennbert (2011), “Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models”, en: *Atmospheric Chemistry and Physics*, núm. 11, pp. 4039-4072, doi: 10.5194/acp-11-4039-2011; disponible en: <[www.atmos-chem-phys.net/11/4039/2011/acp-11-4039-2011.pdf](http://www.atmos-chem-phys.net/11/4039/2011/acp-11-4039-2011.pdf)>.
- ANL (2015), “GREET model: The Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation model”, Argonne National Laboratory [Laboratorio Nacional de Argonne], en: <<https://greet.es.anl.gov/>>.
- Battye, W., K. Boyer y T. G. Pace (2002), *Methods for improving global inventories of black carbon and organic carbon Particulates*, contrato de la EPA núm. 68-D6-046; disponible en: <<http://earthjustice.org/sites/default/files/black-carbon/battye-and-boyer-2002-1.pdf>>.
- Bond, T. C., D. Streets, K. F. Yarber, S. M. Nelson y J-H. Woo (2004), *A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion*, en: *Journal of Geophysical Research*, núm. 109, doi:10.1029/2003JD003697; disponible en: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.168.4988&rep=rep1&type=pdf>>.
- BTS (2015a), “Airline fuel cost and consumption—US carriers”, US Department of Transportation, Bureau of Transportation Statistics [Oficina de Estadísticas del Transporte del Departamento de Transporte de Estados Unidos], en: <[www.transtats.bts.gov/fuel.asp](http://www.transtats.bts.gov/fuel.asp)>.
- BTS (2015b), “Air carrier statistics database”, US Department of Transportation, Bureau of Transportation Statistics [Oficina de Estadísticas del Transporte del Departamento de Transporte de Estados Unidos], en: <[www.transtats.bts.gov/DatabaseInfo.asp?DB\\_ID=111](http://www.transtats.bts.gov/DatabaseInfo.asp?DB_ID=111)>.
- CANA (2015), “2007 Statistics and projections to the year 2025”, Cremation Association of North America [Asociación de Crematorios de América del Norte], en: <[www.cremationassociation.org/](http://www.cremationassociation.org/)>.
- CARB (1994), *Emission inventory procedural manual, Vol. III: Methods for assessing area source emissions*, California Environmental Protection Agency, California Air Resources Board (CARB) [Agencia de Protección Ambiental de California, Consejo de Recursos Atmosféricos de California].
- CARB (2014), *Speciation profiles used by ARB in modeling. Particle size fraction data for source categories*, California Air Resources Board (CARB) [Consejo de Recursos Atmosféricos de California], en: <[www.arb.ca.gov/ei/speciate/speciate.htm](http://www.arb.ca.gov/ei/speciate/speciate.htm) - specprof>.
- Cárdenas, B. (2012), “Políticas públicas sobre la producción de ladrillo en México para mitigar el impacto ambiental”, ponencia presentada en el marco del Taller sobre políticas públicas para mitigar el impacto ambiental de ladrilleras artesanales, Guanajuato, México, 4 de septiembre de 2012.

- CCA (2012), *Evaluación de la comparabilidad de los inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero y carbono negro en América del Norte*, Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal, Canadá; disponible en: <<[www3.cec.org/islandora/es/item/10938-assessment-comparability-greenhouse-gas-and-black-carbon-emissions-inventories-es.pdf](http://www3.cec.org/islandora/es/item/10938-assessment-comparability-greenhouse-gas-and-black-carbon-emissions-inventories-es.pdf)>.
- CCA (2014), “North American Black Carbon Emissions Estimation Guidelines: Summary of Expert Panel Comments, and Changes to Initial Emission Estimation Recommendations”, diciembre de 2014 (informe inédito).
- CCG (2015), “Automatic Identification System (AIS)”, Canadian Coast Guard [Guardia Costera Canadiense], en: <<http://www.ccg-gcc.gc.ca/eng/CCG/Maritime-Security/AIS>>.
- CDC (2015), “National Vital Statistics System”, Centers for Disease Control and Prevention [Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades], en: <[www.cdc.gov/nchs/deaths.htm](http://www.cdc.gov/nchs/deaths.htm)>.
- Christian, T. J., R. J. Yokelson, B. Cárdenas, L. T. Molina, G. Engling y S. C. Hsu (2010), “Trace gas and particle emissions from domestic and industrial biofuel use and garbage burning in Central Mexico”, en: *Atmospheric Chemistry and Physics*, núm. 10, pp. 565-584; disponible en: <[www.atmos-chem-phys.net/10/565/2010/acp-10-565-2010.pdf](http://www.atmos-chem-phys.net/10/565/2010/acp-10-565-2010.pdf)>.
- CMNUCC (2015), “Statement of objectives for UNFCCC and annual inventory submittals from UNFCCC website” [Declaración de objetivos de la CMNUCC y presentación de inventarios anuales de su sitio web], Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, en: <[http://unfccc.int/national\\_reports/annex\\_i\\_ghg\\_inventories/items/2715.php](http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/items/2715.php)>.
- Consejo del Ártico (2011), *Assessment of emissions and mitigation options for black carbon for the Arctic Council*; disponible en: <[http://library.arcticportal.org/1210/1/ACTF\\_Report\\_22July2011.pdf](http://library.arcticportal.org/1210/1/ACTF_Report_22July2011.pdf)>.
- EIA (2015a), *Annual Energy Outlook* [Panorama anual de la energía], US Energy Information Administration [Administración de Información sobre Energía de Estados Unidos], en: <[www.eia.gov/forecasts/aeo/index.cfm](http://www.eia.gov/forecasts/aeo/index.cfm)>.
- EIA (2015b), Adjusted sales of fuel oil and kerosene by end user, US Energy Information Administration [Administración de Información sobre Energía de Estados Unidos], en: <[www.eia.gov/petroleum/data.cfm](http://www.eia.gov/petroleum/data.cfm) - consumption>.
- EMEP-AEMA (2013), *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2013* [Guía para la producción de inventarios de emisiones de contaminantes atmosféricos EMEP-AEMA], informe técnico núm. 12/2013, Programa Europeo de Monitoreo y Evaluación y Agencia Europea de Medio Ambiente, doi:10.2800/92722; disponible en: <[www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2013](http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2013)>.
- Environment Canada (2014), *Air pollutant emission inventory report 1990–2013*, ministerio de Medio Ambiente de Canadá, ISSN: 1719-0487; disponible en: <<http://ec.gc.ca/Publications/default.asp?lang=En&xml=347C67A6-913D-491A-AD07-B20FC648CEC9>>.
- Environment Canada (2015a), *Canada’s first black carbon inventory 2013*, ministerio de Medio Ambiente de Canadá, ISBN: 978-1-100-25678-8, en: <[www.ec.gc.ca/pollution/default.asp?lang=En&n=3F796B41-1](http://www.ec.gc.ca/pollution/default.asp?lang=En&n=3F796B41-1)>.
- Environment Canada (2015b), *Canada’s national greenhouse gas inventory report*, ministerio de Medio Ambiente de Canadá, en: <[http://unfccc.int/national\\_reports/annex\\_i\\_ghg\\_inventories/national\\_inventories\\_submissions/items/8812.php](http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/8812.php)>.

- EPA (1992), *Procedures for emission inventory preparation, Volume IV: Mobile sources*, US Environmental Protection Agency [Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos], informe núm. EPA-450/4-81-026d, en: <<http://ntl.bts.gov/DOCS/AQP.html>>.
- EPA (1994), *Emission characteristics of burn barrels*, US Environmental Protection Agency [Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos], preparado por Two Rivers Regional Council of Public Officials y Patrick Engineering, Inc., junio de 1994.
- EPA (1995a), *Compilation of air pollutant emission factors (AP-42), Volume I: Stationary point and area sources*, US Environmental Protection Agency [Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos], 5a. ed., en: <[www.epa.gov/ttnchie1/ap42/](http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/)>.
- EPA (1995b), “Highway Vehicle particulate emissions modeling software”, US Environmental Protection Agency [Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos], en: <[www.epa.gov/oms/part5.htm](http://www.epa.gov/oms/part5.htm)>.
- EPA (1996), *Characterization of municipal solid waste in the United States: 1995 Update*, Office of Solid Waste and Emergency Response (OSWER), US Environmental Protection Agency [Oficina de Residuos Sólidos y Respuesta a Emergencias, Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos], informe núm. EPA 530-R-96-001; PB96-152 160; disponible en: <[www.epa.gov/solidwaste/nonhaz/municipal/pubs/msw95.pdf](http://www.epa.gov/solidwaste/nonhaz/municipal/pubs/msw95.pdf)>.
- EPA (1999), *Emission test evaluation of a crematory at woodlawn cemetery in the Bronx, NY, Final test report, Vol. 1*, US Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Emissions Measurement Center [Agencia de Protección Ambiental, Oficina de Planeación y Normatividad sobre Calidad del Aire, Centro de Medición de Emisiones de Estados Unidos], informe núm. EPA-454/R-99-049, Research Triangle Park, Carolina del Norte, septiembre de 1999, en: <<http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P100FVCP.TXT>>.
- EPA (2000), *Area source method abstracts: Vehicle fires*, US Environmental Protection Agency, Emission Inventory Improvement Program [Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, Programa para el Mejoramiento de Inventarios de Emisiones], Series de Informes Técnicos, vol. 3, mayo de 2000, en: <[www.epa.gov/ttn/chief/eiip/techreport/volume03/index.html](http://www.epa.gov/ttn/chief/eiip/techreport/volume03/index.html)>.
- EPA (2006), “2002 US National emissions inventory data and documentation”, US Environmental Protection Agency [Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos], en: <[www.epa.gov/ttnchie1/net/2002inventory.html](http://www.epa.gov/ttnchie1/net/2002inventory.html)>.
- EPA (2007), *Draft regulatory impact analysis: Control of emissions of air pollution from locomotive engines and marine compression-ignition engines less than 30 liters per cylinder*, US Environmental Protection Agency [Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos], informe núm. EPA420-D-07-001, marzo de 2007; disponible en: <[www.epa.gov/nonroad/420d07001.pdf](http://www.epa.gov/nonroad/420d07001.pdf)>.
- EPA (2008), “2005 US national emissions inventory data and documentation”, US Environmental Protection Agency [Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos], en: <[www.epa.gov/ttnchie1/net/2005inventory.html](http://www.epa.gov/ttnchie1/net/2005inventory.html)>.
- EPA (2009a), *Current methodologies in preparing mobile source port-related emission Inventories*, US Environmental Protection Agency [Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos]; disponible en: <[www.epa.gov/cleandiesel/documents/ports-emission-inv-april09.pdf](http://www.epa.gov/cleandiesel/documents/ports-emission-inv-april09.pdf)>.
- EPA (2009b), *Emission factors for locomotives*, US Environmental Protection Agency [Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos], informe núm. EPA420-F-09-025; disponible en: <[www.epa.gov/nonroad/locomotv/420f09025.pdf](http://www.epa.gov/nonroad/locomotv/420f09025.pdf)>.

- EPA (2009c), *Regulatory impact analysis: Control of emissions of air pollution from Category 3 marine diesel engines*, US Environmental Protection Agency [Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos], informe núm. EPA-420-R-09-019; disponible en: <[www.epa.gov/nonroad/marine/ci/420r09019.pdf](http://www.epa.gov/nonroad/marine/ci/420r09019.pdf)>.
- EPA (2011a), “2008 US National Emissions Inventory Data and Documentation”, US Environmental Protection Agency [Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos], en: <[www.epa.gov/ttnchie1/net/2008inventory.html](http://www.epa.gov/ttnchie1/net/2008inventory.html)>.
- EPA (2011b), “SPECIATE Database Version 4.3”, US Environmental Protection Agency [Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos], en: <<http://cfpub.epa.gov/si/speciate/>>.
- EPA (2013a), *Report to Congress on black carbon*, US Environmental Protection Agency [Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos], informe núm. EPA-450/R-12-001, disponible en: <[www.epa.gov/blackcarbon/2012report/fullreport.pdf](http://www.epa.gov/blackcarbon/2012report/fullreport.pdf)>.
- EPA (2013b), “2011 US National emissions inventory data and documentation”, US Environmental Protection Agency [Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos], en: <[www.epa.gov/ttnchie1/net/2011inventory.html](http://www.epa.gov/ttnchie1/net/2011inventory.html)>.
- EPA (2014a), “Motor Vehicle Emission Simulator (MOVES) data and documentation”, US Environmental Protection Agency [Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos], en: <[www.epa.gov/otaq/models/moves/](http://www.epa.gov/otaq/models/moves/)> (consulta realizada en 2014).
- EPA (2014b), “NONROAD model data and documentation”, US Environmental Protection Agency [Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos], en: <[www.epa.gov/otaq/nonrdmdl.htm](http://www.epa.gov/otaq/nonrdmdl.htm)> (consulta realizada en 2014).
- EPA (2014c), *Speciation of total organic gas and particulate matter emissions from on-road vehicles in MOVES2014*, US Environmental Protection Agency [Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos], informe núm. EPA-420-R-14-020, Ann Arbor, Michigan, octubre de 2014; disponible en: <[www.epa.gov/otaq/models/moves/documents/420r14020.pdf](http://www.epa.gov/otaq/models/moves/documents/420r14020.pdf)>.
- EPA (2015a), “National Emissions inventory (NEI); Air pollutant emissions trends data”, US Environmental Protection Agency [Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos], en: <[www.epa.gov/ttnchie1/trends/](http://www.epa.gov/ttnchie1/trends/)>.
- EPA (2015b), “WebFIRE database of emission factors”, US Environmental Protection Agency [Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos], en: <[www.epa.gov/ttn/chie1/webfire/index.html](http://www.epa.gov/ttn/chie1/webfire/index.html)>.
- EPA (2015c), “Municipal solid waste”, US Environmental Protection Agency [Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos], en: <[www.epa.gov/epawaste/nonhaz/municipal/index.htm](http://www.epa.gov/epawaste/nonhaz/municipal/index.htm)>.
- FAA (2015a), “Aviation Environmental Design Tool (AEDT)”, Federal Aviation Administration [Administración de la Aviación Federal], fecha de publicación programada: mayo de 2015, en: <[www.faa.gov/about/office\\_org/headquarters\\_offices/apl/research/models/aedt/](http://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/apl/research/models/aedt/)>.
- FAA (2015b), “System for Assessing Aviation’s Global Emissions (SAGE)”, Federal Aviation Administration [Administración de la Aviación Federal], en: <[www.faa.gov/about/office\\_org/headquarters\\_offices/apl/research/models/sage/](http://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/apl/research/models/sage/)>.
- FAA (2015c), “Terminal Area Forecast”, Federal Aviation Administration [Administración de la Aviación Federal], en: <<http://aspm.faa.gov/apowtaf/>>.
- FHWA (2015), “Highway statistics series”, US Department of Transportation, Federal Highway Administration [Administración Federal de Carreteras del Departamento de Transporte de Estados Unidos], en: <[www.fhwa.dot.gov/policyinformation/statistics.cfm](http://www.fhwa.dot.gov/policyinformation/statistics.cfm)>.

- Galvis, B., M. Bergin y A. Russell (2013), “Fuel-based fine particulate and black carbon emission factors from a railyard area in Atlanta”, en: *Journal of the Air and Waste Management Association*, núm. 63, vol. 6, pp. 648-658, doi: 10.1080/10962247.2013.776507; disponible en: <[www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10962247.2013.776507](http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10962247.2013.776507)>.
- Gartner Lee (2003), *Dioxin/furan emissions from on-site residential waste combustion in Canada*, Gartner Lee Limited, febrero de 2003.
- GIRA (2012), *Escenarios de mitigación de gases efecto invernadero, carbono negro y otros forzadores climáticos de vida corta, mediante el uso de biocombustibles sólidos*, Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada, A.C. (GIRA), financiado por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático y el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo.
- Glover, E., J. Warila, S. Kishan, S. Fincher, A. Stanard y W. Faler (2012), “Development of an international version of the MOVES model”, ponencia presentada en el marco de la Conferencia Internacional sobre Inventarios de Emisiones; disponible en: <[www.epa.gov/ttn/chief/conference/ei20/session8/eglover\\_pres.pdf](http://www.epa.gov/ttn/chief/conference/ei20/session8/eglover_pres.pdf)>.
- GVRD y FVRD (2003), *2000 emission inventory for the Canadian portion of the Lower Fraser Valley Airshed: Detailed listing of results and methodology*, Greater Vancouver Regional District and Fraser Valley Regional District [Distrito Regional del Área Metropolitana de Vancouver y Distrito Regional del Valle Fraser], noviembre de 2003.
- Hall D., C. Wu, Y. Hsu, J. Stormer, G. Engling, K. Capeto, J. Wang, S. Brown, H. Li y K. Yu (2012), “PAHs, carbonyls, VOCs and PM<sub>2.5</sub> emission factors for pre-harvest burning of Florida sugarcane”, en: *Atmospheric Environment*, núm. 55, pp. 164-172.
- Hemming, B. y D. Sonntag (2015), comunicación personal de John Koupal, Eastern Research Group, Inc. (ERG), con Brooke Hemming y Darrell Sonntag, US Environmental Protection Agency [Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos], 31 de marzo de 2015.
- Heyes, C., Z. Klimont, F. Wagner y M. Amann (2011), “Extension of the GAINS model to include short-lived climate forcers”, enero de 2011, en: <[www.iiasa.ac.at/publication/more\\_XO-11-052.php](http://www.iiasa.ac.at/publication/more_XO-11-052.php)>.
- IHS Inc. (2015), “Lloyd’s Register of Ships”, en: <<https://www.ihs.com/products/maritime-ships-register.html>>.
- INECC-CCAC-MCE<sup>2</sup> (2013), *Apoyo a la iniciativa de planificación nacional sobre contaminantes climáticos de vida corta en México*, informe final de la iniciativa CCAC-SSNAP, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Coalición por el Clima y el Aire Limpio, Centro Molina para Estudios Estratégicos sobre Energía y Medio Ambiente; disponible en: <[http://www.inecc.gob.mx/descargas/dgcnica/2013\\_mexico\\_snap.pdf](http://www.inecc.gob.mx/descargas/dgcnica/2013_mexico_snap.pdf)>.
- Inegi (2013), *Anuario estadístico de los Estados Unidos Mexicanos 2012*, Instituto Nacional de Estadística y Geografía; disponible en: <[www.inegi.org.mx/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/integracion/pais/aeum/2012/Aeum2012.pdf](http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/integracion/pais/aeum/2012/Aeum2012.pdf)>.
- Inegi (2015), “Censo de población y vivienda”, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, en: <[www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/default.aspx](http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/default.aspx)>.
- IPCC (1996), “Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories; Chapter 6: Quantifying uncertainties in practice”, Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático, en: <[www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/english/](http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/english/)>.
- IPCC (2006), *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático, en: <[www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/](http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/)>.



- Kato, B., A. Mariscal y R. Mariscal (2013), *CCAC-México initiative to mitigate black carbon and other pollutants from brick production; Public policy review of the brick sector in Latin America to find opportunities for reducing emissions of short-lived climate pollutants*, Coalición por el Clima y el Aire Limpio, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA).
- Khalek, I. A., T. L. Bougher, S. Shimpi y C. Tennant (2009), “Particle number emissions from filter-equipped diesel engines meeting 2007 US on-highway standards”, en *Journal of Air and Waste Management Association*, núm. 2009-A-290-AWMA.
- Lack, D., J. Thuesen y R. Elliot (2012), *Investigation of appropriate control measures (abatement technologies) to reduce black carbon emissions from international shipping*; disponible en: [www.imo.org/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/Air%20pollution/Report%20IMO%20Black%20Carbon%20Final%20Report%2020%20November%202012.pdf](http://www.imo.org/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/Air%20pollution/Report%20IMO%20Black%20Carbon%20Final%20Report%2020%20November%202012.pdf).
- May, A., G. McMeeking, T. Lee, J. Taylor, J. Craven, I. Burling, A. Sullivan, S. Akagi, J. Collett, M. Flynn, H. Coe, S. Urbanski, J. Seinfeld, R. Yokelson y S. Kreidenweis (2014), “Aerosol emissions from prescribed fires in the United States: A synthesis of laboratory and aircraft measurements”, en: *Journal of Geophysical Research*, núm. 119, pp. 11,826-11,849, doi:10.1002/2014JD021848, octubre de 2014.
- McCarty, J. L. (2011), “Remote sensing-based estimates of annual and seasonal emissions from crop residue burning in the contiguous United States”, en: *Journal of the Air & Waste Management Association*, núm. 61, pp. 22-34, doi: 10.3155/1047-3289.61.1.22; disponible en: [www.tandfonline.com/doi/pdf/10.3155/1047-3289.61.1.22](http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.3155/1047-3289.61.1.22).
- McEwen, J. D. N. y M. R. Johnson (2012), “Black carbon particulate matter emission factors for buoyancy driven associated gas flares”, en: *Journal of the Air and Waste Management Association*, núm. 62, vol. 3, pp. 307-321, doi:10.1080/10473289.2011.650040.
- MPCA (2010), “Garbage burning in rural Minnesota: Key results and findings”, Minnesota Pollution Control Agency [Agencia de Control de la Contaminación de Minnesota], preparado por Zenith Research Group, en: [www.pca.state.mn.us/index.php/view-document.html?gid=14316](http://www.pca.state.mn.us/index.php/view-document.html?gid=14316).
- NFPA (2015), “Reports and statistics”, National Fire Protection Association [Asociación Nacional para la Prevención de Incendios], en: [www.nfpa.org/research/reports-and-statistics/fires-in-the-us](http://www.nfpa.org/research/reports-and-statistics/fires-in-the-us).
- NRC (2015a), “Comprehensive energy use database table, rail transport”, Natural Resources Canada [ministerio de Recursos Naturales de Canadá], en: <http://oe.nrcan.gc.ca/corporate/statistics/neud/dpa/showTable.cfm?type=CP&sector=tran&juris=ca&rn=25&page=4&CFID=35518865&CFTOKEN=f9edda62434ce13d-3698E45D-E833-5FC1-ED52C609A32EC993>.
- NRC (2015b), “Comprehensive energy use database table, marine transport”, Natural Resources Canada [ministerio de Recursos Naturales de Canadá], en: <http://oe.nrcan.gc.ca/corporate/statistics/neud/dpa/showTable.cfm?type=CP&sector=tran&juris=ca&rn=28&page=4&CFID=35518865&CFTOKEN=f9edda62434ce13d-3698E45D-E833-5FC1-ED52C609A32EC993>.
- NRC (2015c), “Comprehensive energy use database table, air transportation”, Natural Resources Canada [ministerio de Recursos Naturales de Canadá], en: <http://oe.nrcan.gc.ca/corporate/statistics/neud/dpa/showTable.cfm?type=CP&sector=tran&juris=ca&rn=19&page=4&CFID=35518865&CFTOKEN=f9edda62434ce13d-3698E45D-E833-5FC1-ED52C609A32EC993>.

- OMI (2014), *Third IMO GHG study 2014—Final report: Reduction of GHG emissions from ships*, Organización Marítima Internacional; disponible en: <[www.imo.org/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/MEPC 67-INF.3 - Third IMO GHG Study 2014 - Final Report %28Secretariat%29.pdf](http://www.imo.org/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/MEPC%2067-INF.3%20-%20Third%20IMO%20GHG%20Study%202014%20-%20Final%20Report%20Secretariat.pdf)>.
- Peck, J., O. O. Oluwole, H. Wong y R. Miake Lye (2013), “An algorithm to estimate aircraft cruise black carbon emissions for use in developing a cruise emission inventory”, en: *Journal of the Air & Waste Management Association*, núm. 63, vol. 3, pp. 367-375.
- Qin, Y. y S. D. Xie (2011), “Estimation of county-level black carbon emissions and its spatial distribution in China in 2000”, en: *Atmospheric Environment*, núm. 45, pp. 6995-7004.
- Randerson, J. T., Y. Chen, G. R. van derWerf, B. M. Rogers y D. C. Morton (2012), “Global burned area and biomass burning emissions from small fires”, en: *Journal of Geophysical Research*, núm. 117, G04012, doi:10.1029/2012JG002128; disponible en: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2012JG002128/pdf>>.
- Sagarpa (2013), Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (Siacon), Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, en: <[www.siap.gob.mx/optestadisticasiacon2012parcialasiacon-zip/](http://www.siap.gob.mx/optestadisticasiacon2012parcialasiacon-zip/)>.
- Schreuder, M. y M. Mavko (2010), *Review of agricultural crop residue loading, emission factors, and remote fire detection*, memorando técnico, abril de 2010; disponible en: <[http://wrapfets.org/pdf/Ag\\_burning\\_tech\\_memo\\_20100503.pdf](http://wrapfets.org/pdf/Ag_burning_tech_memo_20100503.pdf)>.
- Sedema (2012), “Inventario de emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México, 2010: Gases de efecto invernadero y carbono negro”, Secretaría del Medio Ambiente, Gobierno del Distrito Federal, en: <[www.sedema.df.gob.mx/flippingbook/inventario-emisiones-zmvm-gei2010/](http://www.sedema.df.gob.mx/flippingbook/inventario-emisiones-zmvm-gei2010/)>.
- Semarnat (2012), “Inventario nacional de emisiones de México: 2005”, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Semarnat (2015), sitio web para consultar los inventarios anuales de emisiones de México, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, en: <<http://sinea.semarnat.gob.mx/sinea.php?>>.
- Statistics Canada (2004), “Waste management industry survey: business and government sectors 2002”, ministerio de Estadística de Canadá; disponible en: <[www5.statcan.gc.ca/access\\_acces/archive.action?loc=/pub/16f0023x/16f0023x2002001-eng.pdf&archive=1](http://www5.statcan.gc.ca/access_acces/archive.action?loc=/pub/16f0023x/16f0023x2002001-eng.pdf&archive=1)>.
- Statistics Canada (2012), “2011 Coastwise shipping survey”, ministerio de Estadística de Canadá, en: <[www23.statcan.gc.ca/imdb/p2SV.pl?Function=getSurvey&SDDS=2751-a3](http://www23.statcan.gc.ca/imdb/p2SV.pl?Function=getSurvey&SDDS=2751-a3)>.
- Statistics Canada (2015a), “Report on Energy Supply and Demand in Canada, 2013 Preliminary”, ministerio de Estadística de Canadá, en: <[www5.statcan.gc.ca/olc-cel/olc.action?objId=57-003-X&objType=2&lang=en&limit=0](http://www5.statcan.gc.ca/olc-cel/olc.action?objId=57-003-X&objType=2&lang=en&limit=0)>.
- Statistics Canada (2015b), “Population and demography”, ministerio de Estadística de Canadá, en: <[www5.statcan.gc.ca/subject-sujet/result-resultat.action?pid=3867&id=3867&lang=eng&type=DAILYART](http://www5.statcan.gc.ca/subject-sujet/result-resultat.action?pid=3867&id=3867&lang=eng&type=DAILYART)>.
- STB (2015), “Complete R-1 railroad annual reports”, US Surface Transportation Board [Comisión de Transporte Terrestre], en: <[www.stb.dot.gov/stb/industry/econ\\_reports.html](http://www.stb.dot.gov/stb/industry/econ_reports.html)>.
- Stratus Consulting, Inc. (2012), *Understanding and mitigating black carbon emissions from brick kilns in Mexico*, p. 86. US EPA [Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos], Integrated Environmental Strategies in Latin America [Estrategias Ambientales Integrales en América Latina].

- TCEQ (2002), *A study of brick-making processes along the Texas portion of the US-Mexico border: Senate Bill 749*, Texas Commission on Environmental Quality [Comisión de Texas sobre Calidad Ambiental], Border Affairs SFR-081/02; disponible en: <[www.tceq.texas.gov/assets/public/comm\\_exec/pubs/sfr/081.pdf](http://www.tceq.texas.gov/assets/public/comm_exec/pubs/sfr/081.pdf)>.
- Transportation Canada (2015), “TP-141 Aircraft movement statistics”, ministerio de Transporte de Canadá, en: <<https://www.tc.gc.ca/eng/policy/report-aca-tp141e-tp141-286.htm>>.
- USACE (2015a), “Navigation Data Center. US waterway data—Vessel clearances and entrances”, US Army Corps of Engineers [Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos], en: <[www.navigationdatacenter.us/data/dataaclen.htm](http://www.navigationdatacenter.us/data/dataaclen.htm)>.
- USACE (2015b), “Waterborne Commerce Statistics Center”, US Army Corps of Engineers [Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos], en: <[www.navigationdatacenter.us/data/dataawcus.htm](http://www.navigationdatacenter.us/data/dataawcus.htm)>.
- US Census Bureau (2015), “Population data” [datos de población], Oficina de Censos de EU, en: <[www.census.gov/topics/population.html](http://www.census.gov/topics/population.html)>.
- USFA (2015), “US Fire Statistics”, US Fire Administration [Administración de Bomberos de Estados Unidos], en: <[www.usfa.fema.gov/data/statistics/](http://www.usfa.fema.gov/data/statistics/)>.
- Valdez Vázquez, I., J. A. Acevedo Benítez y C. Hernández Santiago (2010), “Distribution and potential of bioenergy resources from agricultural activities in Mexico”, en: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, núm. 14, vol. 7, pp. 2147-2153, doi: 10.1016/j.rser.2010.03.034.
- Van Leeuwen, T. T., G. R. van der Werf, A. A. Hoffmann, R. G. Detmers, G. Rüicker, N. H. F. French, S. Archiblad, J. A. Carvalho Jr., G. D. Cook, W. J. de Groot, C. Hély, E. S. Kasischke, S. Kloster, J. L. McCarty, M. L. Pettinari, P. Savadogo, E. C. Alvarado, L. Boschetti, S. Manuri, C. P. Meyer, F. Siegert, L. S. Trollope y W. S. W. Trollope (2014), “Biomass burning fuel consumption rates: A field measurement database”, en: *Biogeosciences Discussion*, núm. 11, pp. 8115-8180, doi:10.5194/bg-11-7305-2014; disponible en: <[www.biogeosciences-discuss.net/11/8115/2014/bgd-11-8115-2014.pdf](http://www.biogeosciences-discuss.net/11/8115/2014/bgd-11-8115-2014.pdf)>.
- WRAP (2005), *2002 fire emission inventory for the WRAP Region—Phase II*, Western Governors Association/Western Regional Air Partnership [Asociación de Gobernadores del Oeste-Alianza Regional del Oeste para la Calidad del Aire], proyecto núm. 178-6; disponible en: <[www.wrapair.org/forums/fejf/documents/WRAP\\_2002\\_PhII\\_EI\\_Report\\_20050722.pdf](http://www.wrapair.org/forums/fejf/documents/WRAP_2002_PhII_EI_Report_20050722.pdf)>.
- Yokelson, R. J., I. R. Burling, S. P. Rubanski, E. L. Atlas, K. Adachi, P. R. Buseck, C. Wiedinmyer, S. K. Akagi, D. W. Toohey, C. E. Wold (2011), “Trace gas and particle emissions from open biomass burning in Mexico”, en: *Atmospheric Chemistry and Physics*, núm. 11, pp. 6787-6808, doi:10.5194/acp-11-6787-2011; disponible en: <[www.atmos-chem-phys.net/11/6787/2011/acp-11-6787-2011.pdf](http://www.atmos-chem-phys.net/11/6787/2011/acp-11-6787-2011.pdf)>.
- Zhang, H., S. Wang, J. Hao, L. Wan, J. Jiang, M. Zhang, H.E.S. Mestl, L.W.H. Alnes, K. Aunan, and A.W. Melouki (2012), “Chemical and size characterization of particles emitted from the burning of coal and wood in rural households in Guizhou, China”, en: *Atmospheric Environment*, núm. 51, pp. 94-99, DOI:10.1016/j.atmosenv.2012.01.042; disponible en: <[www.researchgate.net/publication/257521738\\_Chemical\\_and\\_size\\_characterization\\_of\\_particles\\_emitted\\_from\\_the\\_burning\\_of\\_coal\\_and\\_wood\\_in\\_rural\\_households\\_in\\_Guizhou\\_China](http://www.researchgate.net/publication/257521738_Chemical_and_size_characterization_of_particles_emitted_from_the_burning_of_coal_and_wood_in_rural_households_in_Guizhou_China)>.

## **Apéndice A: Manejo de información sobre emisiones**

Elaborar un inventario de emisiones a partir de una infinidad de fuentes de datos supone un enorme esfuerzo cuando se abordan múltiples sectores de emisiones. Desde el inicio, la producción de un inventario implica un rastreo y documentación exhaustivos de los métodos y datos utilizados. Esto permite a los usuarios de los inventarios entender los datos y las suposiciones e incertidumbres intrínsecas a las estimaciones de emisiones. Además, permite llevar un seguimiento de la evolución de las estimaciones de los inventarios, a medida que se dispone de nuevos datos para su actualización. Se considera una buena práctica, pues, contar con un sistema para catalogar y manejar las entradas utilizadas para producir un inventario de emisiones. Se plantea un análisis general para el manejo de la información que conforma un inventario, de manera que los usuarios puedan considerar qué metodología adoptar para el manejo de datos de inventarios de carbono negro (CN).

Los sistemas de manejo de información en materia de emisiones contienen los datos de actividad, al igual que los factores de emisión, datos temporales, espaciales y de especiación y otros, requeridos para generar inventarios de emisiones. Además de gestionar los datos de emisiones y actividad, estos sistemas de manejo generan informes personalizados, facilitan la presentación de datos sobre emisiones a dependencias u otros usuarios, y aportan información sobre emisiones en formatos para la modelización de la calidad del aire, además de que pueden emplearse en tareas de monitoreo y análisis de datos de emisiones. La mayor parte de los sistemas de manejo de datos en materia de emisiones tiene capacidad para manejar diferentes contaminantes (por ejemplo: contaminantes de criterio, contaminantes atmosféricos peligrosos, gases de efecto invernadero [GEI] y CN) para diferentes tipos de fuentes (fijas, de área, móviles —incluidos vehículos y equipos que no circulan por carretera— y naturales —incluidas fuentes biogénicas, incendios y tolvaneras—).

Los sistemas de manejo de información sobre emisiones pueden crearse también con el propósito de almacenar documentos de orientación y protocolos para generar inventarios de emisiones. En la mayoría de los casos, los sistemas tienen capacidad para albergar múltiples inventarios de emisiones, independientemente de la cobertura de los inventarios. Estos sistemas también pueden usarse para establecer emisiones de referencia, rastrear emisiones en el tiempo, apoyar la formulación de estrategias y reglamentaciones, contribuir con programas de conformidad, mantener referencias bibliográficas y facilitar un aseguramiento y control de la calidad minuciosos de los inventarios. Algunos sistemas de manejo de información sobre emisiones pueden incluso proporcionar un componente a sistemas de información geográfica (SIG) para ver resultados y generar informes visuales.

El alcance de cualquier sistema de manejo de información sobre emisiones depende del alcance de los inventarios a los que sirve, la complejidad y el volumen de datos a manejar, así como del uso final de los inventarios de emisiones. Estos sistemas abarcan desde hojas de cálculo y bases de datos simples hasta sistemas complejos de manejo de información ambiental. Los sistemas de manejo de información sobre emisiones pueden ser en línea y la ciudadanía puede consultarlos a través de Internet.

Algunos de los principales componentes de un sistema de manejo de información sobre emisiones comprenden los siguientes elementos:

- Acceso seguro y funciones de usuario
- Procedimientos de manejo de información
- Directrices para la recolección de información y presentación de informes
- Procedimientos de documentación de información
- Técnicas para estimar emisiones (mediciones y estimaciones)
- Planes de análisis de emisiones (por ejemplo: pruebas de desempeño anual, monitoreo de concentraciones y pruebas para la generación de factores de emisión)

- Directrices para la presentación de informes reglamentarios
- Herramientas para el acopio de información y formularios de registro
- Niveles utilizados
- Factores de emisión
- Datos de actividad
- Factores de especiación
- Factores temporales y de asignación espacial
- Importación de datos por instalación específica, por ejemplo de sistemas de monitoreo continuo de emisiones (*continuous emission monitoring systems* [CEMS] de la EPA)
- Referencias bibliográficas
- Informes y análisis de datos especificados por el usuario
- Formatos de importación de datos (por ejemplo, modelo de datos)
- Formatos de exportación de datos (modelo de emisiones SMOKE [*Sparse Matrix Operator Kernel Emissions*], analizador de datos de inventario [*inventory data analyzer, IDA*] y formato del Inventario Nacional de Emisiones [*National Emissions Inventory Format, NIF*])

Estos componentes pueden estar incluidos en una base de datos relacional que utilice subsectores como campos clave, en el valor en que pudieran variar el nivel, el factor de emisión, los datos de actividad o el factor de especiación.

Además de recolectar, manejar, almacenar y asegurar la calidad de los datos de los inventarios de emisiones, estos sistemas de manejo de información se emplean para intercambiar datos sobre emisiones para la producción de inventarios y análisis de la calidad del aire de alcance regional e internacional. En particular, para crear un inventario de emisiones de CN, la utilización de herramientas efectivas para el manejo de datos facilitará, con el tiempo, la actualización y optimización de los inventarios.

La Agencia de Protección Ambiental (*Environmental Protection Agency, EPA*) de Estados Unidos emplea el Sistema de Inventario de Emisiones (*Emission Inventory System, EIS*) para recolectar y diseminar los datos del Inventario Nacional de Emisiones (*National Emissions Inventory, NEI*). El EIS se creó con el propósito de facilitar a usuarios autorizados de la EPA, al igual que de los órdenes estatal, local y tribal, el acceso a datos de inventarios de emisiones, y dar transparencia al proceso de producción de dichos inventarios. Los usuarios autorizados pueden tener acceso a inventarios y datos de emisión a escala de instalaciones, así como ejecutar y extraer informes personalizados, y solicitar apoyo de la EPA a través de un centro de mensajes. Asimismo, se dispone de información más detallada sobre el EIS de la EPA en Internet en: <[www.epa.gov/ttnchie1/eis/gateway/](http://www.epa.gov/ttnchie1/eis/gateway/)>.

En México, la base de datos Datgen se utiliza para recopilar datos de emisiones de fuentes fijas (sectores energético e industrial). La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) emplea el sitio del Sistema Nacional de Emisiones a la Atmósfera (Sinea) en Internet con el objeto de facilitar el acceso ciudadano a sus inventarios (Semarnat, 2015).

La Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA) se encuentra actualmente en proceso de crear un portal en Internet para el manejo de información en materia de emisiones, con el nombre de *Plataforma interactiva, en línea, de información sobre el cambio climático en América del Norte* (consúltese: <<http://climateportal.cec.org/es/>>). Esta plataforma está concebida de manera que los datos de inventarios de emisiones de contaminantes atmosféricos de Canadá, Estados Unidos y México sean comparables y fáciles de utilizar para investigadores y expertos en formulación de políticas. Si bien no ofrece una

herramienta para la producción de inventarios, este portal de la CCA comprende inventarios de emisiones de GEI, CN y contaminantes de vida corta precursores del cambio climático, publicados con la cooperación de los gobiernos de Canadá, Estados Unidos y México. La CCA espera incluir otros inventarios en el futuro. Esta plataforma comprende actualmente tres elementos principales:

- un **menú de herramientas de búsqueda** para acceder a los datos de inventarios de emisiones trinacionales;
- un **diccionario de datos** que define un marco común cuyo objetivo es aumentar la comparabilidad de los diferentes inventarios, mediante el uso de etiquetas semánticas, y
- una **interfaz de programación de aplicaciones disponible al público** que distribuye datos de inventarios de emisiones trinacionales entre usuarios avanzados, desarrolladores de interfaces (*front-end*) e investigadores.

Tomando los sistemas descritos como punto de partida, se invita a los responsables de la elaboración de inventarios a crear un sistema para el manejo de información sobre emisiones, o a planear o adaptar alguno ya en pie, cuando vayan a emprenderse acciones orientadas a producir un inventario de emisiones. En ese sentido, se alentará la adopción de una metodología rigurosa y se aportará la documentación necesaria para usuarios de inventarios y futuras iteraciones de inventarios. La metodología empleada para el manejo de datos no tiene por qué ser demasiado compleja: el mejor sistema es aquel que se mantiene actualizado y que proporciona el nivel de detalle necesario para usuarios y creadores de inventarios.

## Apéndice B: Validación e incertidumbre

Tanto la optimización como la verificación de los inventarios de emisiones de carbono negro (CN) constituyen elementos básicos en la integración de inventarios. En busca de una mejora constante, una buena práctica consiste en efectuar una validación de rutina para detectar omisiones en el desempeño de un inventario. Analizar las incertidumbres de los inventarios ayudará a los responsables de la elaboración de inventarios y de la toma de decisiones a entender las limitaciones de un inventario de este tipo. El análisis de incertidumbres, aunado al análisis de sensibilidad, son métodos que permiten centrar la atención en las áreas cuya optimización resulta más crítica.

### Identificación y cuantificación de fuentes de incertidumbre

Con vistas a poner en contexto los inventarios de emisiones de carbono negro, estimar su incertidumbre reviste suma importancia para los responsables de la elaboración de inventarios y de la toma de decisiones. También es fundamental destacar hacia dónde es mejor dirigir los recursos, con miras a reunir más información y, en general, mejorar la calidad de los inventarios. En la actualidad, la capacidad para cuantificar la incertidumbre de los inventarios de CN en América del Norte supone un verdadero reto, como lo demuestra la falta de estimaciones cuantitativas de incertidumbre en los inventarios de CN estimados en los informes pertinentes de la EPA y el Equipo de Tarea sobre Contaminantes de Vida Corta Precursores del Cambio Climático del Consejo del Ártico (*Arctic Council Task Force on Short-Lived Climate Forcers*) (el informe del proyecto Apoyo a la Iniciativa de Planificación Nacional sobre Contaminantes Climáticos de Vida Corta [SNAP, por sus siglas en inglés] de México plantea un método para calcular la incertidumbre y presenta un caso de estudio para un sector). Este reto se deriva del hecho de que las estimaciones de las emisiones de CN se basan en aquellas de emisiones de partículas de materia fina y que las emisiones de CN no se cuantifican en inventarios oficiales de emisiones de materia particulada, como el Inventario Nacional de Emisiones (*National Emissions Inventory*, NEI) de Estados Unidos. Con el objeto de generar estimaciones de incertidumbre para los inventarios de CN, se deberá primero estimar la incertidumbre de los inventarios de partículas suspendidas subyacentes con un enfoque de microescala (*bottom-up*). En los estudios en que se ha cuantificado la incertidumbre, las estimaciones oscilan en un rango muy amplio; por ejemplo: para un inventario mundial de emisiones de CN, Bond *et al.* (2004) estimaron un rango de incertidumbre de entre -50 por ciento y +275 por ciento, en relación con el total estimado del inventario.

Uno de los retos asociados con la cuantificación de la incertidumbre de inventarios de emisiones generados a partir de información detallada, con un enfoque de microescala, estriba en que los inventarios son producto de una serie de componentes —factores de emisión, datos de actividad y, en el caso de inventarios de CN, factores de especiación— con la contribución de factores independientes a la incertidumbre de cada uno. La incertidumbre en conjunto de los inventarios de CN se compone de cada una de estas incertidumbres individuales. Dada la necesidad de cuantificar primero la incertidumbre en los inventarios de partículas suspendidas subyacentes —los cuales carecen de estimaciones de incertidumbre—, los responsables de generar inventarios de CN se enfrentan a un reto mayor para estimar la incertidumbre. Sin embargo, los métodos publicados como parte de las directrices del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) para crear inventarios de GEI se pueden extender a CN, con lo que se abre un camino a los creadores de inventarios para cuantificar también la incertidumbre de los inventarios de emisiones de CN (IPCC, 1996). Estas directrices aportan detalles referentes a los métodos para cuantificar la incertidumbre basada tanto en el análisis estadístico, cuando así lo permitan los datos, como en el “dictamen de expertos” (una estrategia alternativa en la que se obtiene el consenso de expertos para emitir un juicio subjetivo en torno a las incertidumbres), cuando los datos no permiten una cuantificación directa. En las directrices del IPCC se presenta un análisis detallado del proceso para solicitar el dictamen de expertos, que abarca consideraciones en cuanto a la selección de

los expertos mismos, su dictamen y la síntesis de las distribuciones a aplicar en los cálculos de propagación en una probabilidad cuantificable.

### **Fuentes de incertidumbre**

La cuantificación de la incertidumbre implica tomar en cuenta varias fuentes de variabilidad y error en los métodos utilizados para la creación de inventarios y los datos subyacentes. En diferentes grados, estas fuentes contribuyen a la incertidumbre de factores de emisión, datos de actividad y factores de especiación. La capacidad para cuantificar cada uno depende de la disponibilidad de datos detallados, como se indica; en algunos casos, es necesario recurrir al método de motivación de respuestas de los expertos, que se resume más adelante, para fines de cuantificación.

- **Variabilidad.** La variabilidad en los factores de emisión y datos de actividad es inevitable. Los sectores fuente se componen de numerosas fuentes individuales (por ejemplo: vehículos, plantas generadoras de electricidad y estufas). Estas fuentes individuales tienen una variabilidad natural que no puede aminorarse, incluso si cada fuente individual se somete a un muestreo exhaustivo. Esta variación natural puede cuantificarse mediante estadísticas de población y reflejarse en forma de barras de error (por ejemplo: con intervalos de confianza de 95 por ciento) al registrar factores de emisión. La variabilidad puede cuantificarse con base en la distribución de las mediciones en torno a una tendencia central (media o mediana), aplicando técnicas de análisis estadístico estándar.
- **Medición.** El error de medición es el resultado de la falta de precisión en los aparatos utilizados para medir emisiones o actividad, o también en los procedimientos de prueba mediante los que se recogen los datos (la reproducibilidad de los experimentos, entre otros). Por ejemplo, los monitores de emisiones requieren de calibración frecuente; y aun si están bien calibrados, registrarán una tolerancia a la incertidumbre debido a los límites de detección del instrumento, la cual es cuantificable con base en las especificaciones del instrumento. Si no están bien calibrados, las mediciones estarán propensas a sesgos y serán difíciles de cuantificar, a menos que una fuente independiente verifique el instrumento en cuestión. Además, las incongruencias en torno a la definición de CN (si corresponde a carbono elemental o a carbono fotoabsorbente, como se señala en el apartado 2.2) se suman a la incertidumbre de la medición.
- **Sesgo de la muestra.** Los factores de emisión se derivan, en general, de muestras del total de la población de un sector en particular o de un subconjunto de la operación fuente. En muchos sectores, un número relativamente pequeño de fuentes altamente emisoras contribuye a un número elevado de emisiones, lo cual debe reflejarse en el factor de emisión. Para que esto se cumpla, la muestra idealmente será representativa de toda la población, ya sea con una muestra de gran tamaño que asegure un amplio rango de fuentes, o mediante un muestreo estratificado cuya atención se centre en fuentes de alta emisión. De no ser así, o si la muestra simplemente es demasiado reducida como para cubrir el rango de emisiones, ésta presentará un sesgo y añadirá un error al cálculo del inventario de emisiones globales. El sesgo de la muestra es difícil de cuantificar sin una estimación independiente de las emisiones representativas.
- **Formulación del modelo.** El cálculo de emisiones en los inventarios generados con un enfoque de microescala, a partir de información detallada, se basa en modelos formulados a partir de suposiciones simplificadoras. El proceso de simplificar la complejidad de las emisiones reales en un marco modelo introduce errores. Los factores de emisión pueden basarse en patrones de operación más comunes y pasar por alto acontecimientos extraordinarios. Las diferencias en cuanto a fuentes de emisión (por ejemplo: vegetales, industriales o por tipo de vehículo) se diluyen al verse agrupadas en una sola subcategoría de emisiones. Los factores que tienen resultados complejos sobre las emisiones —como las condiciones meteorológicas, la antigüedad del equipo y la diversidad y calidad del combustible— pueden perderse si se inclinan hacia suposiciones lineales más agregadas.



Un punto de singular relevancia respecto de la creación de un modelo que permita formular directrices para integrar un inventario de CN es reconocer que los factores de emisión y los datos de actividad agregados, conforme a la recomendación general para métodos de niveles 1 y 2, introducirán errores en el cálculo del inventario de emisiones. La agregación de factores de emisión y datos de actividad requiere suposiciones inherentes acerca de la combinación de categorías de fuentes más detalladas, que el usuario no proporciona. Esta agregación puede servir también para moderar las no linealidades que existen dentro de un sector fuente individual, como los impactos estacionales. Sin embargo, aun cuando el proceso de agregación introduce errores, el punto de mayor agregación es permitir que se produzca una estimación en la que de otra manera no se generaría ninguna. En suma, la adopción de un método de nivel 1 agregado es mejor que carecer de estimaciones para un sector en particular, pero deberá recurrirse a él solamente cuando sea éste el caso.

Los errores introducidos por la formulación de un modelo no son fáciles de cuantificar a partir de datos subyacentes; tal vez se requiera recurrir al juicio de expertos para cuantificar la incertidumbre.

- **Especiación.** La especiación a partir de la cual se pueden derivar inventarios de emisiones de CN introduce un error adicional que también está relacionado con la formulación del modelo. Los factores de especiación conllevan errores que provienen de las mismas fuentes que los factores de emisión de partículas de materia fina subyacentes, a saber: variabilidad, medición, sesgo de la muestra y formulación del modelo. Otro problema en cuanto a la medición es que los instrumentos miden carbono elemental en lugar de CN con efectos ópticos. Los factores de especiación a menudo se derivan de programas de muestreo de emisiones separados de los factores de emisión subyacentes a los cuales se aplican. Esto significa que los factores por sí solos reflejarán variabilidad, error de medición y sesgo de las muestras. Cuando se aplica a factores de emisión de partículas de materia fina subyacentes, se introduce un error desde la perspectiva de la formulación del modelo debido a que la medición y las condiciones de la muestra no guardan consonancia. En esta etapa de la creación del inventario de emisiones de CN, es necesario recurrir a la especiación; sin embargo, se espera que, con el tiempo, el CN pueda medirse directamente como parte de una caracterización más amplia del factor de emisión, eliminando así la necesidad de este paso adicional y los errores a los que da lugar.
- **Datos incompletos.** Las fuentes de error anteriores radican en la cuantificación de sectores implícita en la elaboración del inventario de emisiones. Otra fuente de error estriba en un inventario incompleto al haberse omitido algún sector en particular. Las presentes directrices tienen por objeto reducir este error al proporcionar cuando menos métodos de nivel 1 para los sectores que constituyen la gran mayoría de fuentes de CN. No es posible dar cuenta de todas y cada una de las fuentes potenciales de CN; además, algunos subsectores muy pequeños han sido excluidos. Esta deficiencia puede cuantificarse mediante una comparación de las emisiones globales calculadas con una metodología de macroescala (*top-down*) y los cálculos de emisiones detalladas, obtenidos con un enfoque de microescala (*bottom-up*).

### **Cuantificación de la incertidumbre**

A fin de estimar la incertidumbre, es necesario conocer la distribución de la probabilidad y variabilidad de cada elemento del cálculo del inventario (factores de emisión, datos de actividad y factores de especiación). Como se planteó anteriormente, en un plano ideal éstos se cuantificarán directamente a partir de los datos subyacentes, mediante la aplicación de técnicas estadísticas o el método de *bootstrapping*, una técnica analítica que parte de la variabilidad subyacente en los datos para generar una distribución y varianza para un componente en particular. Ante la ausencia de datos para aplicar estos métodos, se presenta una alternativa metodológica que consiste en recurrir al dictamen de expertos, para emitir un juicio subjetivo

en torno a las incertidumbres. En la práctica, cuantificar cada uno de los elementos de incertidumbre puede no ser una labor realista para los responsables de elaborar un inventario de emisiones. En ese sentido, podría realizarse un intento razonable si las incertidumbres en los factores de emisión, los datos de actividad y los factores de especiación se estiman y combinan mediante métodos establecidos, al mismo tiempo que se documenta que ciertos elementos de incertidumbre —por ejemplo, la formulación del modelo o la presencia de datos incompletos— no se incluyen en la estimación cuantificada. En los apartados siguientes se aborda en qué forma puede emprenderse una acción más dirigida a cuantificar una estimación de incertidumbre.

### Factores de emisión

La incertidumbre en los factores de emisión de materia particulada surge fundamentalmente de la variabilidad, la medición, el sesgo en la muestra y la formulación del modelo (agregación). Las principales fuentes de factores de emisión de partículas de materia fina señaladas en las presentes directrices (véase, por ejemplo, los modelos de emisión de fuentes móviles en el apartado 3.3, “Fuentes móviles”) en general no incluyen estimaciones de incertidumbre con los factores de emisión, aunque muchas veces puede disponerse de datos subyacentes. En estos casos será necesario cuantificar directamente la incertidumbre de la variabilidad y la medición, utilizando la distribución de probabilidad y la desviación estándar de los datos subyacentes de la muestra, o mediante la simulación *bootstrapping*. Cuantificar el sesgo de la muestra requiere realizar una comparación con fuentes independientes o recurrir al dictamen de expertos.

### Datos de actividad

Las fuentes de datos de actividad (por ejemplo, consumo de energía, área quemada y distancia recorrida por vehículos), que se recomiendan en estas directrices, tienden a provenir de estimaciones reunidas por dependencias gubernamentales. La cuantificación de la incertidumbre depende de la dependencia encargada de reunir los datos, y los responsables de elaborar un inventario deberán informarse con la dependencia de registro si los datos registrados comprenden estimaciones de incertidumbre. Es posible obtener datos subyacentes a partir de los cuales se puedan establecer estadísticas de probabilidad, o bien recurrir a la simulación *bootstrapping*. Con excepción de estos casos, será necesario obtener el dictamen de expertos.

### Factores de especiación

La base de datos SPECIATE incluye información sobre la incertidumbre (EPA, 2011b). Esta medición, no obstante, cubriría solamente errores de variabilidad y medición. El sesgo de la muestra y la formulación del modelo también contribuirán a generar un elevado grado de incertidumbre a la aplicación de factores de especiación en inventarios de emisiones de CN (debido a la incompatibilidad entre el número de categorías fuente en los inventarios de partículas suspendidas y el número de perfiles de especiación disponibles).

## Combinación de incertidumbre

Una vez que se han estimado la distribución y la desviación estándar para factores de emisión, datos de actividad y factores de especiación, las directrices del IPCC detallan dos metodologías para cuantificar la incertidumbre de un inventario: 1) cuantificación matemática (que se considera más sencilla) y 2) simulación Monte Carlo, la cual itera numerosas simulaciones por computadora del cálculo del inventario, utilizando una selección aleatoria de componentes del inventario (factores de emisión, datos de actividad y factores de especiación), con base en su distribución de la probabilidad.

Para el método 1, las directrices del IPCC proporcionan ecuaciones matemáticas para combinar las incertidumbres de inventarios que se derivan de la suma (regla A) y la multiplicación (regla B). Para generar inventarios de CN en múltiples sectores se utilizarán ambas aproximaciones. Los sectores individuales utilizan la aproximación de multiplicación (regla B), con base en la incertidumbre expresada como porcentaje de la variable objetivo, y los inventarios totales luego se suman en todos los sectores

(regla A). Las ecuaciones para cada método se muestran en el siguiente fragmento tomado de las directrices del IPCC (1996):

- En los casos en los que se deben combinar las cantidades inciertas por multiplicación, la desviación estándar de la suma es la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las desviaciones estándar de las cantidades que se suman, con las desviaciones estándar expresadas como coeficientes de variación, que son las relaciones de las desviaciones estándar con los valores medios adecuados. Esta regla es aproximada para todas las variables aleatorias. En circunstancias típicas, esta regla tiene una exactitud razonable, mientras el coeficiente de variación sea inferior a aproximadamente 0,3. Esta regla no es aplicable a la división.

Luego se puede derivar una ecuación simple (Ecuación 3.1) para la incertidumbre del producto, expresada en términos porcentuales:

$$\text{ECUACIÓN 3.1} \\ \text{COMBINACIÓN DE INCERTIDUMBRES – MÉTODO 1 - MULTIPLICACIÓN} \\ U_{\text{total}} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2}$$

Donde:

$U_{\text{total}}$  = el porcentaje de incertidumbre del producto de las cantidades (la mitad del intervalo de confianza del 95 por ciento, dividido por el total y expresado como porcentaje);

$U_i$  = el porcentaje de incertidumbre asociado con cada una de las cantidades.

- En los casos en los que se deben combinar las cantidades inciertas por suma o resta, la desviación estándar de la suma es la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las desviaciones estándar de las cantidades que se suman con las desviaciones estándar, todas expresadas en términos absolutos (esta regla es exacta para las variables no correlacionadas).

Tomando esta interpretación, se puede derivar una ecuación simple (Ecuación 3.2) para la incertidumbre de la suma, expresada en términos porcentuales:

$$\text{ECUACIÓN 3.2} \\ \text{COMBINACIÓN DE INCERTIDUMBRES – MÉTODO 1 – SUMA Y RESTA} \\ U_{\text{total}} = \frac{\sqrt{(U_1 \cdot x_1)^2 + (U_2 \cdot x_2)^2 + \dots + (U_n \cdot x_n)^2}}{|x_1 + x_2 + \dots + x_n|}$$

Donde:

$U_{\text{total}}$  = el porcentaje de incertidumbre de la suma de las cantidades (la mitad del intervalo de confianza del 95 por ciento, dividido por el total (es decir, la media) y expresado como porcentaje). Este término «incertidumbre» se basa en el intervalo de confianza del 95 por ciento;

$x_i$  y  $U_i$  = las cantidades inciertas y el porcentaje de incertidumbres asociado, respectivamente.

Fuente: IPCC, 1996 [tomado de *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*: <[www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/1\\_Volume1/V1\\_3\\_Ch3\\_Uncertainties.pdf](http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/1_Volume1/V1_3_Ch3_Uncertainties.pdf)>].

Las directrices del IPCC proporcionan plantillas para estimar la incertidumbre usando estas aproximaciones, así como métodos para proyectar tendencias de incertidumbre basadas en el cambio de emisiones con el paso del tiempo. En suma, para un subsector dado, las incertidumbres establecidas para factores de emisión, datos de actividad y factores de especiación (obtenidos mediante el análisis de datos subyacentes o el dictamen de expertos) serían los datos de entrada —junto con los de otros subsectores— para la ecuación 3.2 en esta versión *supra*. La incertidumbre resultante para este subsector se introduciría junto con la de otros subsectores en la ecuación 3.1 *supra*, para estimar la incertidumbre total en todo el inventario.

La simulación Monte Carlo (método 2) generalmente se aplica utilizando paquetes de software creados específicamente para este fin. Aunque es relativamente fácil configurar e iterar programas complementarios para Excel de Microsoft (por ejemplo: @Risk® y Oracle Crystal Ball), es necesario definir las distribuciones de probabilidad para cada factor emisor, los elementos de los datos de actividad y los factores de especiación utilizados en el inventario. El método Monte Carlo resulta conveniente para inventarios de CN, ya que calcula inventarios de sectores individuales muchas veces (generalmente miles) usando entradas seleccionadas al azar para factores de emisión, elementos de datos de actividad y factores de especiación. Los resultados para cada iteración se sumarán en todos los sectores y se generará una distribución de emisiones totales: de esto se podrá estimar la incertidumbre del inventario total de carbono negro.

## **Métodos de validación**

La validación permite comparar un inventario de emisiones y factores subyacentes con fuentes de datos independientes, a manera de verificación de entradas y resultados de inventario, además de permitir entender dónde pueden existir omisiones significativas en sectores individuales. La validación es importante para verificar la calidad del inventario y resaltar áreas que requieran futuras investigaciones. Como es el caso para inventarios de emisiones de otros contaminantes, no existe una estimación que pueda considerarse una verdad absoluta para las emisiones de CN. Se podrán utilizar distintas fuentes para evaluar diferentes aspectos del inventario, y el monitoreo puede permitir una verificación limitada sobre una base relativa. Los diferentes métodos empleados para validación se resumen a continuación.

### **Conjuntos de datos independientes**

La forma más directa de evaluar factores de emisión y factores de especiación es mediante conjuntos de datos que no se incluyen en la formulación de factores de emisión. Debido a que las mismas fuentes de incertidumbre existen en estos conjuntos de datos independientes, se deberá tener cuidado al hacer estas comparaciones. Los conjuntos de datos independientes resultan particularmente útiles para evaluar sesgos en las muestras en factores de emisión, y por esta razón, un conjunto de datos independiente refleja un tamaño de muestra grande o un método de muestreo estratificado. La disponibilidad de conjuntos de datos independientes dependerá del sector fuente y de la variedad de métodos de medición disponibles. Como ejemplo, para fuentes móviles carreteras, los factores de emisión basados en mediciones de experimentos de laboratorio se han validado a partir de datos independientes generados por aparatos de detección remota en las carreteras, o bien por sistemas portátiles de medición de emisiones o mediciones ambientales tomadas en túneles de carreteras. Para este sector fuente, contar con diferentes métodos para medir las emisiones supone un suministro más a la mano de datos independientes para su validación. Para otros sectores, cuyos datos sean más limitados, estudios independientes en material publicado (de otros países, por ejemplo) pueden apoyar la validación.

### **Comparación entre niveles**

Para muchos de los sectores, los métodos de nivel 1 utilizan fuentes de actividad de “arriba hacia abajo” (por ejemplo: consumo de energía o de combustibles). Estas fuentes de actividad tradicionalmente se han utilizado para verificar inventarios detallados realizados con una metodología de microescala y que emplean otros elementos de actividad más detallados. Por ejemplo, para fuentes móviles, a menudo se utiliza el consumo total de combustible (recomendado para el nivel 1) a efecto de verificar inventarios detallados generados con base en la distancia recorrida por los vehículos. La estructura por niveles de las directrices es conveniente para fines de validación, porque para numerosos sectores el método de nivel 1 puede utilizarse para verificar los métodos de niveles 2 y 3, si se utilizan datos de actividad diferentes. Esta metodología permite la validación de elementos combinados de factores de emisión y datos de actividad, que constituyen la base de los inventarios de emisiones detallados.

## **Monitoreo**

Los datos obtenidos de satélites y de dispositivos de monitoreo son una fuente objetiva de estimaciones de partículas suspendidas y emisiones de CN, aunque no sobre una base de masa absoluta. Esto limita la forma en que estas fuentes pueden aplicarse para evaluar los inventarios de emisiones. Estas fuentes de datos resultan de suma utilidad para evaluar tendencias en el tiempo o cambios estacionales. Los monitores de aire ambiente pueden utilizarse para medir los cambios relativos de emisiones en eventos aislados (incendios, por ejemplo), o para comparar los cocientes de contaminantes diferentes respecto de aquellos estimados mediante inventarios detallados, elaborados con un enfoque de microescala. Los datos de monitoreo para partículas suspendidas comprenden, además, partículas secundarias de materia fina que se forman en la atmósfera (nitratos, sulfatos y aerosoles orgánicos secundarios, entre otros), mismos que necesitan tomarse en cuenta para validar especies de partículas suspendidas emitidas directamente, como el carbono elemental. Para propósitos de validación, los monitores se comparan normalmente con los resultados obtenidos de la modelización de la calidad del aire que toman en cuenta partículas secundarias de materia fina, más que compararse con inventarios de emisiones de masa que incluyen únicamente materia particulada directa.



## Factores de emisión y de especiación recomendados para el cálculo de emisiones de carbono negro con métodos de nivel 1



**Nota:** Los cuadros que se incluyen a continuación presentan factores de emisión (FE) y de especiación (FS) recomendadas a fin de respaldar los cálculos de las emisiones de carbono negro, por sector, con los métodos de nivel 1 presentados en el apartado 3 de estas directrices. Los FE y FS se aplican a todos los años calendario para la quema de biomasa, los sectores energético e industrial, la combustión doméstica y otras fuentes; en cambio, para las fuentes móviles carreteras y no-carreteras, ambos factores se aplican únicamente en un año base: el año calendario 2013. La documentación que sustenta cada FE y FS se presenta en los cuadros en forma de referencias y, cuando se requiere, se incluyen notas adicionales que explican su procedencia.



### 3.1 QUEMA DE BIOMASA

Factores de emisión (FE) de nivel 1

Combustible	Fuente de emisión	Factor	Contaminante	Unidad	Referencia(s)	Núm. id. factor WebFIRE	Notas
Biomasa	Quema a cielo abierto, México	324	PM <sub>2.5</sub>	kg/hectárea	AP-42, cuadro 13.1-2 (EPA, 1994)	NP	Promedio de partículas suspendidas para incendios forestales naturales (correspondiente a 9 regiones de EU) registrado en el cuadro 13.1-2 del AP-42.
Biomasa	Quema a cielo abierto, Canadá y EU	324	PM <sub>2.5</sub>	kg/hectárea	AP-42, cuadro 13.1-2 (EPA, 1994); GVRD y FVRD, 2003	NP	
Biomasa	Quema prescrita, Canadá (excluida Columbia Británica), México y EU	632	PM <sub>2.5</sub>	kg/hectárea	AP-42, cuadro 13.1-4 (EPA, 1994)	NP	Promedio de partículas suspendidas para quema prescrita (correspondiente a 6 regiones de EU) registrado en el cuadro 13.1-4 del AP-42.
Biomasa	Quema prescrita, Canadá (Columbia Británica)	752	PM <sub>2.5</sub>	kg/hectárea	GVRD y FVRD 2003	NP	
Biomasa	Quema agrícola, México (caña de azúcar)	2.49	PM <sub>2.5</sub>	g/kg	Hall <i>et al.</i> , 2012	NP	Factor de emisión promedio recomendado en el estudio de cámara de combustión de Hall <i>et al.</i> , 2012.
Biomasa	Quema agrícola, México	6.26	PM <sub>2.5</sub>	g/kg	Agaki <i>et al.</i> , 2011; Yokelson <i>et al.</i> , 2011	NP	Valor registrado en el cuadro 1 de Agaki <i>et al.</i> , 2011, y el cuadro 2 de Yokelson <i>et al.</i> , 2011.
Biomasa	Quema agrícola, Canadá y EU	5.25	PM <sub>2.5</sub>	g/kg	WRAP, 2005; Akagi <i>et al.</i> , 2011	NP	Promedio del valor obtenido del CARB, registrado en el cuadro 24 de WRAP (2005), y valor de Agaki <i>et al.</i> , 2011.

Nota: NP = no procede

Factores de especiación (FS) de nivel 1

Fuente o tipo de combustible	CE (peso %)*	Referencia(s)	Núm. perfil SPECIATE (según proceda)	Incertidumbre SPECIATE (según proceda)
Quema a cielo abierto y prescrita	9.5	SPECIATE (EPA, 2011b)	92102	NP
Quema agrícola, México (caña de azúcar)	28.5	Hall <i>et al.</i> , 2012	NP	NP
Quema agrícola	10.9	SPECIATE (EPA, 2011b)	92103	NP

Notas: \* El factor de especiación concierne al porcentaje de PM<sub>2.5</sub> que corresponde a carbono elemental (CE). Se ha reconocido al CE como sustituto del CN en tanto no se disponga de mejores datos y métodos de medición. NP = no procede.



### 3.2 SECTORES ENERGÉTICO E INDUSTRIAL (FE)

Factores de emisión (FE) de nivel 1

Combustible	Fuente de emisión	Factor	Contaminante	Unidad	Referencia(s)	Núm. id. factor WebFIRE	Notas
Carbón de antracita	Generación eléctrica	$(2.500E0)+(8E-2*A)$	PM <sub>2.5</sub>	lb/ton	WebFIRE (EPA, 2015b)	45	El contenido característico de ceniza para el carbón de antracita es de 7.0-16.0%, por peso (EPA, 1985).
Carbón bituminoso y subbituminoso	Generación eléctrica	5.64	PM <sub>2.5</sub>	lb/ton	WebFIRE (EPA, 2015b)	502	
Petróleo destilado	Generación eléctrica	1.55	PM <sub>2.5</sub>	lb/1000 galones	WebFIRE (EPA, 2015b)	2256	
Queroseno/safta (combustible de reactor o turbosina)	Generación eléctrica	0.01107	PM <sub>2.5</sub>	lb/millones BTU	WebFIRE (EPA, 2015b)	11510	
Carbón de lignito	Generación eléctrica	$0.79*(5.6E-1 * A)$	PM <sub>2.5</sub>	lb/ton	WebFIRE (EPA, 2015b)	1584	Carbón pulverizado, fondo seco, combustión vertical (quemadores en paredes). El contenido característico de ceniza para el carbón de lignito es de 6.2%, por peso (EPA, 1985).
Gas licuado de petróleo (gas LP)	Generación eléctrica	0.848	PM <sub>2.5</sub>	lb/1000 galones	WebFIRE (EPA, 2015b)	3778	FE del propano
Gas natural	Generación eléctrica	7.6	PM <sub>2.5</sub>	lb/millones de pies cúbicos	WebFIRE (EPA, 2015b)	2496	
Gas de proceso	Generación eléctrica	7.41	PM <sub>2.5</sub>	lb/millones de pies cúbicos	WebFIRE (EPA, 2015b)	2596	
Petróleo residual	Generación eléctrica	4.3A	PM <sub>2.5</sub>	LB/1000 galones	WebFIRE (EPA, 2015b)	2004	El contenido característico de ceniza para el petróleo residual es de 0.05-0.1%, por peso (EPA, 1985).
Desechos sólidos	Generación eléctrica	0.04063	PM <sub>2.5</sub>	lb/millones BTU	WebFIRE (EPA, 2015b)	3823	
Desechos de madera y corteza	Generación eléctrica	10	PM <sub>2.5</sub>	lb/ton	WebFIRE (EPA, 2015b)	2860	
Carbón de antracita	Industrial	$(2.500E0)+(8E-2*A)$	PM <sub>2.5</sub>	lb/ton	WebFIRE (EPA, 2015b)	3896	El contenido característico de ceniza para el carbón de antracita es de 7.0-16.0%, por peso (EPA, 1985).
Carbón bituminoso y subbituminoso	Industrial	5.64	PM <sub>2.5</sub>	lb/ton	WebFIRE (EPA, 2015b)	4329	
Destilado de petróleo	Industrial	1.55	PM <sub>2.5</sub>	lb/1000 galones	WebFIRE (EPA, 2015b)	5690	
Queroseno/safta (combustible de reactor o turbosina)	Industrial	0.01107	PM <sub>2.5</sub>	lb/millones BTU	WebFIRE (EPA, 2015b)	12248	
Carbón de lignito	Industrial	$(5.600E-1*A) + 5.400E-1$	PM <sub>2.5</sub>	lb/ton	WebFIRE (EPA, 2015b)	5461	El contenido característico de ceniza para el carbón de lignito es de 6.2%, por peso (EPA, 1985).
Gas licuado de petróleo (gas LP)	Industrial	1.106	PM <sub>2.5</sub>	lb/1000 galones	WebFIRE (EPA, 2015b)	8006	FE del propano
Gas natural	Industrial	7.6	PM <sub>2.5</sub>	lb/millones de pies cúbicos	WebFIRE (EPA, 2015b)	5945	
Gas de proceso - gas de refinería de petróleo	Industrial	8.7	PM <sub>2.5</sub>	lb/millones de pies cúbicos	WebFIRE (EPA, 2015b)	5995	
Gas de proceso - gas de alto horno	Industrial	8.6	PM <sub>2.5</sub>	lb/millones de pies cúbicos	WebFIRE (EPA, 2015b)	6006	
Gas de proceso - gas de horno de coque	Industrial	8.919	PM <sub>2.5</sub>	lb/millones de pies cúbicos	WebFIRE (EPA, 2015b)	6015	
Petróleo residual	Industrial	$(4.67E0*A)+(1.50E0)$	PM <sub>2.5</sub>	lb/1000 galones	WebFIRE (EPA, 2015b)	5526	El contenido característico de ceniza para el petróleo residual es de 0.05-0.1%, por peso (EPA, 1985).
Desechos de madera y corteza	Industrial	10	PM <sub>2.5</sub>	lb/ton	WebFIRE (EPA, 2015b)	6360	
Misceláneos	Hornos ladrilleros (México)	40.39	PM <sub>2.5</sub>	kg/Aguema	TCEQ, 2002; CARB, 2014	NA	FE de partículas suspendidas totales originales (TCEQ, 2002) multiplicado por 0.9001 (fracción de tamaño) para PM <sub>2.5</sub> (CARB, 2014)

Notas: NP = no procede, A = contenido de ceniza de combustible, % de peso.

### 3.2 SECTORES ENERGÉTICO E INDUSTRIAL (FS)

Factores de especiación (FS) de nivel 1

Fuente o tipo de combustible	CE (peso %)*	Referencia(s)	Núm. perfil SPECIATE (según proceda)	Incertidumbre SPECIATE (según proceda)	Notas
Combustión de carbón bituminoso	1.696	SPECIATE (EPA, 2011b)	92104	NP	
Combustión de aceite destilado	10	SPECIATE (EPA, 2011b)	92115	NP	
Combustión de lignito	1.428729379	SPECIATE (EPA, 2011b)	92125	NP	
Combustión de gas natural	38.4	SPECIATE (EPA, 2011b)	92112	NP	
Gas licuado de petróleo (gas LP)	38.4	SPECIATE (EPA, 2011b)	92112	NP	No se dispone de perfil para gas LP. El perfil es para gas natural. Como alternativa, los compiladores de inventarios pueden utilizar otros perfiles sustitutos de que se disponga en la base de datos SPECIATE.
Combustión de gas de proceso	14.57143457	SPECIATE (EPA, 2011b)	92136	NP	
Combustión de petróleo residual	1	SPECIATE (EPA, 2011b)	92117	NP	
Combustión de desechos sólidos	1.52188727	SPECIATE (EPA, 2011b)	92126	NP	
Combustión de carbón subbituminoso	4.2763	SPECIATE (EPA, 2011b)	92110	NP	
Desechos de madera y corteza	3.3	EMEP-EEA, 2013	NP	NP	
Hornos ladrilleros (México)	0.865	Stratus, 2012	NP	NP	

Notas: \* El factor de especiación concierne al porcentaje de  $PM_{2.5}$  que corresponde a carbono elemental (CE). Se ha reconocido al CE como sustituto del CN en tanto no se disponga de mejores datos y métodos de medición.  
NP = no procede.

### 3.3.1 FUENTES CARRETERAS

Factores de emisión (FE) de nivel 1

Combustible	Fuente de emisión	Factor	Contaminante	Unidad	Referencia(s)	Núm. id. factor WebFIRE	Notas
Diésel	Todos los vehículos a diésel (Canadá y EU)	1.481	CE	gramos/galón consumido	EPA, 2014a	NP	Para Canadá y EU, se ejecutó MOVES2014 para el año calendario 2013; contenido energético: 135,562 KJ/galón
Gasolina	Todos los vehículos a gasolina (Canadá y EU)	0.050	CE	gramos/galón consumido	EPA, 2014a	NP	2013; contenido energético: 118,287 KJ/galón (E10)
Gas natural comprimido	Todos los vehículos a gas natural comprimido (Canadá y EU)	0.024	CE	gramos/100 scf consumidos	EPA, 2014a	NP	2013; contenido energético: 103,706 KJ/galón
Diésel	Todos los vehículos a diésel (México)	3.185	CE	gramos/galón consumido	EPA, 2014a	NP	Para México, cifras aproximadas correspondientes a 2013, con ejecución de MOVES de EU para 2004, contenido energético: 135,562 KJ/galón
Gasolina	Todos los vehículos a gasolina (México)	0.073	CE	gramos/galón consumido	EPA, 2014a	NP	Cifras aproximadas correspondientes a 2013, a partir de cifras de 2004; contenido energético: 122,481 KJ/galón (E0)
Gas natural comprimido	Todos los vehículos a gas natural comprimido (México)	0.036	CE	gramos/100 scf consumidos	EPA, 2014a	NP	Cifras aproximadas correspondientes a 2013, a partir de cifras de 2004; contenido energético: 103,706 KJ/galón

Notas: NP = no procede; scf = pies cúbicos estándar (del inglés: standard cubic feet); el CE es un sustituto del CN. Se ejecutó el modelo MOVES2014 para producir totales de CE y energía en EU, y el contenido energético se utilizó para convertir la energía total en galones a scf.

Factores de especiación (FS) de nivel 1

Nota: No se requieren factores de especiación para fuentes carreteras; los factores de emisión se incluyen ya en el CE.

### 3.3.2 FUENTES NO-CARRETERAS (FE)

Factores de emisión (FE) de nivel 1

Combustible	Fuente de emisión	Factor	Contaminante	Unidad	Referencia(s)	Núm. id. factor WebFIRE	Notas
Gasolina para motores de dos tiempos	Vehículos y equipo no-carreteros, Canadá y EU	472.759	PM <sub>2.5</sub>	gramos/galón consumido	NONROAD (EPA, 2014b)	NP	Se ejecutó el modelo NONROAD 2008 para obtener el total de EU correspondiente al año calendario 2013; diésel y gas con un contenido de azufre de 30 ppm. Total en gramos de PM <sub>2.5</sub> dividido entre el total de litros de combustible para todas las fuentes incluidas en el Código de Clasificación de Fuentes ( <i>Source Classification Code, SCC</i> ) de la EPA.
Gasolina para motores de cuatro tiempos	Vehículos y equipo no-carreteros, Canadá y EU	27.993	PM <sub>2.5</sub>	gramos/galón consumido	NONROAD (EPA, 2014b)	NP	
Gas licuado de petróleo	Vehículos y equipo no-carreteros, Canadá y EU	20.490	PM <sub>2.5</sub>	gramos/galón consumido	NONROAD (EPA, 2014b)	NP	
Gas natural comprimido	Vehículos y equipo no-carreteros, Canadá y EU	0.223	PM <sub>2.5</sub>	gramos/galón consumido	NONROAD (EPA, 2014b)	NP	
Diésel	Vehículos y equipo no-carreteros, Canadá y EU	86.337	PM <sub>2.5</sub>	gramos/galón consumido	NONROAD (EPA, 2014b)	NP	
Gasolina para motores de dos tiempos	Vehículos y equipo no-carreteros, México	440.132	PM <sub>2.5</sub>	gramos/galón consumido	NONROAD-México	NP	Se ejecutó el modelo NONROAD 2008 (EPA, 2014b) para el año modelado 1990 a fin de simular una flota no controlada; diésel con un contenido de azufre de 5,000 ppm y gas con un contenido de azufre de 30 ppm. Total en gramos de PM <sub>2.5</sub> dividido entre el total de litros de combustible para todas las fuentes incluidas en el Código de Clasificación de Fuentes ( <i>Source Classification Code, SCC</i> ) de la EPA. Metodología equivalente a la de NONROAD-México.
Gasolina para motores de cuatro tiempos	Vehículos y equipo no-carreteros, México	398.712	PM <sub>2.5</sub>	gramos/galón consumido	NONROAD-México	NP	
Gas licuado de petróleo	Vehículos y equipo no-carreteros, México	111.787	PM <sub>2.5</sub>	gramos/galón consumido	NONROAD-México	NP	
Gas natural comprimido	Vehículos y equipo no-carreteros, México	2.127	PM <sub>2.5</sub>	gramos/galón consumido	NONROAD-México	NP	
Diésel	Vehículos y equipo no-carreteros, México	362.373	PM <sub>2.5</sub>	gramos/galón consumido	NONROAD-México	NP	

Nota: NP = no precede



### 3.3.2 FUENTES NO-CARRETERAS (FS)

Factores de especiación (FS) de nivel 1

Fuente o tipo de combustible	CE (peso %) <sup>a</sup>	Referencia(s)	Núm. perfil SPECIATE (según proceda)	Incertidumbre SPECIATE (según proceda)	Notas
Vehículos y equipo no-carreteros: gasolina para motores de dos tiempos	12.19	SPECIATE (EPA 2011b)	91113	NP	
Vehículos y equipo no-carreteros: gasolina para motores de cuatro tiempos	12.19	SPECIATE (EPA 2011b)	91113	NP	
Vehículos y equipo no-carreteros: gas licuado de petróleo	12.19	SPECIATE (EPA 2011b)	91113	NP	Se supone igual al de la gasolina; no se encontró un FS específico para gas LP para motores de vehículos y equipo que no circulan por carretera.
Vehículos y equipo no-carreteros: gas natural comprimido	38.4	SPECIATE (EPA 2011b)	91112	NP	
Vehículos y equipo no-carreteros: diésel, no controlado <sup>1</sup>	44.39	SPECIATE (EPA 2011b)	3858, 3859	9.5%	Se aplica a flotas en México
Vehículos y equipo no-carreteros: diésel, promedio ponderado <sup>2</sup>	34.9	MOVES2014 (EPA 2014a); SPECIATE (EPA 2011b); NONROAD (EPA 2014b)	NP	NP	Se aplica a flotas en Canadá y EU

Notas: <sup>a</sup> El factor de especiación concierne al porcentaje de  $PM_{2.5}$  que corresponde a carbono elemental (CE). Se ha reconocido al CE como sustituto del CN en tanto no se disponga de mejores datos y métodos de medición. NP = no procede.

<sup>1</sup> El factor de especiación para CE registrado corresponde al porcentaje de emisiones de  $PM_{2.5}$

<sup>2</sup> Promedio ponderado para motores controlados (es decir, con dispositivos de tratamiento ulterior en la corriente de escape) y no controlados (sin tratamiento ulterior).

### 3.3.3 – 3.3.5 FUENTES MÓVILES (locomotoras, embarcaciones, aviación)

Factores de emisión (FE) de nivel 1

Combustible	Fuente de emisión	Factor	Contaminante	Unidad	Referencia(s)	Núm. id. factor WebFIRE	Notas
Diésel para locomotora	Móvil: locomotora	4.55900	PM <sub>2.5</sub>	gramos/galón consumido	Factores de emisión de la EPA para locomotoras (EPA, 2009b)	NP	Año calendario 2013
Diésel que cumple con las normas de una zona de control de emisiones (ZCE)	Móvil: embarcación	7.56300	PM <sub>2.5</sub>	gramos/galón consumido	Declaración de Análisis de Impacto de la Reglamentación ( <i>Regulatory Impact Analysis</i> ) de la EPA de EU (categorías 1 y 2, [EPA, 2007]; categoría 3, [EPA, 2009c])	NP	
Mezcla general de carburantes residuales	Móvil: embarcación	23.73500	PM <sub>2.5</sub>	gramos/galón consumido	OMI (2014), <i>Reduction of GHG Emissions From Ships</i> (Mitigación de las emisiones de GEI de buques) (julio de 2014)	NP	
Combustible para turbinas de aviación (turbosina)	Móvil: aeronave	0.62000	PM <sub>2.5</sub>	gramos/galón consumido	EMEP-EEA, 2013	NP	

Notas: NP = no procede.

Factores de especiación (FS) de nivel 1

Fuente o tipo de combustible	CE (peso %)*	Referencia(s)	Núm. perfil SPECIATE (según proceda)	Incertidumbre SPECIATE (según proceda)
Móvil: diésel para locomotora 2013	67.67	MOVES2014 para camiones de carga pesada a diésel ( <i>Heavy-Duty Diesel Truck</i> , HDDT) (EPA, 2014a)	NP	NP
Móvil: diésel para buque que cumple con las normas de una ZCE	77	EPA, 2013a	NP	NP
Móvil: mezcla general de carburantes residuales para buque	6	EPA, 2013a	NP	NP
Móvil: combustible para turbinas de aviación (turbosina)	13	EPA, 2013a	NP	NP

Notas: \* El factor de especiación concierne al porcentaje de PM<sub>2.5</sub> que corresponde a carbono elemental (CE). Se ha reconocido al CE como sustituto del CN en tanto no se disponga de mejores datos y métodos de medición. NP = no procede.

### 3.4 COMBUSTIÓN DOMÉSTICA

Factores de emisión (FE) de nivel 1

Combustible	Fuente de emisión	Factor	Contaminante	Unidad	Referencia(s)	Núm. id. factor WebFIRE	Notas
Carbón: antracita y lignito	Residencial	398	PM <sub>2.5</sub>	g/GJ	E MEP-EEA, 2013	NP	
Aceite destilado	Residencial	0.4	PM-filtrables	lb/1000 galones	WebFIRE (EPA, 2015b)	25362	No se dispone de FE de PM <sub>2.5</sub> para la combustión doméstica de aceite destilado. Los compiladores de inventarios pueden utilizar los datos de la distribución de partículas por tamaño del Consejo de Recursos Atmosféricos de California (CARB, 2014).
Queroseno	Residencial	0.4	PM-filtrables	lb/1000 galones	WebFIRE (EPA, 2015b)	25591	No se dispone de FE de PM <sub>2.5</sub> para la combustión doméstica de queroseno. Los compiladores de inventarios pueden utilizar los datos de la distribución de partículas por tamaño del Consejo de Recursos Atmosféricos de California (CARB, 2014).
Gas natural	Residencial	7.6	PM <sub>2.5</sub>	lb/millones pies cúbicos	WebFIRE (EPA, 2015b)	25420	El FE indicado corresponde a partículas suspendidas primarias (PS totales). De conformidad con WebFIRE, se presupone que todas las PS (totales, condensables y filtrables) tienen un diámetro aerodinámico inferior a 1.0 micrómetros. Por lo tanto, puede utilizarse el factor de emisión para PS a fin de calcular las emisiones de PM <sub>2.5</sub> .
Madera	Residencial	34.6	PM <sub>2.5</sub>	lb/ton	WebFIRE (EPA, 2015b)	25434	No se dispone de FE de PM <sub>2.5</sub> para la combustión doméstica de madera. Los compiladores de inventarios pueden utilizar los datos de la distribución de partículas por tamaño del Consejo de Recursos Atmosféricos de California (CARB, 2014).

Nota: NP = no procede.

Factores de especiación (FS) de nivel 1

Fuente o tipo de combustible	CE (peso %)*	Referencia(s)	Núm. perfil SPECIATE (según proceda)	Incertidumbre SPECIATE (según proceda)
Carbón: antracita y lignito	6.4	E MEP-EEA, 2013	NP	NP
Combustión de gas natural	6.7	SPECIATE (EPA, 2011b)	92156	NP
Combustión de petróleo	3.897896252	SPECIATE (EPA, 2011b)	5644	1.35%
Combustión de madera	5.579138067	SPECIATE (EPA, 2011b)	92105	NP

Notas: \* El factor de especiación concierne al porcentaje de PM<sub>2.5</sub> que corresponde a carbono elemental (CE). Se ha reconocido al CE como sustituto del CN en tanto no se disponga de mejores datos y métodos de medición. NP = no procede.

### 3.5 OTRAS FUENTES (FE)

Factores de emisión (FE) de nivel 1

Equipo o fuente	Fuente de emisión	Factor	Contaminante	Unidad	Referencia(s)	Núm. id. factor WebFIRE	Notas
Parrillas de banda	Cocina al carbón	0.049790839	PM <sub>2.5</sub>	lb/persona	NEI 2011 EU (EPA, 2013b)	NP	
Parrillas con fuente de calor en la parte interior	Cocina al carbón	0.4	PM <sub>2.5</sub>	lb/persona	NEI 2011 EU (EPA, 2013b)	NP	
Freidoras	Cocina al carbón	0	PM <sub>2.5</sub>	lb/persona	NEI 2011 EU (EPA, 2013b)	NP	
Planchas planas	Cocina al carbón	0.103	PM <sub>2.5</sub>	lb/persona	NEI 2011 EU (EPA, 2013b)	NP	
Planchas dobles	Cocina al carbón	0.006991186	PM <sub>2.5</sub>	lb/persona	NEI 2011 EU (EPA, 2013b)	NP	
No se especifica	Creación de restos humanos	1.569047619	PM <sub>2.5</sub>	lb/ton incinerada	NEI 2011 EU (EPA, 2013b)	NP	
No se especifica	Quema a cielo abierto: desechos sólidos urbanos (DSU)	34.8	PM <sub>2.5</sub>	lb/ton incinerada	NEI 2011 EU (EPA, 2013b)	NP	
No se especifica	Quema a cielo abierto: DSU	10.5	PM <sub>2.5</sub>	g/kg	Informe SNAP (INECC, 2013); Christian <i>et al.</i> , 2010	NP	Factor específico para México
No se especifica	Quema a cielo abierto: DSU	0.646	CN	g/kg	Informe SNAP (INECC, 2013); Christian <i>et al.</i> , 2010	NP	Factor específico para México
Incendio de estructura no adosada	Incendios estructurales	143.82	PM <sub>2.5</sub>	kg/incendio	Inventario de Emisiones de Noruega (Aasestad, 2007)	NP	
Incendio de estructura adosada	Incendios estructurales	61.62	PM <sub>2.5</sub>	kg/incendio	Inventario de Emisiones de Noruega (Aasestad, 2007)	NP	
Incendio de edificio de departamentos	Incendios estructurales	43.78	PM <sub>2.5</sub>	kg/incendio	Inventario de Emisiones de Noruega (Aasestad, 2007)	NP	
Incendio de estructura industrial	Incendios estructurales	27.23	PM <sub>2.5</sub>	kg/incendio	Inventario de Emisiones de Noruega (Aasestad, 2007)	NP	
Incendios de vehículos	Incendios de vehículos	2.3	PM <sub>2.5</sub>	kg/incendio	Inventario de Emisiones de Noruega (Aasestad, 2007)	NP	

Nota: NP = no procede.



### 3.5 OTRAS FUENTES (FS)

Factores de especiación (FS) de nivel 1

Fuente o tipo de combustible	CE (peso %)*	Referencia(s)	Núm. perfil SPECIATE (según proceda)	Incertidumbre SPECIATE (según proceda)	Notas
Cocina al carbón	4.056324426	SPECIATE (EPA, 2011b)	92116		
Incendios de vehículos	2.83	SPECIATE (EPA, 2011b)	3283	2.05	No se dispone de un perfil para incendios de vehículos; el perfil es para quema de llantas. Como alternativa, los compiladores de inventarios pueden optar por utilizar perfiles sustitutos disponibles en SPECIATE.
Incendios estructurales	5.579138067	SPECIATE (EPA, 2011b)	91105	NP	No se dispone de un perfil para incendios estructurales; el perfil es para combustión doméstica de madera. Como alternativa, los compiladores de inventarios pueden optar por utilizar perfiles sustitutos disponibles en SPECIATE.
Quema a cielo abierto: desechos sólidos urbanos (DSU)	1.52188727	SPECIATE (EPA, 2011b)	92126	NP	No se dispone de un perfil para quema de desechos sólidos urbanos a cielo abierto; el perfil es para combustión de desechos sólidos. Como alternativa, los compiladores de inventarios pueden optar por utilizar perfiles sustitutos disponibles en SPECIATE.
Creación de restos humanos	2.42	SPECIATE (EPA, 2011b)	3288	2.12	No se dispone de un perfil para cremación de restos humanos; el perfil es para incineradores. Como alternativa, los compiladores de inventarios pueden optar por utilizar perfiles sustitutos disponibles en SPECIATE.

Notas: \* El factor de especiación concierne al porcentaje de  $PM_{2.5}$  que corresponde a carbono elemental (CE). Se ha reconocido al CE como sustituto del CN en tanto no se disponga de mejores datos y métodos de medición.  
NP = no procede.