

**ESTIMACIÓN DE LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO PARA EL ESTADO DE DURANGO, MÉXICO****GREENHOUSE GAS EMISSION INVENTORY OF DURANGO STATE, MEXICO**

M.A. Martínez-Prado*

Instituto Tecnológico de Durango, Blvd. Felipe Pescador # 1830 Ote. Col. Nueva Vizcaya, C. P. 34080, Durango, Dgo., México.

Recibido 3 de octubre de 2015; Aceptado 15 de mayo de 2016

Resumen

Se realizó el inventario estatal de emisiones de gases de efecto invernadero para el estado de Durango tomando como base el año 2005 así como su tendencia para el período 2005-2008. Se consideraron únicamente al CO₂, CH₄ y N₂O en el cálculo, por ser los tres GEI directos más importantes, y las cifras totales están expresadas en Gigagramos de CO₂ equivalente. Los resultados promedio anuales obtenidos para cada una de las categorías fueron: Energía (11,400.54), Agricultura (2,664.90), Procesos Industriales y Solventes (874.80) y Residuos (693.78); observándose una tendencia creciente del 2005 al 2008 equivalente al 28.25%. En el caso de la categoría de Uso de Suelo, Cambio de Uso de Suelo y Silvicultura se realizó un balance de captura neta (- 4,007.01) y emisión total (4,298.18) dando como balance total 272.17 Gg CO₂ eq. Las emisiones totales para el 2005 y 2008 fueron 13,474.04 y 17,281.12, respectivamente; con un promedio para el periodo 2005-2008 de 15,906.19 Gg CO₂ eq. También se estimaron las emisiones de los gases indirectos: NO_x, CO, COVNM y SO₂, expresados en Gigagramos; siendo el CO el más abundante. Con base en la identificación de las fuentes de emisión en cada categoría se propusieron las medidas de mitigación correspondientes.

Palabras clave: gases de efecto invernadero, año base, categorías, subcategorías, Gg CO₂ eq, medidas de mitigación.

Abstract

Greenhouse gas inventory for Durango State was performed taking 2005 as base year and its tendency for 2005-2008. Only CO₂, CH₄, and N₂O were considered in this calculation as the most important direct GHG, and the total values are expressed as Gigagrams of equivalent CO₂. The annual average results for each of the categories were: Energy (11,400.54), Agriculture (2,664.90), Industrial Processes and Solvents (874.80), and Waste (693.78); with an increasing trend from 2005 through 2008 equal to 28.25%. In the case of Land Use, Land-Use Change and Forestry category a net capture balance (- 4,007.01) and total emission (4,298.18) was estimated resulting in 272.17 Gg CO₂ eq as the total balance. Total emissions for 2005 and 2008 were 13,474.04 and 17,281.12, respectively; with an average of 15,906.19 Gg CO₂ eq for the same period. Indirect gas emissions of NO_x, CO, NMVOC, and SO₂, were also estimated and expressed as Gg; where CO was the most abundant emission. Mitigation measures were proposed based on identified emission sources for each category.

Keywords: greenhouse gases, base year, categories, subcategories, Gg CO₂ eq, mitigation measures.

1 Introducción

Hoy en día son más que evidentes los problemas ambientales que la sociedad enfrenta, mismos que se derivan del desmedido crecimiento poblacional vinculado a la creciente demanda de bienes y servicios y su directa repercusión sobre la explotación de los recursos naturales. El uso indiscriminado de combustibles fósiles (gasolina, petróleo carbón, diésel, etc.), la deforestación, la generación de residuos, el uso y cambio de uso de suelo, la agricultura, la ganadería, la industria de la transformación, entre otras, son actividades antropogénicas (producidas por

los humanos) de las cuales proceden los gases de efecto invernadero (GEI) y son las responsables del aumento de su concentración en la atmósfera del planeta.

Los GEI se clasifican en directos e indirectos con base en la inducción al forzamiento radiativo. Los directos son aquellos gases que inducen el calentamiento global y a los cuales se les atribuye el aumento de la temperatura del planeta así como la variabilidad climática regional: bióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O),

* Corresponding author. E-mail: adriana.martinez@orst.edu

hidrofluorocarbonos (HFC's), perfluorocarbonos (PFC's) y el hexafluoruro de azufre (SF₆). Por su parte los gases indirectos son aquellos que tienen impacto en la química atmosférica modificando la vida de los GEI directos en la atmósfera: monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano (COVDM).

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en Inglés) fue creado en 1988 y su función ha sido evaluar de manera integral y presentar reportes anuales acerca del estatus y avances sobre conocimientos científicos, técnicos y socioeconómicos en materia de cambio climático; actualmente se cuenta con el quinto informe de evaluación (AR5, acrónimo de Fifth Assessment Report) mismo que fue terminado y aprobado en noviembre del 2014. El IPCC estableció las metodologías para estimar las emisiones de GEI y las actualiza periódicamente de manera tal que permite conocer la contribución de los países en el contexto internacional. El IPCC destaca en su quinto reporte (AR5) la certeza en un 95% de que la principal causa del calentamiento global es atribuible a las actividades humanas y que si estas no se controlan los riesgos serán mayores, haciendo que los impactos sobre la población y los ecosistemas sean irreversibles (IPCC, 2015).

Cabe destacar que el Protocolo de Kyoto (PK) de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) se aprobó en 1998 y en este se establecen una serie de medidas centradas en el objetivo de controlar las emisiones de los seis GEI directos por su impacto en el calentamiento global; el PK compromete a que los países industrializados establezcan sus emisiones de GEI, mientras que por su parte la Convención únicamente los alienta (CMNUCC, 1998).

En México, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) publicó en diciembre de 2009 el Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (INEGEI) para el período 1990-2006 (INECC, 2009), a través del Instituto Nacional de Ecología (INE) hoy Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). A la fecha, México es el único país que ha presentado cinco comunicaciones nacionales (SEMARNAT-INECC, 2012) y ha actualizado su INEGEI, apegándose a los lineamientos y metodologías establecidas por el IPCC. Cabe resaltar que desde 2008 el INECC ha otorgado apoyo a los estados para que realicen sus inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero (IEEGEI) mismos que

forman parte de los Programas Estatales de Acción ante el Cambio Climático (PEACC); ello a través de la gestión de recursos económicos nacionales e internacionales, capacitación de grupos en el desarrollo y elaboración de las guías metodológicas, así como de la actualización de los inventarios existentes.

El análisis comparativo realizado por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) resalta la diversidad de problemas que presentan los inventarios de países no-Anexo I (países en vías de desarrollo), los cuales impiden contar con inventarios consistentes y comparables; de ahí la importancia de establecer un sistema continuo para la elaboración y actualización de inventarios, además de la necesidad de documentarlo y proporcionar las hojas de cálculo originales (OCDE, 2003). De igual manera es importante contar con series de tiempo comparables y su análisis, a nivel regional, nacional e internacional, que permitan evaluar el comportamiento de las emisiones; el uso de nuevas variables para el desarrollo de indicadores para la toma de decisiones y la clasificación de los países según su nivel de desempeño ambiental; y la inclusión de políticas ambientales nacionales e internacionales más estrictas como un compromiso real hacia un entorno global limpio (Márquez-Ramos, 2015).

Un inventario estatal de emisiones (IEEGEI) brinda el panorama que guardan los estados, en cuanto a la emisión-captura por fuentes, para cada uno de los sectores económicos; como resultado, dicho inventario permitirá identificar las áreas de oportunidad para la reducción de emisiones proponiendo las medidas de mitigación correspondientes y su contribución al inventario nacional (INEGEI). La elaboración del IEEGEI-Durango tuvo sus inicios en el 2010, tomando como año base el 2005 para la estimación de las emisiones así como su tendencia para el período 2005-2008; la versión definitiva fue presentada ante el INECC en el 2014, como parte del PEACC (Martínez-Prado, 2012; PEACC-Durango, 2014).

El artículo está organizado de la siguiente manera. En la sección 2 se describen las consideraciones tomadas como parte de la metodología para el cálculo de las emisiones de los tres principales GEI directos (CO₂, CH₄ y N₂O) así como de los GEI indirectos (NO_x, CO, COVDM y SO₂), para las 5 categorías y sus respectivas sub-categorías. En las secciones 3 y 4 se abordan los resultados que conforman el IEEGEI-Durango, su discusión y su contextualización a nivel nacional e internacional. Por último los puntos

más relevantes y las propuestas de mitigación se resumen en la sección de conclusiones. Para facilitar el seguimiento del artículo se incluye un apartado con acrónimos y la nomenclatura empleada en la estimación de las emisiones.

2 Materiales y métodos

La estimación del IEEGEI-Durango se realizó empleando la metodología recomendada para los inventarios nacionales de los países en vías de desarrollo (Partes no-Anexo I), de acuerdo al manual de las directrices del IPCC (1996) y usando las hojas de cálculo de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático 2005-6 (UNFCCC, por sus siglas en Inglés) versión 1.3.2, 2005; así como los acuerdos tomados por la Conferencia de las Partes (COP), de adoptar las buenas prácticas con la finalidad de mejorar la transparencia, comparabilidad, exhaustividad, exactitud y consistencia de los inventarios de estos países (UNFCCC-COP, 2003).

En el presente inventario se estimaron GEI directos e indirectos; en el caso de los primeros se dio énfasis al CO₂, CH₄ y N₂O, por ser considerados los tres más importantes; mientras que en caso de los indirectos se estimaron las emisiones de los NO_x, CO, COVDM y SO₂.

2.1 Categorías y sub-categorías

Para la elaboración del inventario se consideraron las cinco categorías y sus correspondientes sub-categorías recomendadas en las directrices, resumidas en la Tabla 1, para los años 2005-2008. Las estimaciones finales de los GEI se expresaron en Gigagramos de bióxido de carbono equivalente (Gg de CO₂ eq), para lo cual fue necesario considerar los potenciales de calentamiento global (PCG) para efectuar la conversión de las emisiones de metano y óxido nitroso. Los PCG empleados fueron: CO₂ (1), CH₄ (21) y N₂O (310) (UNFCCC, 2004). Los detalles metodológicos específicos para cada una de las categorías se encuentran disponibles en el informe final del proyecto *Elaboración del Inventario de Gases de Efecto Invernadero y sus Estrategias de Mitigación para el Estado de Durango* (Martínez-Prado, 2012).

2.2 Energía

Las emisiones contabilizadas en la categoría de energía fueron CO₂, CH₄ y N₂O. Específicamente,

para el estado de Durango y de acuerdo a las principales actividades reportadas se consideraron las subcategorías: Industrias de la energía, industrias de manufactura y construcción, transporte y otros sectores (residencial, comercial y de servicios), ver Tabla 1. La subcategoría de emisiones fugitivas, provenientes de las actividades de extracción y manipulación de carbón mineral, no se consideró en el cálculo debido a que el estado no cuenta con reservas naturales de carbón. Así mismo, las emisiones fugitivas provenientes de la extracción, transporte y manejo de gas natural y petróleo, así como el transporte y almacenamiento de CO₂, no fueron contabilizadas debido a que no existen datos desagregados para estas actividades en el estado.

El consumo de combustible se expresó en unidades energéticas de Terajoules/año (TJ/año) empleando los poderes caloríficos netos (Tabla 2) en Megajoules/volumen de combustible consumido. Se emplearon los factores de emisión de carbono reportados en el inventario nacional (INECC, 2009) o en caso contrario los recomendados por defecto en el IPCC (1996), los cuales se expresan en toneladas de carbono por Terajoule (t C/TJ) como se muestran en la Tabla 3. La estimación de las emisiones se calculó de acuerdo a la ecuación 1.

$$EGEI_i = \sum_{j=1}^n [(CC_j)(FE_j)] \quad (1)$$

Donde:

$EGEI_i$ = Emisión de CO₂, CH₄ y N₂O (i)

CC_j = Consumo de los diferentes tipos de combustible (j)

FE_j = Factor de emisión de cada tipo de combustible (j)

Se asumió que el factor de oxidación de carbono (C) es de acuerdo a lo señalado en el volumen 2 del libro de trabajo del IPCC (1996) que establece 0.995 para gas natural y gas LP y 0.99 para los otros combustibles. La incertidumbre para esta categoría se determinó empleando el método de incertidumbre de parámetros, asociada con la cuantificación de parámetros empleados como entradas (datos de actividad y factores de emisión) de los modelos de estimación de emisiones de GEI; para ello se empleó la herramienta de cálculo, GHG Protocol Uncertainty Tool, en Excel versión 2003 (WBCSD, 2011).

Tabla 1. Categorías y Subcategorías del IEEGEI

| A. Energía | B. Procesos Industriales y Solventes |
|--|--|
| A.1 Actividades con Quema de Combustibles A.1.1 Industrias de la Energía A.1.2 Industrias de Manufactura y Construcción A.1.3 Transporte A.1.4 Otros Sectores A.2 Emisiones Fugitivas de Combustibles A.2.1 Combustibles Sólidos A.2.2 Gas Natural y Petróleo A.3 Otras Fuentes A.3.1 Bunkers Internacionales A.3.2 Emisiones de Biomasa | B.1 Procesos Industriales B.1.1 Productos Minerales B.1.2 Industria Química B.1.3 Producción de Metales B.1.4 Producción de Halocarburo y Hexafluoruro de Azufre B.1.5 Consumo de Halocarburo y Hexafluoruro de Azufre B.2 Uso de Solventes y Otros Productos B.2.1 Aplicación de Pinturas B.2.2 Desgrasado y Limpieza en Seco B.2.3 Productos Químicos, Manufactura y Procesamiento |
| C. Agricultura | D. USCUSyS |
| C.1 Fermentación Entérica C.2 Manejo de Estiércol C.3 Cultivo de Arroz C.4 Suelos Agrícolas C.5 Quema Programada de Pastizales C.6 Quema de Residuos Agrícolas | D.1 Cambio de Uso de Suelo y Bosque D.1.1 Cambio en Bosque y Otra Biomasa Maderable D.1.2 Conversión de Bosques y Pastizales D.1.3 Abandono de suelos cultivados D.1.4 Emisión/remoción de CO ₂ del Suelo D.2 Uso de Suelo, Cambio de Uso de Suelo y Forestal D.2.1 Tierra de Bosque D.2.2 Tierra de Cultivo D.2.3 Tierra de Pastizales D.2.4 Tierra de Humedales D.2.5 Tierra de Asentamientos |
| E. Residuos | |
| E.1 Disposición de Residuos Sólidos en el Suelo E.2 Manejo de Aguas Residuales E.3 Incineración de Residuos | |

2.3 Procesos industriales y solventes (PIS)

Es importante destacar que dada las características del estado de Durango y la disponibilidad de información únicamente se estimaron las emisiones de la categoría de procesos industriales (PI), por no contarse con información del uso de solventes en el periodo evaluado (2005-2008).

Para la realización del cálculo de las emisiones GEI de esta categoría solo se tomó en cuenta la producción y transformación minera, ya que no se

tuvo la certeza de que la información de las emisiones de CO₂ reportadas en las cédulas de operación anual (COA), proporcionada por la SEMARNAT, provinieran de los procesos industriales y se corría el riesgo de estar contabilizando doblemente a la categoría de Energía. Los factores de emisión empleados para la caliza y dolomita y para la producción de Fe fueron los usados en el INEGEI 1990-2002 (INECC, 2006), Tabla 4.

Tabla 2. Poderes caloríficos netos de los combustibles

| Combustible | Unidades | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 |
|--------------------|-------------------|--------|--------|--------|--------|
| Gas LP | MJ/bl | 3,765 | 3,765 | 4,177 | 4,251 |
| Gasavión | MJ/bl | 4,872 | 4,872 | 5,025 | 5,542 |
| Turbosina | MJ/bl | 4,872 | 4,872 | 5,025 | 5,542 |
| Gasolina | MJ/bl | 4,872 | 4,872 | 5,025 | 5,542 |
| Gas Natural | kJ/m ³ | 38,116 | 38,041 | 37,482 | 37,296 |
| Combustóleo ligero | MJ/bl | 6,019 | 6,019 | 6,271 | 6,429 |
| Combustóleo pesado | MJ/bl | 6,019 | 6,019 | 6,271 | 6,429 |
| Diesel | MJ/bl | 5,426 | 5,426 | 5,652 | 5,952 |
| Queroseno | MJ/bl | 5,223 | 5,223 | 5,376 | 5,450 |
| Coque de Petróleo | MJ/t | 30,675 | 30,675 | 31,424 | 31,424 |

MJ/bl = Megajoules por barril; MJ/m³ = Megajoules por metro cúbico; MJ/t = Megajoules por tonelada

Fuente: SENER (2010)

Tabla 3. Factores de emisión de carbono

| Combustible | Factor de emisión de carbono (t C/TJ) |
|--------------------|---------------------------------------|
| Gas LP | 16.7 |
| Gasavión | 19.6 |
| Turbosina | 19.5 |
| Gasolina | 18.9 |
| Gas Natural | 15.3 |
| Combustóleo ligero | 20.2 |
| Combustóleo pesado | 19.6 |
| Diésel | 20.2 |
| Queroseno | 19.6 |
| Coque de petróleo | 27.5 |

2.4 Agricultura

Las emisiones de N₂O y CH₄ son los principales gases emitidos en esta categoría y se obtuvieron a partir de la información sobre los cultivos de avena, maíz, sorgo, trigo y frijol. Sin embargo, para estimar las emisiones de óxido nitroso provenientes de los suelos fue necesario incorporar información relativa a los cultivos fijadores y no fijadores de nitrógeno, los fertilizantes nitrogenados y los desechos del ganado.

Ganadería: Para la estimación de emisiones procedentes de la fermentación entérica y manejo de estiércol se emplearon los datos estadísticos reportados por la Secretaría de Agricultura Ganadería y Desarrollo Rural Pesca y Alimentación (SAGARPA) y del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) de los periodos 2005-2008, pues cuenta con mayor consistencia que otras fuentes de información oficial. La información de SAGARPA-

SIAP (2010) fue recolectada por personal del área de conocimiento lo cual asegura una mayor precisión en los datos, resumida en la Tabla 5.

Los factores utilizados para la estimación de las emisiones por el ganado bovino lechero fueron los sugeridos por el IPCC versión revisada (1996) y recomendados para la región de América del Norte; para bovinos productores de carne y especies pequeñas se utilizaron factores de emisión por defecto sugeridos para América Latina, puesto que los sistemas de explotación para estas especies en el ámbito estatal no son tan especializados para usar factores de emisión de países desarrollados.

Agrícola: Se seleccionaron los cultivos de avena, frijol, maíz, sorgo y trigo, los cuales representan el 68.57% de la superficie sembrada, con base en que generan emisiones importantes de GEI. Los datos fueron transformados a Gg y fueron los utilizados para alimentar el software del IPCC y efectuar los cálculos de las emisiones de metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O).

Se realizó un análisis de los factores de emisión utilizados en el INEGEI para el periodo 1990-2002 (Ordóñez y Hernández, 2005), Manual de las Buenas Prácticas (IPCC, 2001) y las Directrices del IPCC versión revisada (1996), para emplearse como valores por defecto. Se consideraron en primera instancia los valores del INEGEI y en caso de no tener registro para alguno de los cultivos se tomaron los valores del IPCC. Por otra parte, para el caso particular del maíz, se estimó la fracción de materia seca a partir de las publicaciones del

Tabla 4. Factores de emisión utilizados en la subcategoría minera para el dióxido de carbono: Categoría PIS

| Subcategoría química | Mineral | Factor de emisión para el CO ₂ |
|----------------------|----------|---|
| No metálicos* | Caliza | 440* |
| | Dolomita | 477* |
| Metálicos | Fierro | 1.0** |

*Kg de CO₂/toneladas de producción, Directrices IPCC (1996)**Ton de CO₂/toneladas de Fe producido (INEGEI, 1990-2020)

Tabla 5. Número de cabezas de animales en el estado de Durango (2005-2008)

| Cabezas | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 ^a |
|------------------|------------|------------|------------|-------------------|
| Bovinos lecheros | 273,564 | 275,571 | 278,070 | 249,687 |
| Bovinos carne | 1,116,990 | 1,182,378 | 1,132,610 | 1,158,436 |
| Ovino | 79,352 | 80,574 | 81,059 | 82,849 |
| Caprino | 332,136 | 336,809 | 328,168 | 333,140 |
| Caballos | 79,993 | 76,451 | 75,388 | 70,962 |
| Mulas y asnos | 74,863 | 74,170 | 73,573 | 69,012 |
| Porcino | 183,014 | 180,571 | 186,571 | 172,619 |
| Aves | 28,685,571 | 29,757,818 | 31,083,035 | 32,954,697 |

^a Población estimada a Diciembre del 2010

Fuente: SAGARPA-SIAP (2010)

National Research Council; se utilizó la fracción 0.89 como valor promedio de materia seca calculada a partir de datos publicados en los requerimientos para aves (NRC, 1994), porcinos (NRC, 1998), bovinos productores de carne (NRC, 2000) y bovinos lecheros (NRC, 2001), por considerar que esta dependencia propone el promedio de valores de cientos de análisis de laboratorio y que éstos coinciden con los obtenidos en los análisis realizados en México.

Por otra parte, se tomó el factor por defecto 0.0125 para las emisiones directas de suelo excluidos los histosoles de la proporción kg de N₂O por kg de aporte de N (IPCC, 1996). En la sección donde se contabiliza el N₂O emitido de los residuos agrícolas, se tomó el valor por defecto publicado en el INEGI (INECC, 2006b) y en la guía de las buenas prácticas para la fracción de los residuos de las cosechas quemadas. Se consideraron los valores para países en desarrollo, los cuales de acuerdo al IPCC deben utilizar el valor de 0.25, que restado a la unidad, queda como 0.75 kg de N de N₂O/kg de N (IPCC, 2001).

2.5 USCUSyS

La estimación de la categoría de *Uso de Suelo, Cambio de Uso de Suelo y Silvicultura (USCUSyS)*

correspondió a las emisiones de las siguientes subcategorías: i) Cambio de la biomasa en bosques y en otros tipos de vegetación; ii) Emisiones de CO₂ procedentes de la conversión de bosques y praderas; iii) Quema in situ de bosques: emisiones de gases distintos del CO₂; iv) Abandono de tierras cultivadas; y v) Emisiones o absorción de CO₂ de suelos debido al manejo y cambio de uso de la tierra.

En términos generales, el cálculo para la estimación de la emisión (*EsEm*) viene dada por la ecuación 2:

$$EsEm = (DA)(FE) \quad (2)$$

Donde *DA*= dato de actividad correspondiente a las superficies que ocupan los ecosistemas de bosque de coníferas, bosques secos y pastizales, o la cantidad de biomasa extraída de los bosques para su comercialización o aprovechamiento como leña o producción de carbón; también incluye las existencias de vegetación arbórea urbana. Además *FE*= factor de emisión, que se divide en tasa de acumulación de biomasa o crecimiento y acumulación de carbono para cada especie o grupo de especies (Martínez-Prado, 2012).

Las ecuaciones empleadas en la estimación de la emisión/captura de carbono y bióxido de carbono de

las subcategorías (i) y (ii) se resumen en la Tabla 6; por su parte la estimación de emisiones de gases traza (iii), distintos al CO₂, derivados de la quema *in situ*, se efectuó con las ecuaciones resumidas en la Tabla 7. Para la subcategoría (iv) se hizo la homologación de la vegetación empleando la metodología propuesta en el inventario nacional (INECC, 2006b) con la lista propuesta por el INEGI (2003) en la cartografía para las Series I, II y IV para el estado de Durango; para la manipulación de los datos de actividad, se realizó el cálculo de superficies de la vegetación existente en el territorio estatal por medio de procedimientos digitales y con la ayuda del programa ArcMap10. Para realizar los cálculos de absorción de CO₂ en las áreas abandonadas se emplearon los métodos recomendados en el Manual de las Buenas Prácticas (GPG-LULUCF, 2003). Por último para la subcategoría (v), primero se hizo la homologación de la información edafológica mediante un análisis de correspondencia entre la nomenclatura de la Organización de Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en Inglés) y la Base Referencia Mundial del Recurso Suelo (WRBSR, por sus siglas en Inglés) tomada del INEGI-2006. Esta homologación permitió establecer tres grupos de suelos presentes en el estado de Durango de acuerdo con los criterios del IPCC. La cobertura edafológica usada correspondió a la serie II de suelos del INEGI del año 2007. A

partir de la información edafológica digital disponible en el INEGI (cobertura edafológica serie II escala 1:250,000) se generó una base de datos con tres grandes grupos de suelos minerales para el estado de Durango, de acuerdo a las directrices del IPCC e INEGI, los cuales se resumen en la Tabla 8.

Para estimar la incertidumbre asociada al cálculo de los flujos de carbono se utilizó el método de propagación de errores propuesto por el IPCC (2003).

2.6 Residuos

La estimación de emisiones de esta categoría incluye las subcategorías de disposición de residuos sólidos urbanos y tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales.

Residuos Sólidos (RS): El inventario de emisiones de esta subcategoría se calculó utilizando la información contenida en las bitácoras de registros de entrada a los rellenos sanitarios (categoría "A"), proporcionada por los operadores de los mismos y por las estimaciones con base en la población y generación per cápita diaria, empleando la herramienta de cálculo del IPCC. Además de estos datos de actividad, se utilizaron parámetros y factores de emisión de estudios realizados con residuos sólidos urbanos (Valencia, 2008).

Tabla 6. Estimación de emisiones de las subcategorías (i) y (ii) de Uso de Suelo Cambio de Uso de Suelo y S ilvicultura

| (i) Cambio de la biomasa en bosques y en otros tipos de vegetación | |
|---|--|
| $\Delta C = \sum_{i=1} (A_i)(G_i)(CF)$ (3) | A_i = superficie forestal por tipo de bosque en kilohectáreas (Kha); G_i = tasa de incremento medio anual de crecimiento de la biomasa aérea, en kilotoneladas de materia seca por año (Kt ms /año) por tipo de bosque; CF = fracción de C de ms |
| $\nabla C = L_{comercial} + L_{leña}$ (4) | $L_{comercial}$ = pérdida anual de carbono generada por las talas comerciales (Kt C/ año); $L_{leña}$ = pérdida anual de carbono generada por el consumo doméstico de leña (Kt C/año) |
| $L_{industrial} = (H)(D)(BEF_2)(FC)$ (5) | $L_{industrial}$ = pérdida anual de carbono debida a la tala para madera industrial (Kt ms/ año); H = volumen de madera industrial extraída al año en rollo (m ³ /año); D = densidad básica de la madera en toneladas de materia seca por metro cúbico (t ms/m ³); BEF_2 es el factor de expansión de biomasa para convertir volumen de madera a biomasa aérea total (incluye corteza), sin unidades; FC = fracción de carbono de la materia seca (por defecto = 0.5), Mg C (t ms) |
| $C_{L_{2008}} = (PTE)(4.7)$ (6) | $C_{L_{2008}}$ = consumo de leña en kg de madera/ persona, se calculó a partir de la proyección de la población para 2008. Donde, 4.7 es el valor promedio anual (± 2.1) y un máximo de 3.5 kg por día para la temporada de invierno en la Sierra (Camou, 2007) |
| (ii) Emisiones de CO ₂ procedentes de la conversión de bosque y praderas | |
| $B_{dk} = \frac{\sum_{ij} (A_{ij})(B_{ij})}{\sum_{ij} A_{ij}}$ (7) | B_{dk} = biomasa después del cambio de la clase original k (promedio ponderado de todas las clases a las cuales se ha cambiado la clase original); A_i = superficie (en ha) de la clase k que cambió al uso de suelo tipo i en la eco-región j ; B_i = biomasa de la clase de uso de suelo i en eco-región j al cual fue cambiado la superficie A_{ij} de la clase de uso de suelo k . Para calcular el carbono liberado por la quema, <i>in situ</i> y fuera del bosque, se consideraron los valores por defecto propuestos en el libro de trabajo (IPCC-D, 1996) |

Tabla 7. Emisiones de gases traza (Gg) derivados de la quema *in situ*, distintos al CO₂

| Estimación | Ec. # |
|---|-------|
| $Emisiones CH_4 = (C_{liberado})(Relación\ de\ emisión)(16/12)$ | (8) |
| $Emisiones CO = (C_{liberado})(Relación\ de\ emisión)(28/12)$ | (9) |
| $Emisiones N_2O = (C_{liberado})(Relación\ (C/N)(Relación\ de\ emisión)(44/28)$ | (10) |
| $Emisiones NO_x = (C_{liberado})(Relación\ (C/N)(Relación\ de\ emisión)(46/14)$ | (11) |

$C_{liberado}$ = cantidad de C proveniente de la quema de biomasa (Kt).
Relación de emisión = masa de carbono liberado en la combustión como CH₄ o CO (en unidades de C) con respecto a la masa total del carbono liberado en la combustión (en unidades de C).
Relación de N/C = relación de nitrógeno liberado como N₂O y NO_x con respecto al nitrógeno contenido en el combustible (en unidades de N). Las relaciones de los pesos moleculares son con respecto al peso del nitrógeno y del carbono en la molécula.

Tabla 8. Grupos de suelos minerales para el estado de Durango

| Grupo | Descripción |
|-------|---|
| 1 | Suelos con arcillas de alta actividad (HAC): Calcisol (CL), Chernozem (CH), Gipsisol (GY), Kastañozem (KS), Luvisol (LV), Phaeozem (PH), Regosol (RG), Solonchak (SC), Umbrisol (UM), Vertisol (VR) |
| 2 | Suelos con arcillas de baja actividad (LAC): Acrisol (AC), Cambisol (CM), Durisol (DU), Fluvisol (FL), Leptosol (LP) |
| 3 | Suelos arenosos: Arenosol (AR) |

La estimación de datos de generación de residuos sólidos para los municipios con poblaciones mayores a 10,000 habitantes se realizó calculando las poblaciones anuales para el periodo 2005-2008, utilizando datos del Censo Nacional 2000 y del conteo 2005 reportado por el INEGI; de aquí se derivó una tasa de incremento del 1.1% anual (o decremento -0.09% para la zonas rurales) poblacional. Posteriormente se multiplicó por las tasas de generación per cápita de RS urbanos siendo 0.718 y 0.473 kg/habitante-día para zonas urbanas y rurales, respectivamente, determinadas en estudios de campo (Vicencio de la Rosa y col., 2006; Villanueva-Fierro y col., 2009). El inventario para el año 2008 incluye la captura y quema del biógas (1.46 Gg de metano) en dos plantas combustión de biógas ubicadas en el municipio de Durango.

Aguas Residuales (AR): En el caso de esta subcategoría existen tres factores que influyen en la generación de metano: 1) Contenido de materia orgánica presente, la cual se determinó con información proporcionada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), donde se señala el contenido promedio de de demanda bioquímica de oxígeno

(DBO). 2) Referido al manejo de la planta, se consideró que el mantenimiento en todos los sistemas de tratamiento fue casi nulo, puesto que no hubo recuperación de lodos a excepción de los sistemas ubicados en los municipios de Lerdo y Gómez Palacio; por lo que deben existir problemas de anaerobiosis en todos ellos, aunque para las lagunas aireadas el factor de emisión es menor. 3) Temperatura media local, se hizo uso de los anuarios de INEGI donde se establece que para ocho meses del año la temperatura está arriba de los 15°C, a excepción de los sistemas ubicados en El Salto, Durango que mantiene esta temperatura solo durante tres meses en el año.

Para esta subcategoría, se determinó que la cantidad de metano generado por los sistemas de tratamiento de aguas municipales es debida a la falta de mantenimiento de los mismos, considerando por ello que el 25% de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) entrante es transformada a metano (Arvizu, 2011). La DBO se obtuvo con 75 mediciones realizadas por la CONAGUA a influentes municipales en el periodo del 2004 al 2008, dando un promedio de 220 mg/L. Para la sección industrial existen pocos datos (ocho valores para el mismo periodo) y muestran

una DBO similar de 212 mg/L.

3 Resultados

3.1 Comportamiento de las emisiones de los gases de efecto invernadero

A continuación se describen los resultados obtenidos en la estimación de las emisiones de los GEI que conformaron el inventario estatal, para cada una de las categorías y sub-categorías para el año base (2005) así como su tendencia para el periodo 2005-2008.

3.1.1 Categorías con mayor emisión

Energía: En la Tabla 9 y la Fig. 1 se muestran las emisiones anuales de los GEI por subcategoría, se observó una tasa de crecimiento anual (TCA) promedió de 12.89% durante el periodo 2005-2008. Además, puede visualizarse que la industria de la energía fue la que contribuyó con la mayor cantidad de emisiones, seguida por la de transporte. Para el año 2005, las emisiones de la categoría Energía (9,203.23 Gg de CO₂ eq) en el estado representaron un 2.20% de las emisiones nacionales (418,971 Gg de CO₂ eq).

En la Tabla 10 se hace una comparación de los valores de las emisiones GEI, los cuales fueron obtenidos con el método sectorial y el de referencia. El método de referencia estima únicamente emisiones de CO₂ a partir del consumo aparente de energía, mientras que el método sectorial emplea datos de actividad. Esta comparación sirve como verificación, para demostrar la certidumbre del cálculo. Se considera que para los países Anexo 1 la variación entre métodos no debe ser mayor del 5% tal y como se establece en la Guía de las Buenas Prácticas (IPCC, 1996). Se puede observar que en el inventario las estimaciones son buenas porque la diferencia

entre ambos métodos fue menor al 2.8%. El análisis acumulativo de incertidumbre de emisiones de GEI para esta categoría fue de $\pm 2.9\%$.

Agricultura: Dividida en las subcategorías Agrícola y Ganadera, los resultados obtenidos se presentan por separado a continuación.

Ganadera: La población bovina promedio para el periodo 2005-2008 fue de 1,416,827 cabezas de ganado, con una fluctuación del 1.95% (Tabla 5). Dentro de la población de rumiantes en el estado, se observó que existe también un número importante de caprinos con un promedio de 332,563 cabezas por lo cual fue importante calcular su contribución a las emisiones de GEI dentro de esta categoría.

Las emisiones promedio de metano fueron fluctuantes debido al cambio de las diferentes poblaciones de ganado en el estado. Se observó una mayor cantidad de CH₄ excretado en el año 2006 lo que indica una mayor actividad en el sector ganadero; esto obedece a que el estado de Durango reanudó la exportación de ganado bovino productor de carne, que estaba suspendida en años anteriores, lo que estimuló el crecimiento de los hatos ganaderos. Del total de las emisiones de CH₄ de la subcategoría de ganadería, el 81.7% fue contribución de la fermentación entérica y el 18.3% a las emisiones por manejo del estiércol. El 93.28% de las emisiones de CH₄ correspondieron a la población de bovinos, mientras que el 6.72% fue emitido por las otras especies seleccionadas para el cálculo de GEI. Las emisiones anuales de metano estimadas de la actividad ganadera en CO₂ eq, para el periodo 2005-2008, se resumen en la Tabla 11.

En lo que respecta a las emisiones de N₂O para la subcategoría de ganadería se apreció que en su mayoría provienen de los sistemas de gestión del estiércol por el concepto de almacenamiento seco o composteo del mismo (información proporcionada

Tabla 9. Resumen estatal de emisiones GEI para la categoría de Energía (Gg de CO₂ eq)

| Subcategoría | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 |
|---------------------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|
| Industria de la energía | 3,864.87 | 4,568.73 | 4,754.35 | 4,509.74 |
| Manufactura y construcción | 1,555.70 | 2,578.33 | 2,476.59 | 3,526.57 |
| Transporte | 3,595.92 | 4,013.84 | 4,444.24 | 4,884.81 |
| Residencial, Comercial y de Servicios | 186.74 | 194.82 | 218.64 | 228.27 |
| TOTAL | 9,203.23 | 11,355.72 | 11,893.82 | 13,149.39 |

Tabla 10. Comparación de las emisiones estimadas por los métodos de Referencia y Sectorial, expresadas en Gg de CO₂ eq: Categoría Energía

| Año | Método de Referencia | Método Sectorial | Diferencia | Diferencia (%) |
|------|----------------------|------------------|------------|----------------|
| 2005 | 9,002.42 | 9,203.23 | 200.81 | 2.18 |
| 2006 | 11,043.21 | 11,355.72 | 312.51 | 2.75 |
| 2007 | 11,583.75 | 11,893.82 | 310.07 | 2.61 |
| 2008 | 12,841.01 | 13,149.39 | 308.38 | 2.35 |

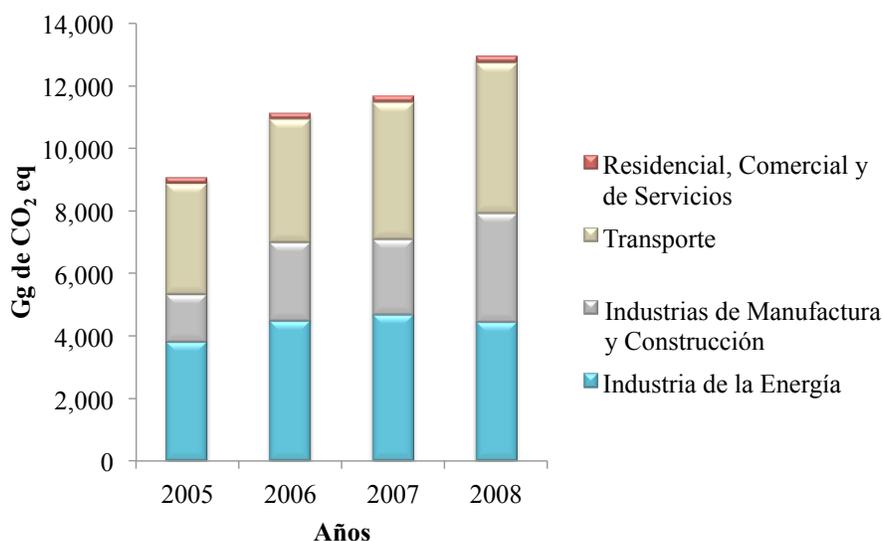


Fig. 1. Emisiones GEI del estado de Durango: Categoría Energía.

por expertos del grupo LALA). Durante el periodo evaluado se emitieron 0.065 Gg de CO₂ eq, indicando que esta subcategoría no tiene una contribución importante en el estado.

Agrícola: Las emisiones anuales promedio de metano (2005-2008) correspondieron a 0.171 Gg de CO₂ eq representando únicamente el 0.09% de la emisiones, originadas particularmente por la descomposición anaeróbica de los residuos agrícolas de los cultivos seleccionados (avena, frijol, maíz, sorgo y trigo). Por su parte las emisiones promedio de N₂O en el mismo periodo fueron de 186.14 Gg de CO₂ eq (99.91%), cuya causa principal fue la lixiviación de los suelos agrícolas. Las emisiones directas de N₂O generadas por la incorporación de nitrógeno al suelo agrícola por los fertilizantes sintéticos, desechos animales (estiércol), cultivos fijadores de N y descomposición de residuos de cosechas representan únicamente el 8.39%, mientras que el 91.61% restante del sub-módulo suelos agrícolas proviene de las

emisiones indirectas generadas por el pastoreo de los animales, de la deposición de gases de la atmósfera (NH₃ y NO_x) y de la lixiviación del N (Tabla 12).

En la Tabla 13 se resumen las emisiones totales anuales de metano y óxido nítrico de esta categoría para el periodo 2005-2008 y su comportamiento se observa en la Fig. 2. Se aprecia que las emisiones de ambos GEI fueron relativamente constantes, con una tendencia a la baja en la emisión de CH₄, lo cual pudo deberse a la disminución en el inventario estatal de bovinos, principalmente bovinos lecheros. Del total de las emisiones de la categoría Agricultura, el 92.58% correspondió a la subcategoría de Ganadería mientras que el 7.42% a la subcategoría Agrícola.

Tal como se expone en la orientación del IPCC sobre las buenas prácticas y la gestión de incertidumbre en los inventarios de GEI, las incertidumbres en las estimaciones de las emisiones directas de N₂O procedentes de los suelos agrícolas se deben a las incertidumbres relacionadas con los

factores de emisión, al alcance insuficiente de las mediciones y a la falta de información sobre prácticas específicas de los distintos establecimientos agrícolas. Para las emisiones indirectas la incertidumbre proviene principalmente de los factores de emisión

y de las fracciones de lixiviación y volatilización, los cuales fueron tomados por defecto. La incertidumbre sugerida para esta categoría es del 20%, similar a la del INEGI 1990-2002, por el uso de valores por defecto.

Tabla 11. Emisiones de CH₄ de la fermentación entérica y manejo de estiércol (Gg de CO₂ eq) para el periodo 2005-2008 en el estado de Durango: Subcategoría Ganadera

| Tipo de ganado | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 |
|----------------|------------|------------|------------|------------|
| Bovino lechero | 988.1130 | 995.3622 | 1,004.3880 | 901.8702 |
| Bovinos carne | 1,149.3825 | 1,216.6665 | 1,165.4559 | 1,192.0314 |
| Ovinos | 8.5995 | 8.7318 | 8.7843 | 8.9775 |
| Caprinos | 36.0591 | 36.5673 | 35.6286 | 36.2208 |
| Caballos | 24.5301 | 31.5315 | 23.1777 | 21.2814 |
| Mulas y asnos | 17.1360 | 16.9785 | 16.8399 | 15.7227 |
| Porcinos | 57.6492 | 56.8806 | 58.7706 | 54.3753 |
| Aves | 10.8423 | 11.2476 | 11.7495 | 12.4572 |
| Total | 2,292.3117 | 2,373.966 | 2,324.7945 | 2,242.9365 |

Tabla 12. Emisiones directas e indirectas de N₂O (Gg de CO₂ eq) para el estado de Durango: Subcategoría Agrícola

| Tipo | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 |
|------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Directas | 0.034 (8.41%) | 0.076 (8.35%) | 0.048 (8.41%) | 0.055 (8.38%) |
| Indirectas | 183.704 (91.59%) | 183.180 (91.65%) | 184.952 (91.59%) | 192.416 (91.62%) |
| Total | 183.738 | 183.256 | 185.000 | 192.471 |

Tabla 13. Emisiones anuales totales de CH₄ y N₂O en el estado de Durango (Gg de CO₂ eq): Categoría Agricultura

| Emisión | Detalle | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 |
|------------------|-----------------------|----------|----------|----------|----------|
| CH ₄ | Ganado | 2,449.43 | 2,527.69 | 2,478.67 | 2,406.97 |
| | Cultivos ¹ | 0.23 | 0.17 | 0.21 | 0.12 |
| | Subtotal | 2,449.66 | 2,527.86 | 2,478.88 | 2,407.09 |
| N ₂ O | Ganado | 0.07 | 0.08 | 0.07 | 0.06 |
| | Cultivos | 189.08 | 201.15 | 212.70 | 192.93 |
| | Subtotal | 189.15 | 201.22 | 212.77 | 192.99 |
| TOTAL | | 2,638.81 | 2,729.08 | 2,691.65 | 2,600.08 |

¹ Metano derivado de la quema de residuos agrícolas

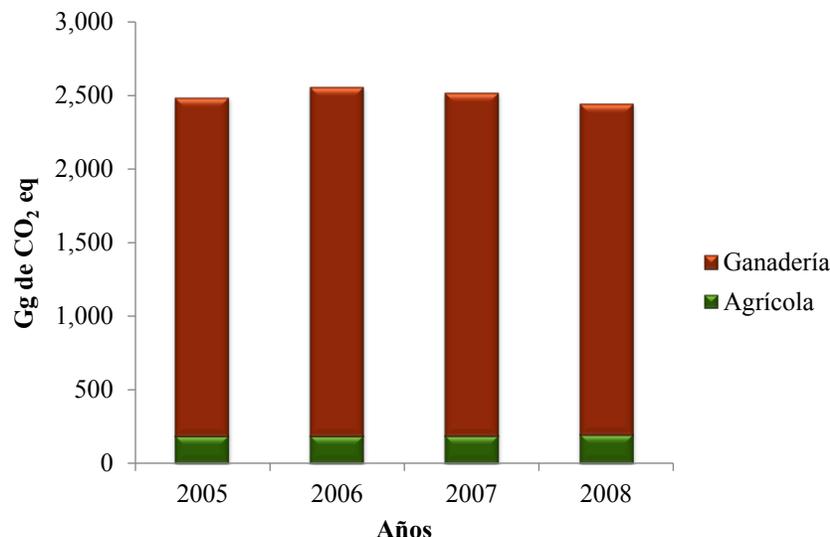


Fig. 2. Emisiones GEI totales del estado de Durango: Categoría Agricultura.

3.1.2 Categorías con menor emisión

Procesos Industriales y Solventes: Dentro de la producción de minerales metálicos en el estado, el hierro (Fe) es uno de los más importantes; en el 2005 tuvo un 51.69% de participación en la producción total estatal, procedente principalmente del municipio Victoria de Durango. En lo que respecta a la producción de minerales no metálicos, la caliza representó un 11.56% del total de producción de minerales no metálicos para el mismo año, y para la dolomita no se tiene registro de producción, siendo la principal zona de extracción el municipio de Cuencamé. En la Tabla 14 se muestra la producción anual para la subcategoría de minería, en el período 2005-2008. Con base en estos datos la producción de caliza disminuyó en el período comprendido y en relación al Fe también mostró una disminución al final del período. En la Tabla 15 y Fig. 3 se

muestra el total de emisiones de CO₂ en Gg para el período 2005-2008, donde se observa una disminución en la subcategoría de minería, debido a la baja de producción. En la Tabla 16 se resumen las emisiones para los gases directos, derivados de la producción de Fe.

El total de emisión de CO₂ en esta categoría fue de 914.72 Gg para el año 2005, el 11% perteneciente a la industria minera no metálica y el 89% a la producción de hierro. En comparación con el INEGEI 2006 (SEMARNAT-INECC, 2009) la contribución de Durango en esta categoría fue del 1.8%. Se emplearon los factores de emisión recomendados en el inventario nacional del 2002 y se obtuvo una tendencia a la baja en el período 2005-2008, lo cual representa una baja incertidumbre con respecto a las cifras reportadas a nivel nacional.

Tabla 14. Producción anual de la subcategoría minera. Categoría: Procesos Industriales

| Subcategoría Minería | Mineral | Producción en Toneladas | | | |
|----------------------|----------|-------------------------|---------|---------|---------|
| | | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 |
| No Metálicos | Caliza | 225,265 | 127,000 | 101,600 | 50,800 |
| | Dolomita | 0 | 384 | 326 | 379 |
| Metálicos | Fierro | 509,752 | 526,072 | 538,934 | 473,126 |

Anuario Estadístico de la Minería Mexicana, ampliada 2008

Tabla 15. Emisión anual de CO₂ en Gg. Categoría: Procesos Industriales

| Subcategorías | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Minerales no Metálicos | 99.12 | 56.06 | 44.86 | 22.53 |
| Producción de Fe | 815.60 | 841.72 | 862.29 | 757.00 |
| Total | 914.72 | 897.78 | 907.15 | 779.53 |

*Valores determinados según la metodología del IPCC (1996)

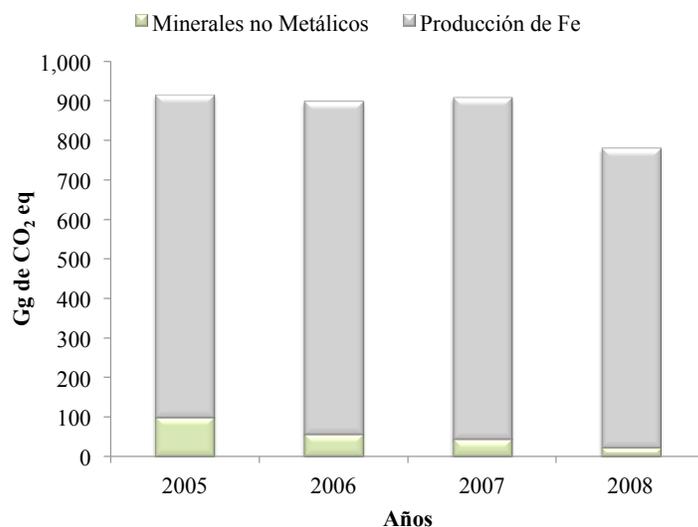


Fig. 3. Emisiones GEI totales del estado de Durango: Categoría Procesos Industriales.

Tabla 16. Emisiones anuales (Gg) de GEI indirectos. Categoría: Procesos Industriales

| Emisiones | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|
| NO _x | 0.0387 | 0.0400 | 0.0410 | 0.0360 |
| COVDM | 0.0102 | 0.0105 | 0.0108 | 0.0095 |
| CO | 0.0571 | 0.0589 | 0.0604 | 0.0530 |
| SO ₂ | 0.0153 | 0.0158 | 0.0162 | 0.0142 |

Residuos: Esta categoría está constituida por las subcategorías de residuos sólidos (rellenos sanitarios controlados y tiraderos a cielo abierto) y aguas residuales (domésticas e industriales) y las estimaciones obtenidas se presentan a continuación.

Residuos Sólidos: El incremento de la generación de residuos sólidos (3.25%) fue similar al aumento poblacional del estado de Durango (3.01%) en el periodo comprendido de 2005-2008, teniendo un promedio de generación diaria per-cápita de 0.718 kg

en el medio urbano y 0.473 kg para el medio rural.

La generación per cápita de residuos sólidos urbanos para el estado de Durango fue de 0.24 toneladas, menor al 50% de la media nacional de 0.65 toneladas; sin embargo, para efectos de cálculo se emplearon los valores por defecto sugeridos por el IPCC. La Tabla 17 muestra el resumen de las emisiones de GEI en el estado provenientes de la subcategoría de residuos sólidos por fuente de emisión, en donde la TCA promedio fue de 1.07%.

Tabla 17. Emisiones GEI de la sub-categoría de disposición de residuos sólidos urbanos (RSU) para el estado de Durango

| Fuente de emisión de GEI en Gg | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 |
|---|---------|---------|---------|---------|
| CH ₄ producido por RSU en Rellenos Sanitarios controlados | 18.337 | 19.196 | 19.228 | 19.070 |
| CH ₄ producido por RSU en Rellenos Sanitarios no controlados | 1.295 | 1.355 | 1.357 | 1.346 |
| Emisiones totales en Gg de CO ₂ eq | 412.260 | 431.560 | 432.300 | 428.720 |

Nota: Las emisiones de CO₂ eq se calcularon empleando el PCG del metano (21)

Tabla 18. Emisiones de CH₄, N₂O y CO₂ eq en el tratamiento de Aguas Residuales Domésticas (ARD) para el estado de Durango

| Año | ARD tratadas en el estado | | Gg de CH ₄ | Gg de N ₂ O | Gg de CO ₂ eq |
|------|---------------------------|---------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------|
| | (L/s) | m ³ /año | | | |
| 2005 | 2,439 | 76,916,304 | 3.9294 | 0.1465 | 127.939 |
| 2006 | 2,553 | 80,511,408 | 4.2605 | 0.1542 | 137.268 |
| 2007 | 2,577 | 81,268,272 | 4.2359 | 0.1538 | 136.625 |
| 2008 | 2,671 | 84,232,656 | 4.3341 | 0.1547 | 138.977 |

Nota: Las emisiones de CO₂ eq se calcularon empleando los PCG del CH₄ (21) y N₂O (310)

Tabla 19. Emisiones de CH₄ y CO₂ eq por el tratamiento de Aguas Residuales Industriales (ARI) para el estado de Durango

| Año | ARI tratadas en el estado | | Gg de CH ₄ | Gg de CO ₂ eq |
|------|---------------------------|---------------------|-----------------------|--------------------------|
| | L/s | m ³ /año | | |
| 2005 | 235 | 7,410,960 | 8.4324 | 177.081 |
| 2006 | 63 | 1,986,768 | 2.3416 | 49.174 |
| 2007 | 155 | 4,888,080 | 5.6577 | 118.812 |
| 2008 | 243 | 7,663,248 | 8.7822 | 184.429 |

Nota: Las emisiones de CO₂ eq se calcularon empleando los PCG del metano (21)

Aguas Residuales: Durango es el estado con más lagunas de estabilización en México, sin embargo cabe señalar que dichas lagunas no reciben mantenimiento, ni separan los lodos producidos como resultado del tratamiento de las aguas residuales domésticas. La gran mayoría consta de dos secciones, una como reservorio de sedimentos y otra de pulimento, el 75% de estas aguas descargan sus efluentes a los cuerpos de agua, en lugar de ser aprovechados para

riego, provocando eutrofización y en algunos casos zonas sépticas que pueden convertirse en emisores de metano, ver Tabla 18. Similarmente en la Tabla 19 se presenta el cálculo de emisiones de metano provenientes de las PTAR de industrias. En la Fig. 4 se presentan las emisiones totales de la subcategoría de aguas residuales expresadas en Gg de CO₂ eq, se hace notar que están por separado las emisiones de CH₄ y N₂O para apreciar su contribución. En

general se observó que esta subcategoría tuvo una TCA promedio del 8.8%, destacando que en el 2006

hubo un decremento muy pronunciado.

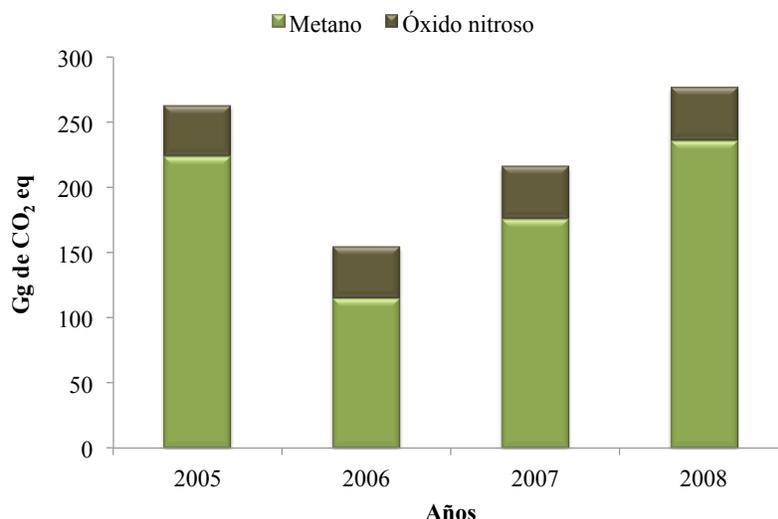


Fig. 4. Emissiones GEI totales del estado de Durango: Aguas Residuales Domésticas e Industriales.

Tabla 20. Emisiones anuales totales (Gg de CO₂ eq) en el estado de Durango: Categoría Residuos

| Subcategoría de emisión | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 |
|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|
| CO ₂ eq de RSU | 412.26 | 431.56 | 432.30 | 428.72 |
| CO ₂ eq de AR | 305.01 | 186.43 | 255.44 | 323.40 |
| Total de CO ₂ eq | 717.27 | 618.00 | 687.74 | 752.12 |

Tabla 21. Comparativo de emisiones de GEI estatal y nacional para el año 2005 (Gg)

| Emisiones de GEI | IEEGEI-DGO 2005 | INEGEI 1990-2006* | Contribución % |
|--|-----------------|-------------------|----------------|
| CH ₄ por disposición de residuos | 18.337 | 2346.09 | 0.78 |
| N ₂ O por tratamiento de aguas residuales | 0.147 | 6.49 | 2.26 |
| CH ₄ por tratamiento de aguas residuales domésticas | 3.929 | 557.2 | 0.71 |
| CH ₄ por tratamiento de aguas residuales industriales | 8.432 | 1492.2 | 0.57 |

*Arvizu (2008)

Tabla 22. Incertidumbre estimada (%) con la información utilizada para el cálculo de emisiones GEI del estado de Durango: Categoría Residuos

| Fuente de emisión | 2007 | 2008 |
|-------------------------------|-------|-------|
| Residuos sólidos urbanos | 15.60 | 12.49 |
| Aguas residuales domésticas | 10.05 | 9.89 |
| Aguas residuales industriales | 39.89 | 37.89 |

La estimación de las emisiones totales, expresada en CO₂ eq, para esta categoría (2005-2008) se muestra en la Tabla 20, con un TCA promedio de 2.32%. Se estimó que para el año base (2005) la contribución de las fuentes emisoras fue de un 42.52% para AR y un 57.48% para RS. En la Tabla 21 se presenta un comparativo de las EEGEI con el INEGEI 2005 y la contribución porcentual que el estado de Durango aporta al país. Para estimar la incertidumbre asociada a las emisiones solo se consideró la incertidumbre debida a la información de los datos de actividad y la debida a los factores de emisión (Arvizu, 2008), Tabla 22.

3.1.3 Categoría USCUSyS

Los resultados obtenidos son tomando como base 982,900.58 hectáreas (ha) sujetas a manejo forestal en Durango, que representan el 15.8% de la superficie nacional reportada para 2006; en la cual destaca la superficie de bosques de clima templado, para los Grupos 1 y 2, con el 89.5% del estatal y el 18.12% del nacional (INEGEI-2006). El análisis de resultados indica que de las 10.8 millones de ha de superficies vegetales de los cinco grupos analizados, para el estado de Durango en el periodo del 2005-2008, destacan las Coníferas (Grupo 1) y Latifoliadas (Grupo 2) por tener el 88% del incremento total de biomasa con respecto al nacional para este mismo tipo de ecosistemas, con una captura neta del 4.71% de los 86,877 Gg de CO₂ eq que se emitieron para el mismo periodo a nivel nacional, destacando con esto el relativo a cambios en la biomasa.

El comportamiento de la categoría USCUSyS en materia de captura y emisión de CO₂ eq se resume en cinco características descritas en la Tabla 23; con una emisión total de 4,279.18 y una captura total de -4,007.01, obteniéndose un balance de 272.17 (Fig. 5). Dada las condiciones especiales de información de la categoría se evaluó todo el periodo, aunque el cálculo se reporta para el año 2008.

Los mapas de uso de suelo y vegetación utilizados

(series III y IV de INEGI) presentaron diferencias, ocasionando cierta incertidumbre en los cálculos de emisión de CO₂. En consecuencia, las estimaciones presentaron una incertidumbre más alta y difícil de cuantificar dentro del inventario estatal debido al rezago y poca confiabilidad de la información forestal, particularmente sobre las tasas de deforestación y densidades de biomasa y carbono en suelos. Cabe destacar que de acuerdo al IPCC, la información sobre incertidumbre está orientada a ayudar a priorizar los esfuerzos que permitan mejorar la exactitud de los inventarios en el futuro y a la toma las decisiones sobre la elección de la metodología; y no a cuestionar la validez de las estimaciones de inventarios.

3.2 Emisiones totales de GEI del estado de Durango

El IEEGEI-Durango fue evaluado con estricto apego a las directrices del IPCC (1996) y únicamente la categoría de USCUSyS fue evaluada con base en el Manual de Buenas Prácticas del IPCC (2003). Se consideraron las cinco categorías sugeridas y para cada una de ellas se indican los datos de actividad, metodología, incertidumbre y la estimación anualizada de las emisiones para el periodo evaluado, con la excepción de la categoría USCUSyS para la cual se estimó la emisión/captura en todo el periodo. Los resultados obtenidos son la suma de las emisiones de los tres GEI más importantes: CO₂, CH₄ y N₂O, y se expresan en Gg de CO₂ eq. El análisis de las cifras obtenidas indicó que las categorías de Energía y Agricultura fueron las de mayor contribución en emisiones al inventario estatal.

En la Tabla 24 se resumen las emisiones de GEI, con excepción de la categoría de USCUSyS, y se aprecia que la tendencia fue creciente durante el periodo evaluado; para el año 2008 se estimaron 17,281.12 Gg de CO₂ eq, lo que representa un aumento del 28.25%, correspondiente a una TCA promedio del 8.77%; y su comportamiento se observa

en la Fig. 6. En lo que respecta a la categoría USCUSyS se obtuvo un balance de emisión-captura de 272.17 Gg de CO₂ eq; obteniéndose una emisión total promedio de 15,906.20 Gg de CO₂ eq para el periodo 2005-2008. En relación a la estimación para el año base (2005) las cifras obtenidas fueron: Energía (9,203.23), Procesos Industriales (914.72), Agricultura (2,638.81) y Residuos (717.27), en Gg de CO₂ eq (Fig. 7).

Haciendo un comparativo de las cifras obtenidas con el INEGEI-2006, las emisiones totales estatales

fueron 15,600.58 Gg de CO₂ eq vs las emisiones nacionales de 709,005 Gg de CO₂ eq, lo que representa una contribución de 2.20% (INECC, 2009).

Por último, en la Tabla 25 se resumen las cifras obtenidas de los GEI indirectos inventariados: óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano (COVDM) y bióxido de azufre (SO₂); encontrándose que el gas más abundante fue el CO, mismo que proviene principalmente de las categorías de Energía y USCUSyS.

Tabla 23. Captura y emisión de CO₂ eq de la categoría USCUSyS

| Subcategoría | Descripción |
|--|--|
| Cambios de biomasa en bosques y otros tipos de vegetación leñosa | Durango capturó (↓) -2,316.1 Gg de CO ₂ eq, lo que equivale al 5.36% del total reportado en la actualización del INEGEI 1990-2006 |
| Emisiones CO ₂ procedente de la conversión de bosques y praderas | Durango emitió 13,629.82 Gg, magnitud equivalente al 19.41% de la emisión total en 2006 |
| Emisiones de gases traza distintos al CO ₂ de la quema <i>in situ</i> | Durango hizo una aportación del 16.2% con respecto a las emisiones reportadas para 2002 para este mismo sector a nivel nacional |
| Abandono y manejo de tierras | A nivel nacional se capturó (↓) un total de -1,712.62 Gg de CO ₂ eq |
| Cambios en el carbono de suelos minerales | A nivel nacional se reportaron en 2002 un total de 30,278 Gg de CO ₂ eq, con una contribución estatal del 0.21% |

Tabla 24. Emisiones anuales totales de GEI para el estado de Durango (Gg de CO₂ eq)

| Categoría | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | Promedio |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Energía | 9,203.23 | 11,355.72 | 11,893.82 | 13,149.39 | 11,400.54 |
| Procesos Industriales | 914.72 | 897.78 | 907.15 | 779.53 | 874.80 |
| Agricultura | 2,638.81 | 2,729.08 | 2,691.65 | 2,600.08 | 2,664.90 |
| Desechos | 717.27 | 618.00 | 687.74 | 752.12 | 693.78 |
| Sub Total | 13,474.04 | 15,600.58 | 16,180.37 | 17,281.12 | 15,634.03 |
| Categoría | 2005-2008 | | | | |
| * Uso de Suelo, Cambio de Uso de Suelo y Silvicultura | 272.17 | | | | 15,906.20 |

* El cálculo de esta categoría se hizo para todo el periodo, por las características de datos de actividad del mismo; aquí se presenta el balance final de la categoría.

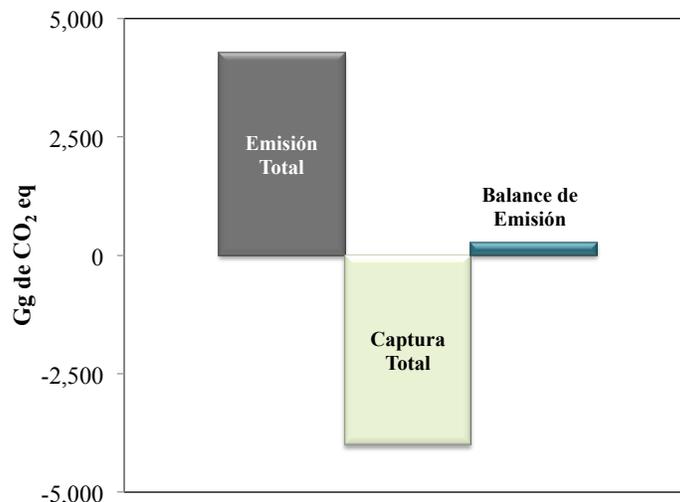


Fig. 5. Emisión-Captura para la categoría USCUSyS en el periodo 2005-2008.

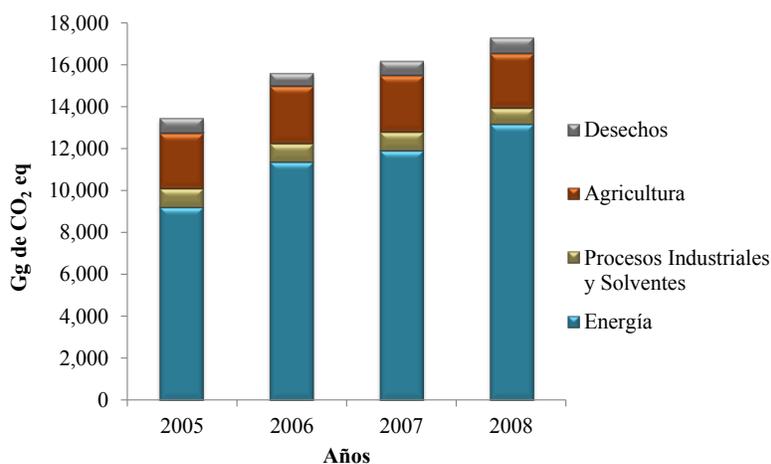


Fig. 6. Comportamiento de las emisiones de GEI (2005-2008) para el estado de Durango.

4 Discusión

Con base en los resultados obtenidos en el IEEGEL-Durango, para el año base (2005) y su tendencia para el periodo 2005-2008, la categoría con más aportación en el estado fue la de *Energía* con un 68.30% (Fig. 7) y su tendencia fue similar en los años siguientes; siendo industrias de la energía y transporte las de mayor contribución. La generación de electricidad a partir de combustibles fósiles ha sido señalada como causante de daños al ambiente y la salud humana pero particularmente en la “*huella de cambio climático*”, por lo que en la década pasada varios países han formulado cambios en sus políticas en materia de energía. Laurent y Espinosa

(2015) realizaron un extenso estudio, aplicando la evaluación del ciclo de vida (LCA, por sus siglas en Inglés), en el cual analizaron diez diferentes categorías de impactos (ambientales y salud humana) ocasionados por la generación de energía eléctrica a nivel regional, nacional e internacional, en 199 países, para el periodo 1980-2011, diferenciando la fuente de generación de energía y las eficiencias de las tecnologías empleadas. Encontraron que hubo fuertes y contrastantes variaciones entre los países desarrollados los cuales presentaron estabilización en los impactos, mientras que en los países en vías de desarrollo hubo un aumento neto de todos los

impactos. Los resultados demostraron que la tendencia de los impactos varió considerablemente entre países. México quedó incluido en Centro y Sudamérica en donde, de acuerdo al análisis del presente estudio, las políticas en materia de energía no han sido dirigidas hacia impactos ambientales por lo que reportaron altas intensidades en dichos impactos. Con base en los resultados, los autores sugieren que los tomadores de decisiones migren hacia una perspectiva holística, incluyendo el modelo de análisis del ciclo

de vida como una herramienta útil en la planificación estratégica, como apoyo en la elaboración de políticas para cumplir retos a nivel regional y nacional acordes a la situación actual del país. Este estudio es único en su tipo y es una fuente de información valiosa, la cual está disponible y puede utilizada para establecer comparativas consistentes e internacionales de los distintos países.

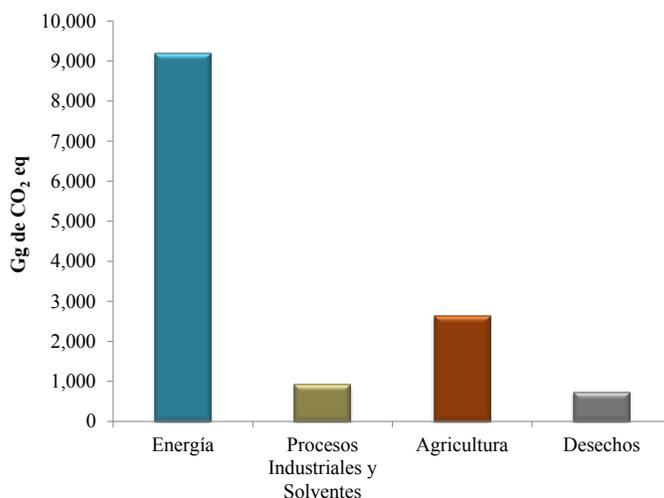


Fig. 7. Comportamiento de las emisiones de GEI para el estado de Durango (2005).

Tabla 25. Emisiones de los GEI indirectos (Gg) para el estado de Durango (2005)

| Categoría | NO _x | CO | COVDM | SO ₂ |
|-----------------------------------|-----------------|---------|--------|-----------------|
| Energía | 48.721 | 256.414 | 48.409 | 0.433 |
| Procesos Industriales y Solventes | 0.039 | 0.057 | 0.010 | 0.015 |
| Agricultura | 0.004 | 0.122 | 0.000 | 0.000 |
| Desechos | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Sub Total | 48.764 | 256.593 | 48.420 | 0.448 |
| Categoría | 2005-2008 | | | |
| * USCUSyS | 1.423 | 50.113 | ---- | ---- |

* El cálculo de esta categoría se hizo para todo el periodo, por las características de datos de actividad del mismo

Por otra parte aun cuando la aportación del estado de Durango a las emisiones nacionales (de GEI directos e indirectos) son mínimas y no presenta problemas a nivel estatal, se debe prestar especial atención al sector transporte; esto por el impacto que tienen las sustancias precursoras (NO_x , CO y compuestos orgánicos volátiles) en la formación de ozono y deriva en una mala calidad del aire, repercutiendo en serios problemas en la salud de la población. Un claro ejemplo es el que enfrenta en estos momentos la capital del país, en donde ya se declaró contingencia ambiental por las cifras que se han registrado al duplicarse el límite máximo permisible del ozono troposférico.

Algunas medidas que se han establecido son el doble "hoy no circula", no actividades al aire libre, y de considerarse necesario la suspensión de actividad en el sector industrial; además de medidas a corto plazo, como la nueva norma emergente para la circulación vehicular y una verificación mucho más estricta que entrará en vigor a partir del primero de julio del año en curso. Con base en dicha problemática se deben tomar medidas preventivas en la provincia, congruentes en los tres niveles de gobierno, en donde se actúe haciendo un frente común para evitar que este tipo de problemas se extiendan al resto del país.

La categoría de *Agricultura* contribuyó con 19.58% de las emisiones estatales, siendo el sector ganadero el de mayor impacto (92.58%) y manteniéndose una tendencia similar en los años subsecuentes. Cabe destacar que en el presente inventario solo se incluyeron cinco de los 45 cultivos (11%) registrados en Durango, a causa de la ausencia de información, lo cual ocasionó que las emisiones fueran subestimadas. Con ello en mente es claro que las emisiones de esta categoría son mucho más elevadas, consecuentemente estos son también dos sectores claves que deben ser atendidos y vigilados para mitigar su impacto.

El balance de emisión-captura de la categoría *USCUSyS* permitió identificar que la conversión de bosques y praderas representaron la mayor emisión con 50.88%, mientras que el cambio de biomasa en bosques y otros tipos de vegetación leñosa tuvo una captura del -31.28%. El inventario realizado indica que el estado de Durango mantiene un balance a favor con respecto a la captura, a pesar de las tasas actuales de deforestación; esto podría traducirse en beneficios económicos a través del mercado de bonos de carbono, lo cual debe ser analizado por las dependencias gubernamentales en conjunto con los beneficiarios directos de los bosques para aplicar una política de

aprovechamiento sustentable del bosque.

Las categorías de menor contribución a las emisiones estatales fueron *Procesos Industriales* y *Residuos*. La contribución de la primera fue del orden del 6.79%, siendo la subcategoría de producción de hierro la de mayor aportación. Sin embargo, de nuevo la constante fue la ausencia de información requerida para una estimación más completa de las emisiones; en el caso de la industria la información fue casi inexistente, así como los datos necesarios para la determinación de las emisiones por solventes lo que ocasionó que estas fueran también subestimadas. Por su parte la categoría de *Residuos* fue la de más baja aportación con un 5.32%, siendo la subcategoría de residuos sólidos la fuente clave con mayor contribución (57.5%). Cabe destacar que en este rubro se ven reflejados los esfuerzos realizados pues se está produciendo energía eléctrica a partir del biogás generado en rellenos sanitarios. Sin embargo es importante prestar especial atención a los lixiviados generados en los rellenos sanitarios así como a los lodos residuales de las PTAR, subproductos del tratamiento de los RSU y de las ARD, respectivamente; los cuales representan cierta peligrosidad por su composición, si no son dispuestos o tratados adecuadamente. A la fecha se han reportado novedosos métodos para el tratamiento de ambos, principalmente para reducir su impacto ambiental con tecnologías de bajo costo e incluso para la producción de biocombustibles (Gan y col., 2013; Castilla-Hernández y col., 2015; Atenodoro-Alonso y col., 2015; San Pedro-Cedillo y col., 2015; Lucho-Constantino y col., 2015), por lo que se sugiere incursionar en este campo de gran oportunidad con la finalidad de contribuir al logro de la sustentabilidad ambiental a mediano plazo.

Se sabe que los 3 principales GEI de larga permanencia son el CO_2 , CH_4 y N_2O y que éstos permanecerán un mínimo de 30 años (50%), siglos (30%) y miles de años (20%) en la atmósfera. Los factores topográficos y meteorológicos son determinantes en el comportamiento de los gases emitidos a la atmósfera y su posible acumulación en un área determinada, la inestabilidad de la atmósfera hace que la concentración varíe y que cierta cantidad sea arrastrada por la acción del viento. De las emisiones totales de CO_2 únicamente un 45% permanece en la atmósfera, un 30% lo absorben los océanos causando su acidificación (aumento en el pH) y el otro 25% pasa a la biósfera terrestre. De acuerdo a datos reportados por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) las fracciones molares de dichos GEI (promedios

mundiales) alcanzaron cifras máximas en el año 2013, equivalentes a 142% (CO₂), 253% (CH₄) y 121% (N₂O), (comparadas con los valores en la era pre-industrial, 1750) y están vinculadas directamente a las actividades antropogénicas (OMM, 2014).

Sin duda muchos eventos han sido indicativos de los estragos vinculados a la acumulación de los GEI: a) 2015 fue el año más cálido registrado (0.76°C, por encima del promedio entre 1961-1990). b) Fenómenos extremos: El Niño Godzilla, olas de calor, sequías, ciclones e inundaciones. c) Exceso de energía almacenada en los océanos, etc. Ahora bien es importante destacar que se suman esfuerzos a nivel internacional como el acuerdo de la COP 21 efectuada en París a finales del 2015, acordándose adoptar medidas para la reducción de las emisiones de GEI a nivel mundial (WMO, 2016).

México es el primer país en vías de desarrollo en contar con una Ley General de Cambio Climático (LGCC), que entró en vigor en octubre del 2012, creando el Registro Nacional de Emisiones (RENE). Este es un instrumento de política pública que recopilará información en materia de emisión de compuestos y gases de efecto invernadero de los diferentes sectores productivos del país (Energía, Industria, Transporte, Agropecuario, Residuos y Comercios y Servicios), mismos que deberán reportar de manera obligatoria sus emisiones directas e indirectas siempre y cuando excedan las 25,000 toneladas de CO₂ eq (SEMARNAT, 2015).

Es así como México transformó su inventario a partir del 2013, hoy denominado *Inventario Nacional de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero*; incluyó al carbono negro (hollín), material particulado (PM_{2.5}) generado por fuentes naturales y actividades antropogénicas (procedente de la combustión incompleta de los productos derivados del petróleo, biocombustibles y biomasa) y se actualizaron los PCG del metano y óxido nitroso, con base en los publicados en el Quinto Informe del IPCC. Dichos cambios están siendo adoptados a nivel municipal, siendo una obligación realizar los inventarios correspondientes para su inclusión en el inventario nacional. Las emisiones nacionales registradas de carbono negro correspondieron a 125 Gg y los nuevos potenciales de calentamiento global considerados para el CH₄ y N₂O fueron de 28 y 265, respectivamente, lo que se reflejó en un incremento de 30 megatoneladas de bióxido de carbono equivalente (Mt CO₂ eq) (INECC, 2013).

Conclusiones

- Los resultados obtenidos indicaron que las categorías con mayor emisión en el estado de Durango fueron *Energía* (68.30%) y *Agricultura* (19.58%), seguidas de *Procesos Industriales* (6.79%) y *Residuos* (5.32%); respecto a la categoría de *USCUSyS* se obtuvo un balance de emisión-captura de 272.17 Gg de CO₂ eq, obteniéndose una emisión total promedio para el periodo 2005-2008 de 15,906.20 Gg de CO₂ eq (2.20% de las emisiones nacionales en el 2006). Sin embargo es importante hacer notar que una constante observada en el desarrollo del inventario fue la ausencia de información desagregada (bases de datos), además de que la información recolectada no poseía una estructura adecuada y contaba con muchas inconsistencias en la forma de reportarse; esto limitó la cuantificación de las emisiones provenientes de fuentes debidamente identificadas.
- Como medidas de mitigación se recomendó continuar inyectando recursos para el uso de tecnologías verdes para la generación de energía eléctrica. A mediados del 2015 se inauguró la segunda etapa del Huerto Solar TAI con una capacidad instalada de casi 70 megawatts y una inversión de capital extranjero, de la empresa española Eosol Energy, de 72 millones de dólares. Gracias a este proyecto el estado de Durango contará con el huerto solar más grande de América Latina, lo cual contribuirá a una disminución de aproximadamente 789,000 toneladas de CO₂. De igual manera se recomendó la implementación urgente del programa de verificación vehicular; todo ello considerando que las subcategorías de industrias de la energía y transporte fueron las fuentes claves con mayor aportación a las emisiones de GEI. Así mismo, que los gobiernos municipales y estatales amplíen la inversión en la captura y quema de biogás proveniente de rellenos sanitarios, para reducir las emisiones de metano a la atmosfera. El municipio de Durango ya cuenta con una planta de captura de biogás en el relleno sanitario de la localidad; la empresa ENER-G se encuentra operando dichas instalaciones produciendo energía eléctrica, con una capacidad de 1.5 megawatts con el tratamiento de 800 m³ de biogás, empleada en

el encendido de luminarias de la capital del estado. Otras medidas de mitigación sugeridas fueron la instalación de plantas de compostaje de residuos sólidos orgánicos a nivel municipal, para contribuir a la reducción en cantidad y volumen de residuos sólidos depositados en los sitios de disposición final y obtener un mejorador de suelos para su aprovechamiento en terrenos de producción agrícola y/o áreas verdes de los centros urbanos; y la adopción de nuevas tecnologías en el sector ladrillero.

- A partir del 2013 se hizo obligatorio incluir dentro de los inventarios de la CMNUCC, las emisiones del trifluoruro de nitrógeno (NF₃) por ser un potente contribuyente al cambio climático; 17,200 (PCG) veces más potente que el CO₂ en el atrapamiento de calor en un lapso de 100 años. Se sabe de este GEI fue subestimado en el pasado en el sector industrial, cuya fuente principal es la fabricación de semiconductores, pantallas de cristal líquido (LCD, por sus siglas en Inglés) y algunos tipos de láseres químicos y paneles solares (WRI-WBCSD, 2013). En el inventario nacional del 2013 se incluyó el carbono negro (hollín), material particulado y compuesto de efecto invernadero que influye en el cambio climático y repercute en la salud humana al penetrar al tracto respiratorio.
- Cabe destacar que en el estado de Durango se creó la Comisión Inter-secretarial Estatal de Cambio Climático (CICC-Durango), conformada por 14 secretarías de estado; encargada de promover la coordinación de acciones entre las dependencias y entidades federales en materia de cambio climático. Contar con dicha comisión a nivel estatal es un gran avance ya que permitirá observar la creación de bases de datos confiables en las dependencias correspondientes, para garantizar la calidad de las estimaciones de las emisiones dando como resultado una mayor certidumbre. Además, la CICC tiene la función y responsabilidad de: proponer e instrumentar políticas nacionales en materia de mitigación y adaptación al cambio climático, para su incorporación a los programas y acciones sectoriales correspondientes; impulsar las acciones necesarias para que se cumplan los objetivos y compromisos contenidos en la Convención; así como participar en la

instrumentación del Programa Especial de Cambio Climático (PECC). Se sugirió que el inventario estatal se actualice al menos cada tres años para dar continuidad a la estimación de las emisiones, alcanzar los objetivos trazados como parte del PEACC e ir a la par del inventario nacional.

Agradecimientos

Este proyecto (Clave 2009-DGO-CO2-116344) fue financiado por el Gobierno del Estado de Durango, a través de la Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente (SRNyMA), mediante el programa de Fondos Mixtos del Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Durango (COCyTED) y como parte del PEACC-Durango (contrato D.M.AMB/No. 003/10 del Anexo 34, Rubro 16). La realización de este proyecto fue un esfuerzo Multi-disciplinario e Inter-institucional del estado de Durango con la participación de investigadores, tesis y residentes de las siguientes instituciones: Instituto Tecnológico de Durango (ITD), Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas (URUZA-Chapingo), Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional del Instituto Politécnico Nacional (CIIDIR-IPN-Durango), Instituto Tecnológico del Valle del Guadiana (ITVG), Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo Planta-Atmósfera del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (CENID-RASPA-INIFAP), Ciencias Forestales de la Universidad Juárez del Estado de Durango (CF-UJED) e Instituto Tecnológico del Salto (ITS). Agradecimiento especial al Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), por la capacitación impartida y la revisión técnica del IEEGEI-Durango, al Centro de Diálogo y Análisis sobre América del Norte (CEDAN)-Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey-Embajada Británica por la capacitación a lo largo del desarrollo del inventario y a todas las dependencias municipales, estatales y federales como proveedores de la información y bases de datos oficiales necesarios para la elaboración del IEEGEI.

Acrónimos

| | |
|-----------------|-------------------------|
| AR | Aguas Residuales |
| AR5 | Fifth Assessment Report |
| CH ₄ | Metano |

| | | | |
|-----------------|---|-----------------|---|
| CICC | Comisión Inter-secretarial Estatal de Cambio Climático | SF ₆ | Hexafluoruro de Azufre |
| CMNUCC | Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático | SO ₂ | Bióxido de Azufre |
| CO | Monóxido de Carbono | UNFCCC | United Nations Framework Convention on Climate Change |
| CO ₂ | Bióxido de Carbono | USCUSyS | Uso de Suelo, Cambio de Uso de Suelo y Silvicultura |
| COA | Cédulas de Operación Anual | WRBSR | World Reference Base for Soil Resources |
| CONAGUA | Comisión Nacional del Agua | | |
| COP | Conferencia de las Partes (Conference of the Parties) | | |

| | |
|-------------------|--|
| COVDM | Compuestos Orgánicos Volátiles Diferentes del Metano |
| DBO | Demanda Bioquímica de Oxígeno |
| FAO | Food and Agriculture Organization of the United Nations |
| GHGI | Greenhouse Gas Inventory |
| HFC's | Hidrofluorocarbonos |
| IEEGEI | Inventario Estatal de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero |
| INECC | Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático |
| INEGEI | Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero |
| IPCC | Intergovernmental Panel on Climate Change |
| IPS | Industrial Processes and Solvents |
| LCD | Liquid Crystal Display |
| LULUCF | Land Use, Land-Use Change and Forestry |
| LGCC | Ley General de Cambio Climático |
| N ₂ O | Óxido Nitroso |
| NMVOG | Non-Methane Volatile Organic Compounds |
| NO _x | Óxidos de Nitrógeno |
| NRC | National Research Council |
| OCDE | Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico |
| PEACC | Programas Estatales de Acción ante el Cambio Climático |
| PECC | Programa Especial de Cambio Climático |
| PFC's | Perfluorocarbonos |
| PIS | Procesos Industriales y Solventes |
| PM _{2.5} | Partículas en suspensión con un diámetro aerodinámico de hasta 2.5 μm |
| RENE | Registro Nacional de Emisiones |
| SAGARPA-SIAP | Secretaría de Agricultura Ganadería y Desarrollo Rural Pesca y Alimentación-Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera |

Nomenclatura

| | |
|-----------------------|--|
| A_i | superficie forestal por tipo de bosque en kilohectáreas, Kha |
| A_i | superficie (en ha) de la clase k que cambió al uso de suelo tipo i en la eco-región j |
| B_{dk} | biomasa después del cambio de la clase original k (promedio ponderado de todas las clases a las cuales se ha cambiado la clase original) |
| BEF_2 | factor de expansión de biomasa para convertir volumen de madera a biomasa aérea total (incluye corteza), sin unidades |
| B_i | biomasa de la clase de uso de suelo i en eco-región j al cual fue cambiado la superficie A_{ij} de la clase de uso de suelo k |
| CC_j | consumo de los diferentes tipos de combustible (j) |
| CF | fracción de C de ms |
| CL | consumo de leña en kg de madera/persona, se calculó a partir de la proyección de la población para 2008. Donde, 4.7 es el valor promedio anual (± 2.1) y un máximo de 3.5 kg por día para la temporada de invierno en la Sierra. |
| D | densidad básica de la madera en toneladas de materia seca por metro cúbico, $t\text{ ms}/\text{m}^3$) |
| DA | dato de actividad |
| $EsEm$ | estimación de la emisión |
| $EGEI_i$ | emisión de CO ₂ , CH ₄ y N ₂ O (i) |
| FC | fracción de carbono de la materia seca (por defecto = 0.5), $Mg\ C\ (t\text{ ms})$ |
| FE_j | factor de emisión de cada tipo de combustible (j) |
| Gg CO ₂ eq | Gigagramos de bióxido de carbono equivalente |
| G_i | tasa de incremento medio anual de crecimiento de la biomasa aérea, en kilotoneladas de materia seca por año (Kt ms /año) por tipo de bosque |

| | |
|-------------------------------|---|
| <i>H</i> | volumen de madera industrial extraída al año en rollo (m ³ /año) |
| <i>L_{comercial}</i> | pérdida anual de carbono generada por las talas comerciales, Kt C/ año |
| <i>L_{leña}</i> | pérdida anual de carbono generada por el consumo doméstico de leña, Kt C/año |
| <i>L_{industrial}</i> | pérdida anual de carbono debida a la tala para madera industrial, Kt ms/ año |
| Quema de biomasa | cantidad de C proveniente de la quema de biomasa, Kt |
| Relación de emisión | masa de carbono liberado en la combustión como CH ₄ o CO (en unidades de C) con respecto a la masa total del carbono liberado en la combustión, en unidades de C |
| Relación de N/C | relación de nitrógeno liberado como N ₂ O y NO _x con respecto al nitrógeno contenido en el combustible, en unidades de N |
| <i>t C</i> | toneladas de carbono |
| TCA | tasa de crecimiento |
| TJ | terajoules |

Referencias

- Atenodoro-Alonso, J., Ruíz-Espinoza, J.E., Alvarado-Lassman, A., Martínez-Sibaja, A., Martínez-Delgado, S.A., and Méndez-Contreras, J.M. (2015). The enhanced anaerobic degradability and kinetic parameters of pathogenic inactivation of wastewater sludge using pre- and post-thermal treatments Part 2. *Revista Mexicana de Ingeniería Química 14*, 311-319.
- Arvizu, J.L. (2008). Actualización del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero 1990-2006 en la Categoría de Desechos. Disponible en: www.inecc.gob.mx/descargas/cclimatico/inf_inegei_desechos_2006.pdf. Accesado: 3 mayo 2016.
- Arvizu, J.L. (2011). Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Comunicación personal.
- Castilla-Hernández, P., Cárdenas-Medina, K., Hernández-Fydrych, V., Fajardo-Ortiz, C., and Meraz-Rodríguez, M. (2016). Compost leachates treatment in a two-phase acidogenic-methanogenic system for biofuels production. *Revista Mexicana de Ingeniería Química 15*, 175-183.
- CMNUCC (1998). Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Disponible en: www.unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf. Accesado: 5 mayo 2016.
- Gan, J., Montaña, G., Fajardo, C., Meraz, M., and Castilla, P. (2013). Anaerobic co-treatment of leachates produced in a biodegradable urban solid waste composting plant in Mexico City. *Revista Mexicana de Ingeniería Química 12*, 541-551.
- GPG-LULUCF (2003). Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) to the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Edited by Jim Penman, Michael Gytarsky, Taka Hiraiishi, Thelma Krug, Dina Kruger, RiittaPipatti, Leandro Buendia, Kyoko Miwa, Todd Ngara, Kiyoto Tanabe and Fabian Wagner. WNEP-WMO-IGES. Disponible en: [hwww.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpگلulucf/gpگلulucf.html](http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpگلulucf/gpگلulucf.html). Accesado: 7 mayo 2016.
- INECC (2006). Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2002. Resumen Ejecutivo. Disponible en: www.inecc.gob.mx/descargas/cclimatico/inegei_res_ejecutivo.pdf. Accesado: 2 mayo 2016.
- INECC (2006b). Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990 a 2006. Actualización del Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2006 en la Categoría de Agricultura, Silvicultura y otros usos de la tierra. Disponible en: www.inecc.gob.mx/descargas/cclimatico/inf_inegei_usos_tierra_2006.pdf. Accesado: 5 mayo 2016.
- INECC (2009). Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. II. Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2006. Disponible en: www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/615/inventario.pdf. Accesado: 8 mayo 2016.

- INECC (2013). Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Inventario de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 2013. Disponible en: www.inecc.gob.mx/descargas/cclimatico/2015_inv_nal_emis_gei_result.pdf. Accesado: 7 mayo 2016.
- INEGI (2003). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Vectoriales shp de Uso de Suelo y Vegetación del Estado de Durango de la Serie I, II y IV.
- IPCC (1996). Intergovernmental Panel on Climate Change. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories
- IPCC (2001). Intergovernmental Panel on Climate Change. Orientación del IPCC sobre las buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre en los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero.
- IPCC (2003). Intergubernamental Panel on Climate Change. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Edited by Jim Penman, Michael Gytarsky, Taka Hiraishi, Thelma Krug, Dina Kruger, Riitta Pipatti, Leandro Buendia, Kyoko Miwa, Todd Ngara, Kiyoto Tanabe and Fabian Wagner. Published by the Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC.
- IPCC (2015). Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. Disponible en: www.ipcc.ch/report/ar5/syr/. Accesado: 8 mayo 2016.
- Laurent, A. and Espinosa, N. (2015). Environmental impacts of electricity generation at global, regional and national scales in 1980-2011: What can we learn for future energy planning?. *Energy and Environmental Science* 8, 689-701.
- Lucho-Constantino, C.A., Medina-Moreno, S.A., Beltrán-Hernández, R.I., Juárez-Cruz, B., Vázquez-Rodríguez, G.A., y Lizárraga-Mendiola, L. (2015). Diseño de fosas sépticas rectangulares mediante el uso de la herramienta
- FOSEP. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 14, 757-765.
- Márquez-Ramos, L. (2015). The relationship between trade and sustainable transport: A quantitative assessment with indicators of the importance of environmental performance and agglomeration externalities. *Ecological Indicators* 52, 170-183.
- Martínez-Prado, M.A. (2012). Elaboración del Inventario de Gases de Efecto Invernadero y sus Estrategias de Mitigación para el Estado de Durango. Reporte final del proyecto Clave 2009-DGO-CO2-116344 ante el programa de Fondos Mixtos del Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Durango (COCyTED), 267 p.
- NRC (1994). National Research Council. Nutrient Requirements of Nutrient Requirements of Poultry: Ninth Revised Edition. Subcommittee on Poultry Nutrition. Committee on Animal Nutrition. National Academy Press. Washington, D.C. 157 p.
- NRC (1998). National Research Council. Nutrient Requirements of Nutrient Requirements of Swine: Tenth Revised Edition. Subcommittee on Swine Nutrition. Committee on Animal Nutrition. National Academy Press. Washington, D.C. 189 p.
- NRC (2000). National Research Council. Nutrient Requirements of Beef Cattle: Seventh Revised Edition. Subcommittee on Beef Cattle Nutrition. Committee on Animal Nutrition. National Academy Press. Washington, D.C. 234 p.
- NRC (2001). National Research Council. Nutrient Requirements of Dairy Cattle: Ninth Revised Edition. Subcommittee on Dairy Cattle Nutrition. Committee on Animal Nutrition. National Academy Press. Washington, D.C. 381 p.
- OCDE (2003). Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico. Current Status of National Inventory Preparation In Annex I Parties and Non-Annex I Parties. OCDE Environment Directorate and International Energy Agency. Document prepared by Abke Herold, Oeko-Institut, Germany, in November 2003.

- OMM (2014). Organización Meteorológica Mundial. Estado de los gases de efecto invernadero en la atmósfera según las observaciones mundiales realizadas en el 2013. Boletín Número 10. Disponible en: www.wmo.int/pages/documents/ghg-bulletin_10_es.pdf. Accesado: 3 mayo 2016.
- San Pedro-Cedillo, L., Méndez-Novelo, R.I., Rojas-Valencia, M.N., Barceló-Quintal, M., Castillo-Borges, E.R., Sauri-Rianchoy, M.R., and Marrufo-Gómez, J.M. (2015). Evaluation of adsorption and fenton-adsorption processes for landfill leachate treatment. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 14, 745-755.
- Ordóñez, J.A.B. y Hernández, T. (2005). Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero 1990-2002, Sector Agricultura, Capítulo 4. Instituto Nacional de Ecología - Fundación México Estados Unidos para la Ciencia, A. C.
- PEACC-Durango (2014). Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático de Durango. PEACC-DURANGO. Reporte final presentado ante el INECC.
- SAGARPA-SIAP (2010). Secretaría de Agricultura Ganadería y Desarrollo Rural Pesca y Alimentación-Servicio de Información Agropecuaria y Pesquera. Base de Datos actualizada periodo 2004-2008. Información en línea. Disponible en: www.siap.gob.mx/. Accesado: 3 mayo 2016.
- SEMARNAT (2015). Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente. Guía de Usuario. Registro Nacional de Emisiones (RENE) para el Reporte de Emisiones de Compuestos y Gases de Efecto Invernadero. Disponible en: www.climate.blue/download/Manual%20RENE%20giz%20-%202015%20Julio%2020.pdf. Accesado: 9 mayo 2016.
- SEMARNAT-INECC (2009). Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente-Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. 4a Comunicación Nacional ante la CMNUCC, 2009. Disponible en: www2.inecc.gob.mx/publicaciones/download/615.pdf. Accesado: 6 mayo 2016.
- SEMARNAT-INECC (2012). Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. México. Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Disponible en: www2.inecc.gob.mx/publicaciones/consultaPublicacion.html?id_pub=685. Accesado: 7 mayo 2016.
- SENER (2010). Secretaría de Energía. Subsecretaría de Planeación Estratégica y Desarrollo Tecnológico. Balance Nacional de Energía 2009, 145 p.
- UNFCCC (2004). United Nations-Framework Convention on Climate Change. Informando sobre el cambio climático. Manual del usuario para las directrices sobre comunicaciones nacionales de las partes no-Anexo I de la CMNUCC. Disponible en: http://unfccc.int/resource/userman_nc_sp.pdf. Accesado: 3 mayo 2016.
- UNFCCC-COP (2003). United Nations-Framework Convention on Climate Change-Conference of the Parties. A Brief Overview of Decisions. Disponible en: <http://unfccc.int/documentation/decisions/items/2964txt.php>. Accesado: 3 mayo 2016.
- Valencia, R. (2008). Enhanced stabilization of municipal solid waste in bioreactor landfills, PhD Dissertation, UNESCO-IHE, Delft, The Netherlands, 157 p.
- Vicencio de la Rosa, M.G., Villanueva-Fierro, I., y Viguera-Cortez, J.M. (2006). Proyecto de relleno sanitario para la disposición de residuos sólidos urbanos y de manejo especial para el municipio de Poanas, Durango.
- Villanueva-Fierro, I., Vicencio de la Rosa, M.G., Pérez-López, M.E., Medina-Herrera, E., Viguera-Cortez, J.M., y Chávez-Ramírez, S.C. (2009). Proyectos ejecutivos para rellenos sanitarios de los municipios de Guadalupe Victoria, Vicente Guerrero, Tlahualilo, Nombre de Dios y Canatlán del estado de Durango.
- WBCSD (2011). World Business Council for Sustainable Development. GHG Protocol guidance on uncertainty assessment in GHG inventories and calculating statistical parameter uncertainty. Disponible en: www.ghgprotocol.org/calculation-tools/all-tools. Accesado: 4 mayo 2016.

WMO (2016). World Meteorological Organization. Statement on the Status of the Global Climate in 2015. WMO No. 1167, 28 p. Disponible en: www.library.wmo.int/pmb_ged/wmo_1167_en.pdf. Accesado: 9 mayo 2016.

WRI-WBCSD (2013). World Resources Institute-World Business Council for Sustainable Development. GHG Protocol. Required Greenhouse Gases in Inventories. Accounting and Reporting Standard Amendment. Disponible en: www.ghgprotocol.org/files/ghgp/NF3-Amendment_052213.pdf. Accesado: 7 mayo 2016.