



El enfoque *bottom-up* y el control de calidad: imprescindibles en el inventario de emisiones de gases de efecto invernadero del sector industrial en San Luis Potosí, México*

The Bottom-up Approach and Quality Control: Essential for the Inventory of Greenhouse Gases Emission from the Industrial Sector in San Luis Potosi, Mexico

L'approche ascendante (*bottom-up*) et le Control Qualité: Indispensables à l'inventaire d'émissions de Gaz à Effet de Serre du secteur industriel de San Luis Potosi, Mexique

María Teresa Gutiérrez-Escajeda**, Pedro Medellín-Milán***, José Antonio Avalos-Lozano****, Alfredo Ávila-Galarza*****

Recibido: 2013-07-20 // Aprobado: 2013-08-25 // Disponible en línea: 2014-02-28

Cómo citar este artículo: Gutiérrez-Escajeda, M. T., Medellín-Milán, P., Avalos-Lozano, J. A. & Ávila-Galarza, A. (2014). El enfoque *bottom-up* y el control de calidad: imprescindibles en el inventario de emisiones de gases de efecto invernadero del sector industrial en San Luis Potosí, México. *Ambiente y Desarrollo*, 18(34), 93-108.

doi:10.11144/Javeriana.AYD18-34.ebcc

Resumen

El presente artículo muestra la importancia de la aplicación conjunta del enfoque *bottom-up* y las actividades de control de calidad (CC) en la estimación de los inventarios de gases de efecto invernadero (GEI). Se realizó el inventario de emisiones de GEI del sector de procesos industriales en el estado mexicano de San Luis Potosí, de acuerdo con la metodología del IPCC. La estimación se realizó primero siguiendo un enfoque *top-down*, resultando en 123820391 tonCO₂. Posteriormente se aplicó el enfoque *bottom-up* con el CC; las emisiones fueron 44948012. Finalmente, se plantea una secuencia lógica que conviene seguir en las actividades de CC, para el caso específico en que los datos provienen de bases gubernamentales que concentran la información de las empresas.

Palabras clave: enfoque de arriba hacia abajo; enfoque de abajo hacia arriba; control de calidad; inventario de emisiones; gases de efecto invernadero

Palabras clave descriptores: gases de combustión (mediciones); gases de invernadero; control de calidad

* Este artículo forma parte de los resultados del proyecto "Plan Estatal de Acción ante el Cambio Climático (PEACC)". Financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONAC yT) y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

** M.C. en Ingeniería Industrial. Alumna del Doctorado en Ciencias Ambientales en los Programas Multidisciplinarios de Posgrado en Ciencias Ambientales (PMPCA) de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), México. Correo electrónico: maytte0179@gmail.com

*** Doctor en Ciencias en Ingeniería Química. Profesor investigador en la Facultad de Ciencias Químicas de la UASLP, México. Correo electrónico: pmm@uaslp.mx

**** Doctor en Ciencias Ambientales. Profesor investigador en la Facultad de Agronomía de la UASLP, México. Correo electrónico: antonio.avalos@uaslp.mx

***** Doctor en Sistemas Energéticos y Control de los Procesos. Profesor investigador en la Facultad de Ingeniería de la UASLP. Correo electrónico: galarza@uaslp.mx

Abstract

This article shows the importance of applying jointly the bottom-up approach and the quality control (QC) activities on the estimation of the inventory of greenhouse gases (GHG). The inventory of the GHG emissions of the industrial processes sector in the Mexican state San Luis Potosi was performed according to the IPCC methodology. The estimation was first performed following a top-down approach, with a result of 123 820 391 ton of CO₂. Afterwards, the bottom-up approach was performed with the QC; resulting emissions were 44 948 012. Finally, a logic sequence convenient to follow for QC activities was set out, for the specific case when data comes from government bases that hold together the information from the companies.

Keywords: bottom-up approach; top-down approach; quality control; emissions inventory; greenhouse gases

Keywords plus: flue gases (measurement); greenhouse gases; quality control

Résumé

Cet article montre l'importance de l'application conjointe de l'approche ascendante (bottom-up) et les activités de Contrôle Qualité (CQ) dans l'estimation des inventaires de gaz à effet de serre (GES). L'inventaire d'émissions du GES du secteur des processus industriels dans l'État mexicain de San Luis de Potosi a été réalisé selon la méthodologie du GIEC. L'estimation a été d'abord réalisée en suivant une approche descendante (top-down) et en obtenant un résultat de 123820391 tonCO₂. Après, l'approche ascendante (bottom-up) avec le CQ se sont appliqués; les émissions ont été de 44948012. Finalement, une séquence logique a été proposée pour suivre les activités du CQ, pour le cas spécifique dans lequel les données proviennent des bases de données gouvernementales qui concentrent les informations dans des entreprises.

Mots-clés: approche ascendante; approche descendante; contrôle qualité; inventaire d'émissions; gaz à effet de serre

Mots-clés descripteur: gaz de combustion (mesures); bilan des émissions de gaz à effet de serre; qualité-contrôle

Introducción

Los inventarios de emisiones a la atmósfera son una fuente de información importante que se aplica para diversos propósitos: identificar las principales fuentes de emisión para aplicar las estrategias adecuadas y reducir sus impactos, así como servir de datos de entrada en la modelación de dispersión de contaminantes (McGraw, Haas, Young & Evens, 2010). Debido a la relevancia del inventario de emisiones, existe una demanda creciente para mantenerlos cada vez más precisos y actualizados (Lin et ál., 2005; Taghavi, Cautenet & Arteta, 2005).

El grado de detalle o alcance de un inventario de emisiones al aire depende del enfoque que se aplique durante su realización, ya sea el *bottom-up* (de abajo hacia arriba), que utiliza datos específicos del punto de emisión, o el *top-down* (de arriba hacia abajo), cuyo grado de detalle consiste en datos agregados a nivel sectorial, municipal, estatal o nacional (Davison et ál., 2008; US-EPA).

En algunos inventarios se han comparado los cálculos de las emisiones de fuentes móviles que se obtuvieron aplicando tanto el enfoque *top-down* como el *bottom-up*, y los resultados han reflejado tendencias similares en ambos, pero con diferencias en los valores absolutos.

En otros casos se obtuvieron tanto tendencias como valores totalmente discrepantes (Puliafito, Castro & Allende, 2011; Ciancarella et ál., 2011; Pallavidino et ál., 2011). Otros inventarios de fuentes móviles que se estimaron de acuerdo con el enfoque *bottom-up* o una combinación de los enfoques *top-down* y *bottom-up* han sido de gran utilidad para suministrar datos en la modelación de la calidad del aire (Ho & Clappier, 2011; Borge, Lumbreras, Tarrason & Rodríguez, 2011).

Los inventarios de fuentes puntuales estimados según el enfoque *bottom-up* requieren datos de actividad específicos (Zhao, Nielsen & McElroy, 2012; Jaramillo, Núñez, Ocampo, Pérez & Portilla, 2005). Sin embargo, en la mayoría de los países las emisiones a la atmósfera generadas por procesos industriales están normadas por instancias de gobierno, por lo que un mayor número de empresas solamente proporcionan información de sus emisiones a estas autoridades reguladoras (Baek, Unal, Tian & Russell, 2004; UPB, 2006). Por lo anterior, las bases de datos de instancias gubernamentales se convierten en una opción factible para realizar la estimación de los inventarios (SMA-DF, 2010; Funk et ál., 2001).

En un inventario llevado a cabo de conformidad con el enfoque *bottom-up* se pueden identificar con mayor precisión las principales fuentes de emisión, de tal forma que el inventario se convierte en una fuente confiable para la elección de las estrategias de reducción de emisiones más pertinentes (Dios, 2013). Por otra parte, cuando se aplican también los procedimientos de CC durante la realización de un inventario con enfoque *bottom-up*, las estimaciones generadas presentan mayor certeza (Funk et ál., 2001).

La inclusión de procedimientos de CC en los inventarios es de gran relevancia en la detección y corrección de anomalías. En algunos inventarios, las actividades de CC solo han consistido en la presentación de una lista que incluye las fuentes de información para los datos de actividad (Ambiental POCH, 2008). En otros, se han agregado las listas de chequeo o verificación que fueron usadas para supervisar los procedimientos de adquisición de datos, cálculos, estimación, validación y seguimiento (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2009). En forma más exhaustiva, otros inventarios han presentado con gran detalle cada una de las herramientas de calidad utilizadas, desde las listas de verificación aplicadas de manera específica para cada categoría de fuente, hasta la documentación de cada tipo de error detectado, su corrección y el personal responsable de tal corrección (SMED, 2006; Nielsen et ál., 2013).

Este artículo muestra las diferencias obtenidas en el inventario de emisiones de gases de efecto invernadero del sector de procesos industriales (IEEGEI-PI) de San Luis Potosí, calculado según los dos enfoques: *top-down* y *bottom-up* con CC. Se describe, a través de dos ejemplos, la estimación en

los dos casos, así como las diferencias obtenidas. Además, se presenta el resultado del IEEGEI-PI de acuerdo con los dos enfoques. Finalmente, se propone una secuencia lógica sobre los procedimientos de CC que conviene aplicar cuando los datos que servirán para la estimación provienen de bases que solo transcriben y concentran la información de industrias y gobierno.

Metodología

Las estimaciones del IEEGEI-PI realizadas siguiendo los dos enfoques se sustentaron en la metodología propuesta por el Panel Intergubernamental de Expertos del Cambio Climático (IPCC, por su sigla en inglés), comprendiendo el período 2000-2006. Específicamente, las guías utilizadas fueron: *las Directrices* versión 1996, *las Buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre*, así como los *manuales de referencia* (IPCC, 1997, 2000). Además, en algunos casos se utilizaron los factores de emisión de las mismas guías, versión 2006. La metodología se enfoca, de forma general, en la estimación de las emisiones de CO₂ (dióxido de carbono) con el uso de datos de actividad (DA) y los factores de emisión (FE) correspondientes, para lo cual se establece:

$$E = DA \times FE$$

Donde:

E = emisión del gas en cuestión (unidades de masa)

DA = cantidad de actividad o producción de material del proceso en cuestión

FE = cantidad de emisión de determinado gas, asociada al DA correspondiente.

A diferencia de lo que establecen las guías del IPCC, en este IEEGEI-PI se incluyeron también las emisiones de GEI derivadas del uso de combustible en los procesos industriales, de tal forma que se establecieron dos grupos dentro del sector de procesos industriales: las emisiones derivadas de los procesos, esto es, las generadas exclusivamente por la transformación de las materias primas utilizadas en el proceso, y las emisiones generadas por el uso de combustible en el proceso productivo. Cabe mencionar que para este último grupo las emisiones de GEI fueron estimadas como CO_{2e} (dióxido de carbono equivalente).

El uso de las unidades de CO_{2e} es para unificar las unidades de emisión de los diferentes GEI y comparar las emisiones entre diferentes sectores. Para hacer las equivalencias se toma en cuenta el potencial de calentamiento de cada uno de estos gases. En el caso del CO₂ se asigna como poder de calentamiento la unidad y, considerando un horizonte de vida de cien años, el poder de calentamiento asignado al metano (CH₄) es 21 y al óxido nitroso (N₂O) 310 (IPCC, 2008).

De conformidad con la metodología y la codificación del IPCC, las categorías incluidas en el IEEGEI-PI fueron: productos minerales (2A), industria química (2B), producción de metales (2C), otros productos industriales (2D), producción de halocarbonos y hexafluoruro de azufre (2E), consumo de halocarbonos y hexafluoruro de azufre (2F), así como la categoría de uso de solventes. En cada una de estas categorías se incluyen distintas subcategorías.

Se tomó como año base el 2005, debido a que los datos correspondientes a la base Datgen fueron los más completos. En el caso de los años que no se contó con información, se utilizaron los datos sustitutos más pertinentes, dependiendo de cada categoría. El IPCC sugiere el uso de datos sustitutos, siempre y cuando la estimación se vincule a la fuente de datos estadísticos que explique mejor las variaciones de la categoría a través del tiempo; por ejemplo: las emisiones industriales pueden relacionarse con los niveles de producción del ramo o sector correspondiente (IPCC, 1997).

Como lo recomienda la *Guía de las buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre*, se aplicaron las técnicas generales de CC: detección de la ocurrencia de errores de transcripción en las entradas de cada cifra, verificación para asegurar que las emisiones hayan sido calculadas correctamente, revisión

para confirmar que los factores de conversión y las unidades utilizadas hayan sido las correctas, comprobación sobre la coherencia de los datos entre categorías de fuentes, entre otras. Además, se realizaron procedimientos específicos de CC: requerimientos energéticos de cada proceso, comparación entre los índices de producción por categoría y los estatales o nacionales e inspección visual con gráficas para detectar diferencias en parámetros relativos (unidades energéticas por unidad de producción) o para detectar datos inusuales (IPCC, 2000).

Con el propósito de realizar el inventario según los dos enfoques: *top-down* y *bottom-up*, se recurrió a la búsqueda exhaustiva de datos con diferente resolución espacial: a nivel de planta, locales (municipio) y estatales. Por otra parte, los datos agregados a nivel estatal o nacional que se obtuvieron de series estadísticas oficiales sirvieron para la estimación según el enfoque *top-down* y para confrontar la información utilizada, con la finalidad de aplicar los procedimientos de CC.

A efectos de estimar las emisiones se requiere conocer la magnitud anual de las actividades para cada una de las categorías integradas en el inventario. Estas pueden consistir en cantidad de materias primas utilizadas, producción anual correspondiente a cada categoría o empresa, o tipo y cantidad de combustible consumido, entre otras. A fin de adquirir esta información se aplicaron diferentes recursos y se utilizaron diversas bases de datos (figura 1).

La primera fuente de información fue el Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE), en el cual se incluye información general de la totalidad de los establecimientos empresariales ubicados en San Luis Potosí. De la Secretaría de Ecología y Gestión Ambiental (Segam) se obtuvieron bases de datos de los permisos de operación de las empresas, así como algunos datos de las cédulas de operación anual estatales (COA). A través del Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC) se obtuvieron, por vía electrónica, las emisiones de GEI de algunas empresas. La información de mayor utilidad, por ser la más completa, se obtuvo de la base de datos generales del 2005 (Datgen), que es una base controlada e integrada por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat).

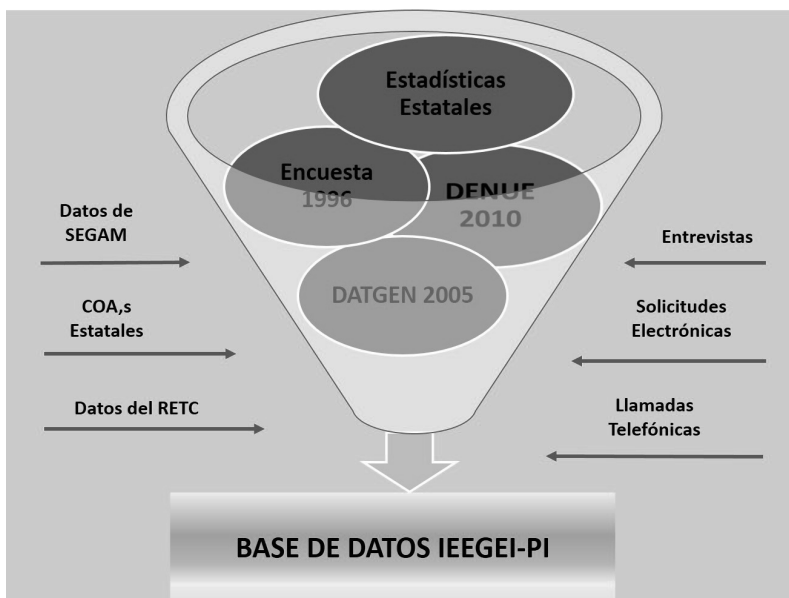


Figura 1. Esquema integrador de las bases de datos y los recursos utilizados en el desarrollo del IEEGEI-PI de San Luis Potosí

Fuente: elaboración propia

De acuerdo con los resultados obtenidos, y tomando en cuenta la contribución de cada una de las categorías de fuentes incluidas en el IEEGEI-PI, a continuación se muestran los resultados de la aplicación del enfoque *top-down*, así como del *bottom-up* y las actividades de CC, para la estimación de las emisiones de GEI en cada una de las dos subcategorías que más contribuyeron en las emisiones del IEEGEI-PI: producción de cemento (2A1) y producción de hierro y acero (2C1).

Resultados

Caso de la subcategoría 2C1: producción de hierro y acero

Estimación de GEI con enfoque *top-down*. A fin de llevar a cabo la estimación de las emisiones de CO₂ generadas en la producción de hierro y/o acero de acuerdo con el enfoque *top-down*, se utilizaron los datos agregados de la producción estatal de acero en San Luis Potosí (INEGI, 2005, 2008). Las guías del IPCC asignan un FE de 1,5 ton de CO₂ por tonelada de acero en el caso específico de que solo se conozca el volumen de producción como DA. De esta forma, las emisiones de CO₂ se obtuvieron del producto del FE y el DA (tabla 1).

Tabla 1
Estimación de las emisiones de CO₂ generadas por la subcategoría de producción de hierro y acero según el enfoque *top-down*

Año	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Acero (Ton)	510 625	506 466	524 717	555 177	578 250	527 954	559 831
CO ₂ (Ton)	765 938	759 699	787 076	832 766	867 375	791 931	839 747

Fuente: elaboración propia con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México (Inegi)

Estimación de GEI con enfoque *bottom-up* y control de calidad. En las bases de datos se identificaron más de una docena de empresas dentro de esta subcategoría. Tres de ellas, identificadas para el propósito del estudio como a, b y c, se destacaron del resto por su volumen en la producción de acero, específicamente, en la fabricación de varilla.

Como parte de las tareas generales de CC se revisaron y unificaron las unidades de producción de cada empresa de esta subcategoría incluidas en la base Datgen. Un mayor número de empresas expresaron sus unidades en toneladas, excepto la a, cuya producción en el 2005 fue de 44 808,77 m³. Para convertir esta cantidad se tomó en cuenta que la densidad de la varilla de acero de 3/8 de pulgada es 7,9 ton/m³ (Cemex, 2012), lo que resultó en un volumen de 2723989 ton.

Una vez unificadas las unidades de producción, y para continuar con la aplicación del CC, se contrastó la producción anual de cada una de las tres empresas con respecto al total estatal, que para el 2005 fue de 527954 ton (Inegi, 2012). Al analizar la producción de la empresa a, esta resultó por encima del total estatal (figura 2).

Debido a la discrepancia encontrada en la producción de la empresa a, se procedió a realizar una búsqueda de información más fiable y con un enfoque *bottom-up* más puntual. Por aclaración de la misma empresa, se concluyó que la cantidad de producción mostrada en la base de Datgen estaba correcta, pero las unidades eran en toneladas. Después de corregir el error, se procedió a aplicar la metodología para estimar las emisiones de GEI.

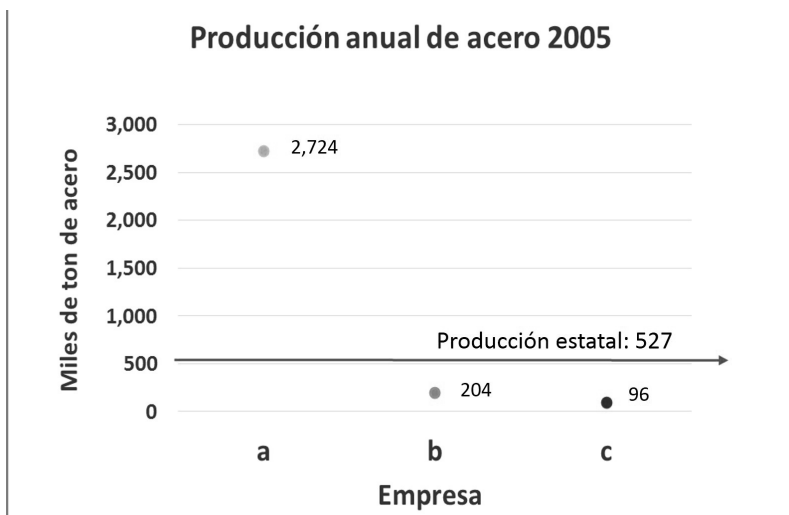


Figura 2. Producción anual de acero en San Luis Potosí. Volumen de los tres principales fabricantes en el estado, según base Datgen

Fuente: elaboración propia con datos del Inegi

La metodología más precisa para estimar las emisiones de CO₂ en esta categoría, según la *Guía de las buenas prácticas* (IPCC, 2000) es emplear como DA la cantidad del agente reductor en la producción de hierro y acero, esto es, el carbón o coque utilizado (IPCC, 1997). En la base de Datgen varias empresas informaron la cantidad de carbón o coque utilizada, con lo cual se logró establecer una relación entre la cantidad de acero producido y la cantidad de carbón utilizada.

En el 2005 la cantidad de carbón utilizada por la totalidad de las empresas de la presente subcategoría fue de 16 186,58 ton. Para estimar la cantidad de carbón en el resto de los años del inventario se utilizó como dato sustituto la tasa de variación anual en la producción de acero estatal (Inegi, 2005, 2008). Finalmente, se estimaron las emisiones de cada año, para lo cual se utilizó un FE de 3,1 ton de CO₂ por tonelada de agente reductor (grafito o coque), que es el FE por defecto sugerido por el IPCC (tabla 2).

Los resultados de las emisiones totales de GEI de la presente subcategoría siguiendo el enfoque *top-down* fueron 5 644 532 ton de CO₂. Después de haber aplicado el enfoque *bottom-up* y el CC, con lo cual se logró una mayor precisión en el cálculo, las emisiones resultaron en 357 650 ton. Una comparación de las emisiones anuales de acuerdo con los dos enfoques muestra la magnitud de las diferencias obtenidas, de tal forma que siguiendo el enfoque *top-down* se obtuvo una sobrestimación en las emisiones de diez veces más que la real (figura 3).

Tabla 2
Emisiones de CO₂ generadas por la subcategoría de producción de hierro y acero según el enfoque *bottom-up* y CC

Año	*Coque Ton	Emisiones Ton CO ₂
2000	15 655,29	48 531,41
2001	15 527,78	48 136,13
2002	16 087,34	49 870,76
2003	17 021,22	52 765,77

Año	*Coque	Emisiones
2004	17 728,61	54 958,70
2005	16 186,59	50 178,41
2006	17 164,25	53 209,19

Fuente: elaboración propia

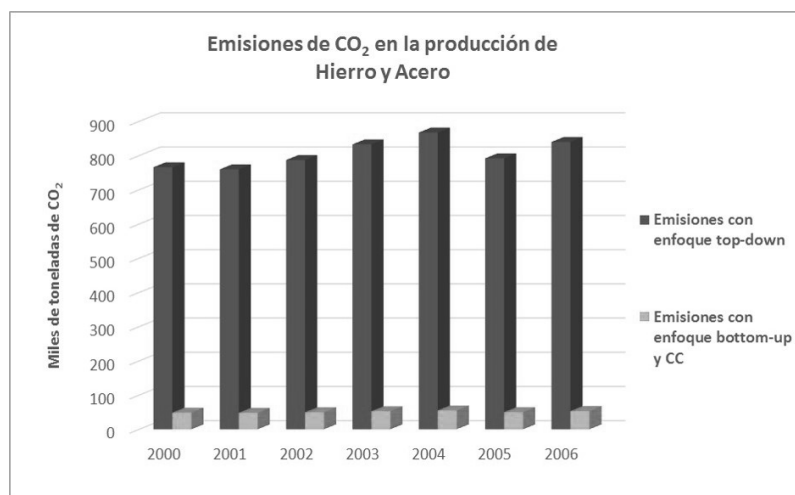


Figura 3. Emisiones de CO₂ exclusivas del proceso productivo en la subcategoría de hierro y acero de San Luis Potosí, estimadas siguiendo ambos enfoques

Fuente: elaboración propia

Caso de la subcategoría 2A1: producción de cemento

Estimación de las emisiones de GEI por el consumo de combustible con enfoque *top-down*. En San Luis Potosí se ubican tres empresas dedicadas a la producción de cemento. De la base de datos Datgen se tomó la información agregada del combustible de las tres empresas, que en el 2005 consumieron 3 382 807 m³ de combustóleo. A fin de conocer la cantidad de combustible para el resto de los años del inventario, se utilizó como dato sustituto la tasa de variación anual de la producción nacional de cemento, tomando como base el año 2005 (Canacem, 2013). Con la cantidad de combustóleo consumido se estimaron las emisiones de CO₂e para cada año del inventario (tabla 3).

Tabla 3
Emisiones de CO₂e generadas por el uso de combustible en la subcategoría de producción de cemento, estimadas de acuerdo con el enfoque *top-down*

Año	*CBL	FE CO ₂	CO ₂	FE CH ₄	CH ₄	FE N ₂ O	N ₂ O	CO ₂ e
	m ³	Ton CO ₂ /m ³	Ton	Ton CH ₄ /m ³	Ton	Ton N ₂ O/m ³	Ton	Ton
2000	3 089 696	3,11	9 619 879	1,21E-04	373	2,41E-05	75	9 650 826
2001	2 924 003	3,11	9 103 986	1,21E-04	353	2,41E-05	71	9 133 274
2002	3 031 216	3,11	9 437 799	1,21E-04	366	2,41E-05	73	9 468 161
2003	3 109 189	3,01	9 373 132	1,17E-04	363	2,34E-05	73	9 403 286

2004	3 236 576	3.11	10,070,889	1.21E-04	390	2.41E-05	78	10,103,288
2005	**3 382 807	2,93	9 917 876	1,14E-04	384	2,27E-05	77	9 949 782
2006	3 694 766	2,93	10 832 492	1,14E-04	420	2,27E-05	84	10 867 341

Fuente: elaboración propia

* Combustóleo ** Año base

Estimación de GEI con enfoque *bottom-up* y control de calidad. De la base de datos Datgen se identificaron las tres empresas productoras de cemento –identificadas para el propósito del estudio como: a, b y c–, así como sus respectivas cantidades de producción, materias primas y combustible consumido. De acuerdo con la cifra reportada de su producción, se realizó el cálculo del clinker, que es el primer producto dentro del proceso en la producción del cemento.

Antes de hacer la estimación de las emisiones por el uso de combustible para la subcategoría de cemento, de conformidad con el enfoque *bottom-up*, se aplicaron los procedimientos generales de CC y posteriormente se llevó a cabo un cálculo de referencia como medida de CC, con el fin de conocer la intensidad energética por unidad física de producción de cada una de las empresas. De esta forma, se comprobó si las cantidades de combustible eran congruentes con el volumen de producción.

La cantidad y el tipo de combustible reportado permitió calcular la intensidad energética (IE) de cada empresa (tabla 4), esto es, la relación entre el consumo energético y las unidades producidas:

$$IE = CE / PT$$

Donde:

IE = intensidad energética

CE = Consumo de energía

PT = producción total

Para el consumo de energía se utilizó un poder calorífico de 37 858,4412 MJ por metro cúbico de combustóleo (Sener, 2006).

Tabla 4
Intensidad energética en la producción de clinker en el 2005 con datos de Datgen

Empresa	Clinker	Combustóleo	Consumo Energético por Combustóleo	Intensidad Energética
	Kg	m ³	37 858,44 MJ/m ³	*MJ/kg clinker
a	935 557 000	710,84	26 911 294,34	0,03
b	319 419 000	3 378 013,00	127 886 306 533,34	400,37
c	1 302 471 000	4 083,36	154 589 644,50	0,12

Fuente: elaboración propia

* Megajoules

En la práctica, el consumo energético requerido para la fabricación de un kilogramo de clinker oscila entre 3,6 y 4,5 MJ (Gilisagasti Pérez y Elorza Uria, 1999; IMCYC, 2000; Ministerio de Medio Ambiente, 2004). Considerando esto, se concluye que en definitiva la intensidad energética de cada una de las empresas analizadas está fuera de este rango (figura 4). Por esto, se procedió a realizar una búsqueda de información más fiable y con un enfoque *bottom-up* más puntual sobre los DA de las empresas.

La empresa a proporcionó la información de sus emisiones anuales de CO₂ en el periodo 2004-2006, desglosándolas en emisiones generadas por el uso de combustible y liberadas por el proceso. Se obtuvo que el 34% de las emisiones generadas en la producción de cemento fueron atribuibles al uso de combustible, porcentaje que está dentro del rango normal de las emisiones por el uso de combustible en

la producción de cemento (Ali, Saidur & Hossain, 2011; Anand, Vrat & Dahiya, 2006).

De la base del RETC se conocieron las emisiones totales de las empresas b y c en el periodo 2004-2006, a las cuales se les aplicó la proporción de 34% para estimar las emisiones generadas por el uso de combustible, asumiendo una similitud en los procesos productivos. Posteriormente se aplicó el FE correspondiente y se calculó la cantidad de combustóleo (tabla 5).

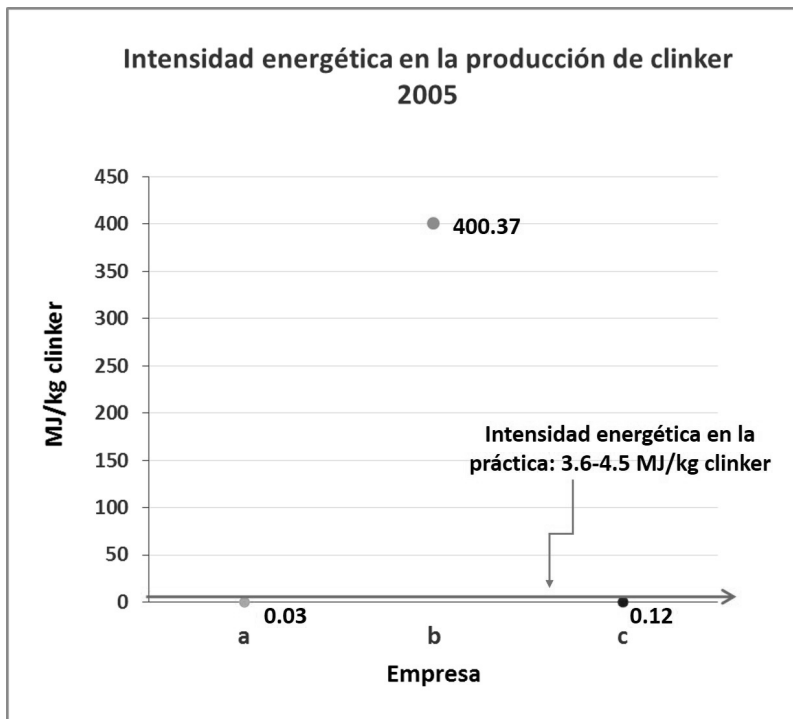


Figura 4. Intensidad energética de las empresas cementeras con respecto a la producción estatal. Cálculos a partir de Datgen
Fuente: elaboración propia

Tabla 5

Cálculo regresivo del combustóleo (cbl) usado por las empresas productoras de cemento en el 2004

Empresa	Emisiones Totales	Emisiones por Combustible	Factor de Emisión del CBL	Combustible (M ³)
	Ton	34%	Ton CO ₂ /m ³	DA=E/FE
a	411 768,00	140 737,00	3,11	45 253
b	372 148,52	126 530,50	3,11	40 685
c	1 269 475,72	431 621,74	3,11	138 785

Fuente: elaboración propia

Con el fin de hacer la estimación de los años 2000-2003, se utilizó el dato sustituto de la tasa de variación anual de la producción nacional de cemento (Canacem, 2013). Finalmente, con los datos estimados del combustóleo para el periodo completo del inventario, se estimaron las emisiones anuales con enfoque *bottom-up* y CC (tabla 6).

Tabla 6
Emisiones de CO₂e generadas en la subcategoría de producción de cemento por el uso de combustible, con enfoque *bottom-up* y CC

Año	CBL	FE CO ₂	CO ₂	FE CH ₄	CH ₄	FE N ₂ O	N ₂ O	CO ₂ e
	m ³	Ton CO ₂ /m ³	Ton	Ton CH ₄ /m ³	Ton	Ton N ₂ O/m ³	Ton	Ton
2000	171 362	3,11	533 540	1,21E-04	21	2,41E-05	4	535 257
2001	162 172	3,11	504 928	1,21E-04	20	2,41E-05	4	506 552
2002	168 118	3,11	523 442	1,21E-04	20	2,41E-05	4	525 126
2003	172 443	3,01	519 855	1,17E-04	20	2,34E-05	4	521 528
2004	224 723	3,11	699 246	1,21E-04	27	2,41E-05	5	701 495
2005	375 647	2,93	1 101 338	1,14E-04	43	2,27E-05	9	1 104 881
2006	396 624	2,93	1 162 842	1,14E-04	45	2,27E-05	9	1 166 582

Fuente: elaboración propia

Los resultados de las emisiones totales de GEI de la presente subcategoría siguiendo el enfoque *top-down* fueron 68 575 958 ton de CO₂. Después de haber aplicado el enfoque *bottom-up* y el CC, con lo cual se logró una mayor precisión en el cálculo, las emisiones obtenidas fueron 5 061 422 ton. Una comparación de las emisiones anuales teniendo en cuenta los dos enfoques, muestra las diferencias obtenidas, de tal forma que según el enfoque *top-down* se obtuvo una sobrestimación en las emisiones totales de hasta trece veces más las que realmente correspondían (figura 5).

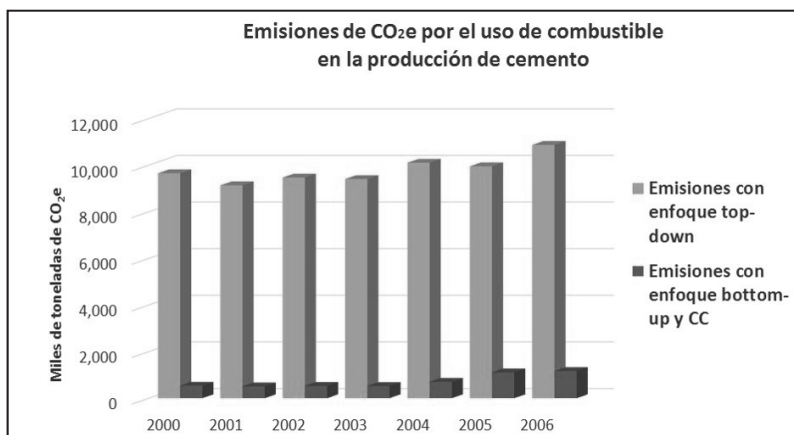


Figura 5. Emisiones de CO₂e por el uso de combustible en la subcategoría de cemento de San Luis Potosí, estimadas siguiendo ambos enfoques

Fuente: elaboración propia

Resultados totales del IEEGEI-PI

Después de haber llevado a cabo las estimaciones correspondientes a cada categoría del sector de procesos industriales de acuerdo con ambos enfoques, las diferencias que se obtuvieron son evidentes (figura 6). En el periodo completo del inventario (2000-2006) las emisiones de CO₂e, de conformidad con el enfoque *top-down*, fueron 123 820 391 ton, y después de haber aplicado las herramientas de CC y el enfoque *bottom-up*, estas mismas fueron 44 948 012 ton. Cabe mencionar que aunadas a los dos ejemplos anteriormente expuestos en este artículo, se detectaron y corrigieron otras anomalías detectadas en los datos de otras subcategorías.

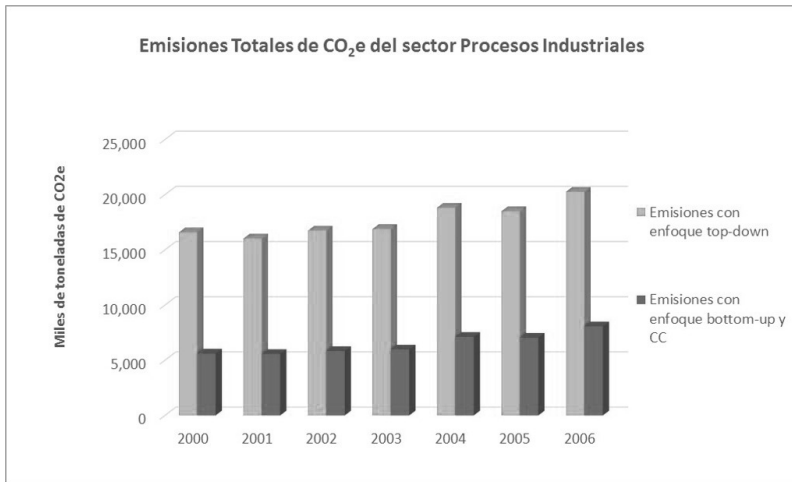


Figura 6. Emisiones totales de CO₂e del sector de procesos industriales (incluyen las emisiones por la transformación de materias primas y por el uso de combustible en los procesos)

Fuente: elaboración propia

Conclusiones y recomendaciones

Puliafito, Castro y Allende (2011) realizaron un inventario de emisiones de fuentes móviles siguiendo los dos enfoques que se tratan en el presente artículo y concluyeron que las tendencias en los resultados eran semejantes, pero con diferencias en los valores absolutos de las emisiones. Por su parte, Dios Noceda (2013) indica que uno de los grandes beneficios de haber aplicado el enfoque *bottom-up* en el inventario fue la detección de las categorías principales de emisión.

Nosotros hemos experimentado lo que los autores arriba mencionados concluyeron en sus inventarios de fuentes móviles; sin embargo, hemos demostrado que, tratándose de un inventario de emisiones para fuentes fijas, las diferencias obtenidas al aplicar los enfoques en cuestión pueden llevar a estimaciones totalmente discrepantes: las emisiones de CO₂e estimadas de acuerdo con el enfoque *top-down* alcanzaron 123 820 391 ton, y después de haber aplicado el enfoque *bottom-up* y los procedimientos de CC estas fueron 44 948 012 ton. Por otra parte, se identificó que la subcategoría más contribuyente en las emisiones, con un 39%, es la 2A1: cemento; la segunda más contribuyente, con una participación del 22%, es la 2C1: hierro y acero, seguida por la 2D2: alimentos, que contribuye con el 21% del total del IEEGEI-PI.

Identificamos, por el enfoque *bottom-up*, varios puntos importantes y de gran utilidad para perfilar las posibles estrategias de reducción de emisiones: en el 2004 se instaló en San Luis Potosí la tercera empresa productora de cemento, la cual contribuyó con el 33% de las emisiones de la subcategoría de cemento en el 2006, ocupando con esto el segundo lugar dentro de esta subcategoría. Por otra parte, el 85% de las emisiones de GEI de la subcategoría de hierro y acero se generaron solo por tres empresas de este sector; y dentro de la subcategoría de alimentos más del 90% de las emisiones se originaron en la producción de azúcar.

Por otra parte, como se demostró en los ejemplos explicados en este artículo, la aplicación de los procedimientos de CC es una fase necesaria para la estimación de las emisiones. La detección y corrección oportuna de las anomalías en las bases que sirvieron como DA para la estimación del IEEGEI-PI de San Luis Potosí contribuyó en forma significativa, evitando que las emisiones se

sobreestimarán en tres veces más a las correspondientes. Por lo anterior, queremos enfatizar que la aplicación del CC debe convertirse en una tarea imprescindible cuando los DA provienen de bases que solo transcriben y concentran la información que, previamente, las empresas han entregado a las instancias gubernamentales ambientales.

Es importante señalar que detectamos que en las bases de datos utilizadas se otorga una mayor importancia a lo referente a cantidad de combustibles, más que a las materias primas o la producción. En años anteriores, los inventarios solo estaban perfilados en conocer las emisiones de contaminantes, especialmente los llamados contaminantes criterio. Sin embargo, para los inventarios de emisiones de GEI es necesario que las bases incluyan con exactitud los tipos y cantidades de las materias primas utilizadas en los procesos, debido a que muchas de estas son fuentes importantes de GEI.

Tomando en cuenta la gran utilidad del inventario de emisiones como fuente valiosa de información en las políticas de acción para abatir tanto la contaminación atmosférica como los efectos del calentamiento global, proponemos y recomendamos algunas acciones que pueden ser de utilidad para la estructuración de una nueva base de datos confiable, derivada de las ya existentes en las instituciones gubernamentales ambientales:

1. Tener un conocimiento general previo de los procesos productivos de los distintos giros industriales; sobre todo, conocer los requerimientos energéticos en cada proceso. Es importante conocer los productos generados, las principales materias primas utilizadas y la proporción usada de cada una de estas durante el proceso de transformación, así como el tipo de emisiones liberadas.
2. Conocer el formato que cada institución gubernamental ambiental tiene establecido como requisito obligatorio que cada empresa debe presentar. La importancia de esto radica en conocer la temporalidad de cada formato, así como las unidades que requiere para cada uno de los productos o materias primas.
3. Buscar los directorios empresariales existentes, de diferentes años, en los cuales se detalle toda la información posible acerca de cada una de las empresas ubicadas dentro de la región en cuestión. Conocer con precisión el inicio de operaciones de nuevas empresas, así como la clausura de otras, es de gran utilidad cuando los resultados del inventario se utilizan para construir proyecciones de las emisiones.
4. Buscar y concentrar toda la información estadística agregada sobre la dinámica productiva de cada uno de los giros industriales, según la región en cuestión. Aunque el propósito para la estimación del inventario es utilizar el enfoque *bottom-up*, el tener información agregada a nivel municipal, estatal o nacional servirá para cruzar la información agregada con la sumatoria de la desagregada.
5. Conocer las características de los combustibles, como su poder calorífico y los factores de emisión correspondientes. Al conocer el requerimiento energético de cada uno de los diferentes procesos productivos, se puede hacer una comparación con la cantidad y tipo de combustible que declara cada empresa.
6. Hacer comparaciones a través del tiempo acerca de las cifras productivas o del combustible consumido por cada empresa, con la finalidad de verificar la consistencia en la dinámica productiva de cada empresa o rama industrial.
7. Utilizar diversas herramientas de calidad, tales como distribuciones de frecuencia, diagramas de puntos, diagramas de dispersión, cálculo de percentiles, entre otras. Esto con el fin de visualizar y detectar aquellas cifras que de manera evidente resultan exageradas (cantidades en extremo pequeñas o grandes) en la cantidad de producto, materias primas o combustible consumido.
8. Posteriormente, se sugiere agotar cualquier recurso que permita conocer con exactitud las cantidades identificadas como “sospechosas” o “anómalas”, que resultan incongruentes con la naturaleza del proceso correspondiente. Para esto se debe hacer una búsqueda en sitios oficiales de la empresa; acudir de manera directa a la instancia de gobierno que le solicita dicha información, para comparar la cifra con la declarada en años anteriores; realizar llamadas telefónicas a la empresa o acudir directamente a solicitar la información.

9. Hacer comparaciones entre empresas que tengan características similares en variables clave: productos, materias primas, número de empleados, etc. Esto servirá para estimar, por proporción, la cantidad de aquellas variables no declaradas por alguna de las empresas y que será útil como DA para estimar las emisiones totales de cada categoría.
10. Finalmente, se recomienda comparar los resultados de cada subcategoría o sector con respecto a su equivalente en otras entidades dentro del país, cuidando en lo posible que se tengan características similares en dichos sectores. Estas comparaciones pueden resaltar posibles errores que se cometen en los cálculos o hacer evidente la ausencia de información para una estimación más completa.

Referencias

- Ali, M., Saidur, R. & Hossain, M. (2011). A review on emission analysis in cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 2252-2261.
- Ambiental POCH (2008). *Inventario nacional de emisiones de gases efecto invernadero*. Santiago de Chile: Comisión Nacional del Medio Ambiente Conama.
- Ministerio de Medio Ambiente de España (2004). *Guía de mejores técnicas disponibles en España de fabricación de cemento*. Madrid: Centro de Publicaciones de la Secretaría General Técnica del Ministerio de Medio Ambiente.
- Anand, S., Vrat, P. & Dahiya, R. (2006). Application of a system dynamics approach for assessment and mitigation of CO₂ emissions from the cement industry. *Journal of Environmental Management*, 79, 383-398.
- Baek, J., Unal, A., Tian, D. & Russell, A. (2004). Improvements in the point source emissions inventory for Georgia. *13th International Emission Inventory Conference "Working for Clean Air in Clearwater"*. Clearwater, FL, Estados Unidos.
- Borge, R., Lumberreras, J., Tarrason, L. & Rodríguez, E. (2011). Emission needs at local scale for air quality modelling. *14th Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes* (pp. 767-771). Kos, Grecia.
- Cámara Nacional del Cemento (Canacem) (2013). *Producción de cemento 2000-2012*. Recuperado el 14 de agosto de 2012, de http://www.canacem.org.mx/la_industria_del_cemento.htm.
- Cemex (2012). *El manual del constructor*. México, D. F.
- Ciancarella, L., Briganti, G., Calori, G., Cappelletti, A., Cionni, I., Costa, M. & Zanini, G. (2011). National Italian integrated atmospheric model on air pollution: Sensitivity to emission inventory. *14th Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes* (pp. 277-281). Kos, Grecia.
- Davison, S., van den Elshout, S., Wester, B., Honoré, C., Lazano, A., Nussio, F. & Ziba, B. (2008). *Integrated urban emission inventories*. Schiedam, Holanda: European Regional Development Fund.
- Dios Noceda, M. (2013). *Estimación, análisis y evaluación de inventarios de emisiones atmosféricas antropogénicas a escala local, regional y continental* (tesis doctoral). Universidad de Santiago de Compostela, Galicia, España.
- Funk, T. H., Chinkin, L. R., Roberts, P. T., Saeger, M., Mulligan, S., Páramo Figueroa, V. H. & Yarbrough, J. (2001). Compilation and evaluation of a Paso del Norte emission inventory. *The Science of the Total Environment*, 276, 135-151.
- Gilisagasti Pérez, N. & Elorza Uria, E. (s.f.). *El cemento*. Recuperado el 18 de agosto de 2013, de: <http://www.sc.edu.es/iawfemaf/archivos/materia/industrial/libro-7a.PDF>
- Ho, B. Q. & Clappier, A. (2011). Road traffic emission inventory for air quality modelling and to evaluate the abatement strategies: A case of Ho Chi Minh City, Vietnam. *Atmospheric Environment*, 45, 3584-3593.
- Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC) (2000). *Hacia un concreto ecológico*. Recuperado el 22 de septiembre de 2013, de <http://www.imcyc.com/revista/2000/feb2000/ecolog.html>.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi) (2005, 2008). *La industria siderúrgica en México 2011. Serie estadísticas sectoriales*. Aguascalientes, Ags.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (1997). *Las directrices del IPCC para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Versión revisada de 1996*.

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2000). *Orientación del IPCC sobre las buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre*. Capítulo 8: "Garanatía de la calidad y control de calidad".
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2008). *Cambio climático 2007 Base de ciencia física*. Contribución del Grupo de Trabajo al cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático.
- Jaramillo, M., Núñez, M., Ocampo, W., Pérez, D. D. & Portilla, G. (2005). Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos por fuentes puntuales en la zona Cali-Yumbo (Colombia). *Ingeniería y Desarrollo*, 17, 115-129.
- Lin, C.-J., Ho, T., Chu, H.-W., Yang, H., Mojica, M., Krishnarajanagarb, N. & Hopper, J. (2005). A comparative study of US EPA 1996 and 1999 emission inventories in the west Gulf of Mexico coast region, USA. *Journal of Environmental Management*, 75, 303-313.
- McGraw, J., Haas, P., Young, L. & Evens, A. (2010). Greenhouse gas emissions in Chicago: Emissions inventories and reduction strategies for Chicago and its metropolitan region. *Journal of Great Lakes Research*, 36, 106-114.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2009). *Manual de evaluación del programa de inventario de emisiones*. Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Bogotá: MAVDT.
- Ministerio de Medio Ambiente de España (2004). *Guía de mejores técnicas disponibles en España de fabricación de cemento*. Madrid: Centro de Publicaciones de la Secretaría General Técnica del Ministerio de Medio Ambiente.
- Nielsen, O. K., Plejdrup, M., Winther, M., Gyldenkærne, S., Thomsen, M., Nielsen, M. & Bruun, H. (2013). *Quality manual for the Danish greenhouse gas inventory Version 2*. Aarhus University, DCE - Danish Centre for Environment and Energy.
- Pallavidino, L., Prandi, R., Costa, M., Nanni, A., Bertello, A., Bracco, E. & Pavone, F. (2011). Top-down vs. Bottom-up approach in delineating traffic role in air quality scenarios. *14th Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes* (pp. 307-311). Kos, Grecia.
- Puliafito, E., Castro, F. & Allende, D. (2011). *Transporte y calidad del aire en Mendoza informe N° 3: Emisiones del transporte urbano de pasajeros*. Mendoza: Centro de Estudios para el Desarrollo Sustentable.
- Secretaría de Energía (Sener) (2006). *Balanza nacional de energía 2005*. México, D. F.: Sener.
- SMED (2006). *Manual for SMED:s quality system in the Swedish air emission inventories*. Norrköping, Suecia: Swedish Environmental Emissions Data.
- Taghavi, M., Cautenet, S. & Arteta, J. (2005). Impact of a highly detailed emission inventory on modeling accuracy. *Atmospheric Research*, 74, 65-88.
- United Nations Environment Programme (UNEP) (2012). *The emissions gap report 2012*. Nairobi, Kenia: UNEP.
- Universidad Pontificia Bolivariana (2006). *Actualización del inventario de emisiones atmosféricas en el Valle de Aburrá, con georreferenciación de éstas*. Medellín, Colombia: Universidad Pontificia Bolivariana.
- United States Environmental Protection Agency (US-EPA) (s.f.). *Developing a greenhouse gas inventory*. Recuperado el 22 de junio de 2013, de <http://www.epa.gov/statelocalclimate/local/activities/ghg-inventory.html>.
- Zhao, Y., Nielsen, C. P. & McElroy, M. B. (2012). China's CO2 emissions estimated from the bottom up: Recent trends, spatial distributions, and quantification of uncertainties. *Atmospheric Environment*, 59, 214-223.