

EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN SISTEMAS AGRÍCOLAS DE MÉXICO

Greenhouse Gas Emissions in Agricultural Systems in Mexico

Vinisa Saynes Santillán^{1‡}, Jorge D. Etchevers Barra¹, Fernando Paz Pellat¹ y
Leonardo O. Alvarado Cárdenas²

¹ Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 56230 Montecillo, Estado de México, México.

[‡] Autora responsable (vinisa.saynes@colpos.mx)

² Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. Av. 3000, Circuito Exterior s/n, Del. Coyoacán, Cd. Universitaria. 04510 México, D. F.

RESUMEN

La agricultura es el sustento para la alimentación de una población mundial creciente. La agricultura es la cuarta causa de emisiones de GEI, y emite grandes cantidades de los llamados “gases que no son CO₂” incluyendo al N₂O y el CH₄ con un poder de calentamiento 265 y 28 veces, respectivamente, mayor en comparación con el CO₂. En México la información de las emisiones de GEI se reporta en diversos foros y desde diferentes perspectivas. En este trabajo se recopiló información de las emisiones de GEI de las Comunicaciones Nacionales y el Primer Informe Bienal, de publicaciones arbitradas por pares y de la literatura gris. Las emisiones del sector agrícola reportadas en las diferentes Comunicaciones presentan inconsistencias debido a factores como falta de información y de acceso a esta en las primeras dos Comunicaciones y a cuestiones de tipo metodológico en las Comunicaciones subsecuentes. De acuerdo con las estimaciones más actuales (Informe Bienal), las actividades agropecuarias son la tercera causa de generación de emisiones de GEI con una contribución del 12% a las emisiones nacionales. Dentro de esta categoría la mayor parte de las emisiones se generan por la fermentación entérica, el manejo del estiércol y por el uso de fertilizantes en los suelos agrícolas. Los principales retos para mejorar las estimaciones y reducir su incertidumbre es la generación de factores de emisión nacionales para lo cual es esencial contar con mayor información de las fuentes clave. En este trabajo se encontró que existe información relevante que sería de utilidad pero se encuentra dispersa por lo que falta síntesis y organización de la información sobre todo de la que se encuentra en la literatura gris.

Palabras clave: sector agrícola; inventarios de GEI; México.

SUMMARY

Agriculture is the food source to feed an increasing global population. Agriculture is the fourth cause of global GHG emissions with the non-CO₂ gases among them, including N₂O and CH₄. These gases have a warming potential of 265 and 28 for N₂O and CH₄, respectively. In Mexico GHG emission information has been reported in several communications and from different perspectives. In this paper we collected the available GHG information reported in National Communications and the First Biennial Report, in peer review papers and “grey” literature. Agriculture emissions reported in National Communications showed inconsistencies due to factors such as lack of information, access to information in the case of the First and Second Communications. In the case of the subsequent reports inconsistencies were associated with methodological issues. According to the updated national GHG estimations presented in the Biennial Report, agricultural activities are the third cause of GHG emissions accounting for the 12% on national emissions. Within the Agriculture category enteric fermentation, manure management and synthetic use of nitrogen fertilizers are causing the majority of GHG emissions. The main challenges to improve the estimations of GHG emissions and reduce its uncertainty is the generation of detailed national emissions factors to which it is essential to obtain more and better information of the key sources. In this investigation we found there is relevant information that would be useful but it is dispersed. Therefore it is necessary the synthesis and systematization of the information, particularly the one found in the “grey” literature.

Index words: agricultural sector; GHG inventories; Mexico.

Como citar este artículo:

Saynes Santillán, V., J. D. Etchevers Barra, F. Paz Pellat y L. O. Alvarado Cárdenas. 2016. Emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas agrícolas de México. Terra Latinoamericana 34: 83-96.

Recibido: octubre de 2015. Aceptado: enero de 2016.

Publicado en Terra Latinoamericana 34: 83-96.

INTRODUCCIÓN

El Escenario Global

Aproximadamente 40% de los ecosistemas terrestres y gran parte de los océanos han sido transformados para el servicio de la humanidad a costa de la sobrevivencia de otras especies y de la pérdida de servicios ecosistémicos críticos (Power, 2010; Cardinale *et al.*, 2012). Los suelos cultivados cubren ~12% de la superficie terrestre libre de hielo, mientras que los pastizales inducidos cubren un 26% adicional, por lo que en conjunto, el uso de suelo agrícola ocupa el 38% de la superficie terrestre siendo el uso de suelo más extendido del planeta (FAOSTAT, 2014). La agricultura usa alrededor del 70% de agua dulce disponible (Gleick *et al.*, 2010) y genera 30-35% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI). Sin embargo, los agroecosistemas también tienen un gran potencial de mitigación de GEI cuando se conservan los residuos de cosecha, se reduce la labranza y se introducen cultivos de cobertura (Lal, 2003). Estos impactos ambientales se derivan de procesos de expansión, cuando los ecosistemas naturales son reemplazados por cultivos y pastizales, y por procesos de intensificación que conducen al uso de irrigación, fertilizantes, pesticidas y labranza (Foley *et al.*, 2014). Tanto los procesos de expansión como de intensificación agrícola producen degradación del suelo y emisiones de GEI. Estas emisiones se generan principalmente por la deforestación en las regiones tropicales, las emisiones de metano provenientes de la ganadería y de los cultivos de arroz y de óxido nitroso derivado del uso de fertilizantes en la agricultura (FAOSTAT, 2014).

Los principales GEI emitidos por las actividades antropogénicas a nivel mundial son el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O). Globalmente, la causa principal del incremento en las emisiones de éstos GEI son las actividades relacionadas con el sector energético que representan 26% de las emisiones, seguido del sector industrial (19%), forestal (17%), agrícola (14%), residencial y comercial (8%) y de manejo de desechos (3%) (IPCC, 2013). Aunque las actividades agrícolas son la cuarta causa de emisiones de GEI, éste sector emite grandes cantidades de los llamados “gases que no son CO₂” (Montzka *et al.*, 2011). Estos gases incluyen al N₂O y el CH₄ con un poder de calentamiento 265 y 28 veces,

respectivamente, mayor en comparación con el CO₂ en un escenario proyectado a 100 años (IPCC, 2013). Por su enorme potencial de calentamiento, pequeños cambios en los flujos netos de estos gases pueden contribuir significativamente con el calentamiento global en comparación con cambios similares en flujos de CO₂ (Robertson, 2004). Se ha estimado que las actividades agrícolas emiten 25% de los flujos de CO₂ antropogénico, 55-60% del total de las emisiones de CH₄, y 65-80% de los flujos totales de N₂O (Robertson, 2004). Por ésta razón es importante monitorear e incluir las emisiones del sector agrícola en las estrategias de mitigación, ya que remover gases como el N₂O de la atmósfera podría tener un impacto 300 veces mayor que remover la misma masa de CO₂ (Robertson, 2004). Adicionalmente, si no se intensifican los esfuerzos de mitigación de estos gases, las emisiones de GEI del sector agrícola podrían neutralizar los esfuerzos de mitigación y de captura de carbono del sector forestal.

N₂O

Actualmente la concentración atmosférica de N₂O es 19% mayor en comparación con su concentración previa a la Revolución Industrial y tiene un tiempo de residencia en la atmósfera de 120 años (Flückiger *et al.*, 2004). Globalmente las actividades agrícolas son la fuente más importante de N₂O emitido por los suelos (Snyder *et al.*, 2009) y aunque representan únicamente 8% de las emisiones totales de GEI, generan aproximadamente la mitad de las emisiones del sector agrícola. Estas emisiones provienen de los suelos cultivados, de los desechos animales y de la quema de biomasa (Montzka *et al.*, 2011). En el caso de los suelos cultivados las emisiones de N₂O están relacionadas con el uso excesivo e inadecuado de fertilizantes nitrogenados (Snyder *et al.*, 2009). En los últimos 60 años la producción antropogénica de nitrógeno para su uso en fertilizantes ha duplicado las tasas de fijación (mecanismos de ingreso del nitrógeno a los ecosistemas por vías naturales) (Sutton *et al.*, 2011). Actualmente 100 Tg de nitrógeno están siendo añadidos a los suelos cada año globalmente (Erisman *et al.*, 2008). Este incremento en el uso de fertilizantes en los cultivos ha modificado el ciclo global del nitrógeno debido a que grandes cantidades de este elemento en su forma reactiva, también llamado nitrógeno reactivo (Nr, formas de nitrógeno capaces de combinarse con otras formas químicas en el ambiente) están siendo

añadidas a los cultivos (Delgado y Follet, 2010). El uso excesivo de fertilizantes en la agricultura incrementa el potencial de pérdida del Nr , que es ampliamente dispersado por procesos de transporte hidrológico en forma de amoníaco (NH_3) (aunque este también puede ser emitido a la atmósfera), amonio (NH_4) y nitrato (NO_3^-) (Galloway *et al.*, 2003). El Nr también puede ser dispersado por vía atmosférica en forma de óxidos de nitrógeno (NO_x) y óxido nitroso (N_2O) (Weathers *et al.*, 2013).

CH₄

El CH_4 es el gas “no CO_2 ” más abundante en la atmósfera (Motzka *et al.*, 2011), tiene un potencial de calentamiento 28 veces mayor en comparación con el CO_2 y un tiempo de residencia en la atmósfera de 9 a 15 años (IPCC, 2013). El CH_4 es emitido por fuentes naturales como los humedales pero también por actividades humanas como fugas de los sistemas de gas natural y las crecientes actividades ganaderas (FAOSTAT, 2014). Globalmente más del 60% de las emisiones de CH_4 provienen de las actividades humanas, las cuales han duplicado sus emisiones en los últimos 25 años (Denman *et al.*, 2007). El CH_4 es emitido por la industria, la agricultura y el manejo de los desechos. En contraste con otros sectores como el energético y de cambio de uso de suelo en los cuales el CO_2 representa la mayor parte de las emisiones de GEI, en el sector agropecuario las emisiones están dominadas por el CH_4 (52%), el N_2O (44%) y no por el CO_2 (4%) (Baumert, *et al.*, 2005; Monztkka *et al.*, 2011). Las emisiones de CH_4 del sector agropecuario provienen fundamentalmente de la fermentación entérica, los cultivos de arroz, la quema de biomasa y los desechos animales (Bousquet *et al.*, 2006).

CO₂

En el sector agropecuario las emisiones de CO_2 representan únicamente del 3 al 4.5% (Sauerbeck, 2001), por lo que no se considera un GEI importante en las actividades agrícolas. Sin embargo, los efectos indirectos de las emisiones de CO_2 derivadas de las actividades agrícolas pueden ser significativos al reducir la fertilidad y productividad de los suelos cultivados (Paustian *et al.*, 2000). Un ejemplo de ello son las reducciones de carbono orgánico en el suelo (COS) (Lal, 1999) que regresa a la atmósfera en forma

de CO_2 lo cual tiene repercusiones negativas en la fertilidad de los suelos (Lal, 2004). En el periodo de 1850 a 1998 se emitieron 270 ± 30 Pg de CO_2 debido a la quema de combustible fósil y a la producción de cemento y 136 ± 55 Pg como resultado del cambio en el uso del suelo. De estas emisiones, 78 ± 12 Pg fueron emitidos de los suelos generando reducciones de COS (Lal, 1999). Se ha estimado que la pérdida histórica de COS ha sido entre 66 y 90 Pg C (Lal, 1999). Esta reducción de COS es dependiente de diversos factores entre los que se encuentran el contenido inicial de carbono, la labranza, el cultivo de suelos orgánicos, la remoción de biomasa para biocombustible y la erosión (Lal, 2004). La mayoría de las pérdidas de COS ocurren durante los primeros años de la transformación de los ecosistemas naturales en ecosistemas manejados (Paustian *et al.*, 1998). Estas pérdidas de COS pueden acentuarse cuando el retorno de los residuos agrícolas y la biomasa de raíces son menores a las pérdidas por erosión, mineralización y lixiviación. Hay publicaciones que indican que las emisiones de CO_2 pueden ser significativas en sistemas bajo labranza convencional (Six *et al.*, 1999) y por la adición de abonos orgánicos. La labranza acentúa las emisiones de CO_2 al reducir la estabilidad de los agregados del suelo, exponiendo COS encapsulado a la degradación microbiana, y alterando el microclima del suelo e influenciando la actividad y la diversidad de la fauna del suelo (Six *et al.*, 2000, 2002).

Emisiones por Cambios de Uso del Suelo

El suelo es el principal almacén de carbono (C) en los ecosistemas terrestres, ya que el carbono orgánico en el suelo (COS), a un 1 m de profundidad, es de 1500 Pg (Field y Raupach 2004), tres veces mayor que el almacén de C en la vegetación (550 Pg C) y dos veces mayor que el atmosférico (760 Pg) (Pan *et al.*, 2011). La conversión de bosques a usos agrícolas (deforestación) y la degradación de los bosques emiten 17.4% de las emisiones GEI a escala global (IPCC, 2007).

El Escenario Nacional

Los ecosistemas forestales naturales cubren ~34% de la superficie terrestre de México, mientras que la superficie cultivada alcanza del 14 al 16% y los pastizales inducidos o cultivados cubren el 9.8% (INE-SEMARNAT, 2012). El sector agropecuario es

fundamental no solo por la extensión de este uso de suelo, sino por su importancia en la economía del país. Las actividades agrícolas tienen una participación de 3.8% del PIB y emplea al 11% de la población económicamente activa ocupada con 5.6 millones de personas (SIAP, 2014). A nivel mundial México tiene un papel importante en la producción de alimentos ocupando el lugar número doce (SIAP, 2014). El valor económico de la producción agrícola en 2014 fue de 417 mil millones de pesos que representan el 52% de la derrama económica del sector productivo seguida por el sector pecuario con 45% y pesquero con 3% (SIAP, 2014). Aunque aproximadamente el 74.1% de la superficie cultivada es de temporal y 25.9% es de riego, el 58% de la derrama económica agrícola se obtiene en tierras de riego y 42% en sistemas de temporal. Las actividades agrícolas tienen un fuerte impacto ambiental ya que utilizan 77% del agua disponible ($61.8 \text{ km}^3 \text{ año}^{-1}$), y pueden provocar degradación del suelo (INECC-SEMARNAT, 2015). Adicionalmente el agua utilizada para el riego puede generar emisiones de GEI importantes si es adicionada con nitrógeno, o bien si se aplica a los suelos después de un evento de fertilización. El creciente consumo de alimentos y fibras producidas por la agricultura y la simultánea reducción de la calidad y productividad de los suelos han generado emisiones significativas de GEI (Lal, 2003). Mientras que la mayor parte de las emisiones nacionales de CO_2 provienen de la quema de combustibles fósiles y del uso y cambio de uso de suelo del sector forestal, las emisiones de CH_4 y de N_2O están más relacionadas con el sector agrícola y pecuario.

Ante el escenario discutido los objetivos de este trabajo son: (a) Presentar una síntesis nacional, preliminar de la información nacional oficial (Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero reportados en Comunicaciones Nacionales) y la información científica de los estudios que abordan la medición y modelación de GEI en los sistemas agrícolas en México; y (b) Establecer una agenda de desarrollo futuro orientada a generar nuevas síntesis nacionales. (c) Identificar los vacíos de conocimiento y como se pueden comenzar a resolver.

MATERIALES Y MÉTODOS

En el presente trabajo se dividió la información de las emisiones de GEI en México en dos grupos:

1.- Información oficial. En este grupo se consideraron los Inventarios Nacionales de GEI reportados en las Cinco Comunicaciones Nacionales y el Primer Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

2.- Información científica de las investigaciones de medición y modelaje de las emisiones de GEI de suelos agrícolas. Se consideraron artículos científicos revisados por pares, las Síntesis Nacionales del Programa Mexicano del Carbono y literatura tesis.

La búsqueda de la información se realizó utilizando los buscadores Science Direct, Web of Science, Google Académico y buscadores de bibliotecas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero

A nivel nacional las emisiones de GEI se presentan en el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INEGEI) reportado en la Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). La Primera Comunicación Nacional de México se presentó en 1997 e incluyó el primer inventario nacional de gases de efecto invernadero para México en 1990. En el Cuadro 1 se muestra la recapitulación de los INEGEI y de sus actualizaciones así como de la metodología utilizada en cada uno. Las estimaciones de las emisiones de GEI se realizan para las seis categorías de emisión definidas por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (PICC): Energía, Procesos Industriales, Solventes, Agricultura, Uso del Suelo, Cambio de Uso del Suelo y Silvicultura (USCUSS) y Desechos. Los INEGEI incluyen información de los seis GEI incluidos en el Anexo A del Protocolo de Kioto: CO_2 , CH_4 , N_2O , hidrofluorocarbonos (HFCs), perfluorocarbonos (PFCs) y hexafluoruro de azufre (SF). Las emisiones se reportan para cada GEI y también en unidades de CO_2 equivalente ($\text{CO}_2 \text{ eq}$) las cuales se obtienen multiplicando la cantidad de emisiones de un GEI por su valor de potencial de calentamiento global en un periodo de 100 años. De acuerdo con el PICC estos potenciales de calentamiento han variado, pero los valores más actuales son de 1, 28 y 265 para el CO_2 , CH_4 y N_2O , respectivamente (IPCC, 2013).

Cuadro 1. Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero presentando en las Comunicaciones Nacionales ante la CMNUCC y sus actualizaciones así como de la metodología utilizada y el año de publicación de cada uno.

Comunicación	Año de publicación	Metodología PICC utilizada	Periodo del Inventario
Primera	1997	1995	1990
Segunda	2001	1996	Actualización 1994-1998
Tercera	2006	2001	Actualización al 2002 (1990-2002). Se calcularon nuevamente las cifras para los años 1990, 1992, 1994, 1996, 1998 y 2000. La categoría de USCUS fue actualizada al periodo 1993-2002.
Cuarta	2009	2006	Actualización 1990-2006.
Quinta	2012	1996 y 2006	Actualización al 2010
Informe Bienal	2015	1996 reforzada con GBP 2000	Actualización al 2013

Cambios Metodológicos a través del Tiempo en las Comunicaciones Nacionales

Las diferencias en las emisiones reportadas entre las primeras dos comunicaciones con respecto a las subsecuentes se debieron probablemente a que las bases de datos comenzaban a construirse y las metodologías estaban siendo establecidas. Con el desarrollo del internet se comenzaba a obtener la información necesaria para la elaboración de los inventarios extrayéndola de los portales de las principales Secretarías pero el retroceso de los sistemas de estadísticas fue una restricción importante en ese momento. Probablemente las diferencias se deben a temas de recopilación de la información, a la exclusión de algunas fuentes de GEI y a que se utilizaron factores de emisión por defecto para casi todas las fuentes y no tanto a cambios en las emisiones. En el sector pecuario se utilizaron factores ponderados por tipo de producción y masa para las emisiones pecuarias. Sin embargo debido a la falta de datos no fue posible hacerlo para los suelos agrícolas. En la Tercera Comunicación las emisiones se volvieron a calcular utilizando información actualizada y factores de emisión más adecuados a las condiciones nacionales aunque no para el caso de las emisiones de GEI derivadas de los suelos agrícolas. Además de las cuestiones metodológicas ya mencionadas, la reducción de las emisiones de la agricultura observada en la Tercera Comunicación (comparada con la Segunda Comunicación, Cuadro 2) se debieron a un incremento en la importación de granos básicos y a una reducción de la producción por el estancamiento del sector pecuario. En este momento se hizo evidente

la falta de financiamiento para identificar vacíos de información y realizar estudios de mitigación. En la Cuarta Comunicación se apreció una reducción en las emisiones del sector agrícola. Aunque las variaciones en las tendencias difícilmente pueden atribuirse a una sola causa, debe mencionarse que México vivió transformaciones económicas estructurales que incluyeron una mayor apertura económica. Esto impulsó al sector manufacturero pero pudo haber afectado al sector agrícola. Además de los factores económicos las cifras son distintas y pudieron deberse a que por primera vez se utilizaron factores de emisión obtenidos para México a partir de estudios propios reflejando mejor la situación nacional. En la Quinta Comunicación se indicó de forma muy clara el uso de los factores de emisión utilizados para cada sector. Se utilizaron factores de emisión específicos del país para los cálculos de las emisiones de la fermentación entérica, del manejo del estiércol, sin embargo la falta de información obligó a que los cálculos de las emisiones del cultivo de arroz, los suelos agrícolas y la quema de residuos se realizaran utilizando factores de emisión por defecto. Esto muestra la falta de estudios de emisiones de GEI en suelos agrícolas. El notable incremento del N_2O procedente del manejo de suelos agrícolas mostrado en esta Comunicación ocurrió debido a cambios en la metodología ya que se incluyó en los cálculos el total del nitrógeno excretado. En el Primer Informe Bienal se realizó un esfuerzo para mejorar la resolución de los cálculos incluyendo la actualización de la información, la desagregación de los datos y estimaciones de factores de emisión acordes con las circunstancias nacionales. Para las actividades

agrícolas se consideró la extensión de la superficie sembrada, la superficie cultivada con leguminosas, con arroz, consumo de fertilizantes sintéticos nitrogenados y cantidad de residuo agrícolas generados y quemados en datos de volumen de producción de 114 cultivos que comprenden el 99% de la superficie cultivada del país.

Emisiones del Sector Agrícola

Los Inventarios de GEI reportados en las cinco Comunicaciones Nacionales han mostrado el incremento de las emisiones en el tiempo (Cuadro 2). Del Primer Inventario a la Primera Actualización en 1998 se mostró un incremento de 32%. Posteriormente los incrementos en las emisiones totales nacionales fueron de 6% en la actualización al 2002 (Tercera Comunicación Nacional), del 9% en la actualización al 2006 (Cuarta Comunicación Nacional) y de 5% en el 2010 (Quinta Comunicación Nacional). Sin embargo, en las últimas estimaciones reportadas en Primer Informe Bienal mostraron por primera vez una reducción de 11% en las emisiones con respecto a las reportadas en la Quinta Comunicación.

La mayor contribución a las emisiones nacionales proviene de las crecientes emisiones del sector energético (Figura 1) que han representado 47-67% (Cuadro 2). Después del sector energético, la categoría USCUS es que la más contribuye con las emisiones nacionales aunque ha mostrado una tendencia a reducir las emisiones de acuerdo con lo reportado en las cinco comunicaciones y en el Informe Bienal. De acuerdo con lo reportado en las primeras Cuatro

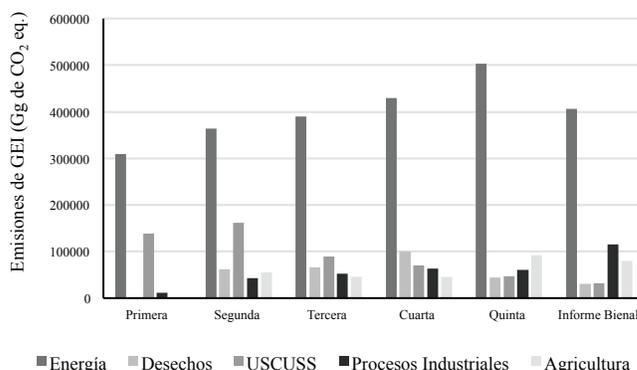


Figura 1. Emisiones nacionales de GEI en Gg de CO₂ eq. Se muestran los datos de las diferentes categorías reportadas de la Primera a la Quinta Comunicación.

Comunicaciones Nacionales la categoría Agricultura junto con la categoría Desechos son las que menos participación tuvieron en las emisiones nacionales, con estimaciones de 0.6, 8.1, 7, y 6.4% de las emisiones nacionales totales en los cuatro reportes. De acuerdo con la Primera, Tercera y Cuarta Comunicaciones, la agricultura fue la última causa de emisiones nacionales de GEI contribuyendo hasta con el 7% de las emisiones (Cuadro 2). De acuerdo con la Cuarta Comunicación en 2006 las emisiones de GEI en el sector agrícola fueron la última causa representando únicamente 6.4% de las emisiones nacionales totales. Sin embargo y de acuerdo con lo reportado en la actualización al 2010 (Quinta Comunicación) las actividades agrícolas pasaron de ser la sexta causa emisión de GEI en México a ser la segunda contribuyendo con el 12% a las emisiones nacionales (Figura 1, Cuadro 2). Estas diferencias se

Cuadro 2. Emisiones de GEI para México reportadas en las Comunicaciones Nacionales[†].

Comunicaciones nacionales	Emisiones por categoría										
	Emisiones totales	Gg (% de las emisiones nacionales totales)									
		Energía	Desechos	USCUS	Procesos Industriales	Agricultura					
Primera (1977)	460 988	308 584 (66.9)	526 (0.1)	138 251.333 (30.0)	11 621 (2.5)	2005 (0.6)					
Segunda (2001)	686 118	364 189 (46.6)	36 419.0 (9.0)	161 422 (23.5)	43 121 (6.3)	55 674 (8.1)					
Tercera (2006)	643 183	389 497 (61.0)	65 584 (10.0)	89 854 (14.0)	52 102 (8.0)	46 146 (7.0)					
Cuarta (2009)	709 005	430 097 (60.7)	99 627 (14.1)	70 202 (9.9)	63 526 (9.0)	45 552 (6.4)					
Quinta (2012)	748 252	503 817 (63.7)	44 130 (5.9)	46 892 (6.3)	61 226 (8.2)	92 184 (12.3)					
Informe bienal (2015)	665 304	406 858 (61.2)	30 902 (4.6)	32 424 (4.9)	114 949 (17.3)	80 169 (12.0)					

[†] Se muestran las emisiones nacionales totales expresadas en Gg de CO₂ eq y las emisiones de cada categoría en Gg. Las emisiones se expresan en Gg. Entre paréntesis se muestra la contribución de cada categoría a las emisiones nacionales expresada en porcentaje. En la columna Comunicaciones se muestra entre paréntesis el año de publicación de cada Comunicación y del Informe Bienal.

deben al uso de diferentes metodologías e insumos y no a una reactivación del sector agropecuario. De acuerdo con lo reportado en la última actualización del INEGI presentada en el Primer Informe Bienal la agricultura sigue siendo la segunda causa de emisiones con una contribución del 12%. Es probable que este incremento esté más relacionado con la intensificación de la agricultura que con la expansión de la misma, ya que las emisiones del sector USCUSS se redujeron 30.8% con respecto de las emisiones reportadas en la Quinta Comunicación Nacional.

Emisiones por Tipo de GEI en el Sector Agropecuario

En el sector agropecuario las emisiones de GEI son principalmente de CH_4 y N_2O , a diferencia de sectores como el energético y USCUSS en los cuales el CO_2 representa la mayor parte de las emisiones de GEI. Las emisiones de CH_4 están relacionadas con actividades pecuarias como la fermentación entérica y manejo de estiércol; mientras que las emisiones de N_2O , se derivan de actividades agrícolas como el manejo de suelos y el uso de fertilizantes (Cuadro 4). Consistentemente, las estimaciones de GEI reportadas en las cinco Comunicaciones Nacionales y en el Primer Informe Bienal han mostrado que el CH_4 es el gas GEI dominante en la categoría agricultura, y los reportes indican contribuciones entre 57 y 86%. En las primeras dos Comunicaciones las contribuciones del CH_4 y del N_2O fueron de 97 y 3%, respectivamente. En los Inventarios posteriores presentados en la Tercera y Cuarta Comunicación mostraron estimaciones mejoradas y modificaciones metodológicas que redujeron la sobreestimación de las emisiones de CH_4 (Cuadro 3). En la Primera Comunicación el uso de factores de emisión por defecto y de metodología Nivel 1 condujo a la sobreestimación de las emisiones de CH_4 . Las estimaciones mostradas en las cinco Comunicaciones han reportado mayores emisiones N_2O . En la Tercera y Cuarta Comunicaciones se reportó un incremento en la participación del N_2O del 15-26%.

Considerando la Cuarta y Quinta Comunicaciones, los datos por tipo de gas (Cuadro 3) son similares en el caso del CH_4 y del CO_2 , sin embargo en el caso del N_2O en 2006 (Cuarta Comunicación) representó el 2.9% de las emisiones nacionales mientras que en 2010 (Quinta Comunicación) la estimación se triplicó con una participación del 9.2%. La última actualización del INEGI al 2013 presentada en

el Primer Informe Bienal mostró estimaciones de N_2O 56% menores en comparación con lo reportado en la Quinta Comunicación Nacional (Cuadro 4). En este último Informe se reportó que la participación de las emisiones de CH_4 y N_2O en el sector agrícola fue de 68.1 y 31.4%, respectivamente.

Emisiones por Subcategoría en el Sector Agrícola

Los reportes de los inventarios han indicado consistentemente que la fermentación entérica es la actividad agropecuaria que más contribuye con las emisiones del sector agrícola con estimaciones que han fluctuado entre 41% (Quinta Comunicación) y 95% (Tercera Comunicación) (Cuadro 4). Las categorías que han tenido una menor contribución a las emisiones del sector agrícola son el cultivo de arroz (0.2-1.7%) y la quema *in situ* de residuos agrícolas (0.06-1.6%). En los primeros tres inventarios se reportó que el manejo del estiércol fue la segunda causa que generó las emisiones del sector agrícola (con una contribución que fluctuó entre 2.4 y 2.9%) mientras que las emisiones de los suelos agrícolas fue la tercera causa (0.3-1.5%).

En la actualización al 2006 se reportó que la mayor parte de las emisiones de la categoría agricultura fueron generadas por la fermentación entérica, mientras que los suelos agrícolas fueron la segunda causa representando el 15% de las emisiones. En contraste en 2010 se reportó que la mitad de las emisiones de las actividades agrícolas se produjeron en los suelos agrícolas mientras que la fermentación entérica representó el 41%. Este incremento se debió probablemente al uso de fertilizantes en los suelos cultivados. De acuerdo con las últimas estimaciones realizadas en el primer Informe Bienal la fermentación entérica es la primera causa de las emisiones (contribución del 63.8% a las emisiones de la categoría Agricultura), seguida del manejo del estiércol (17.1%), suelos agrícolas (16.6%), quema *in situ* de residuos agrícolas (1.6%), y los cultivos de arroz (0.2%). Con respecto a 1990 las emisiones derivadas del manejo de estiércol fueron 23.7% mayores comparadas con las emisiones del 2013 y son una fuente importante tanto de N_2O como de CH_4 .

Estimaciones globales de las emisiones de CO_2 en el sector agropecuario representan únicamente del 3 al 4.5% (Sauerbeck, 2001). En el caso de México las emisiones de CO_2 del sector Agricultura han sido reportadas únicamente en la Cuarta Comunicación

Cuadro 3. Emisiones de GEI para México reportadas en las Comunicaciones Nacionales[†].

Comunicaciones nacionales	Emisiones por tipo de gas							
	Gg (% de las emisiones nacionales totales)							
	CO ₂		CH ₄		N ₂ O		Otros	
Primera (1977)	444 488	(96.4)	3641.655	(0.79)	11.779	(0.002)	12 846	(2.6)
Segunda (2001)	514 048	(75.0)	157 648	(23.0)	14 222	(2.0)	n.r.	n.r.
Tercera (2006)	480 409	(74.0)	145 586	(23.0)	12 343	(2.0)	4485	
Cuarta (2009)	492 862	(69.5)	185 390	(26.1)	20 511	(2.9)	10 240	(1.4)
Quinta (2012)	493 450	(65.9)	166 716	(22.3)	69 140	(9.2)	19 215	n.r.
Informe bienal (2015)	499 701	(75.1)	126 164	(19.0)	30 097	(4.5)	9341.33	(1.4)

[†]Se muestran las emisiones nacionales totales por tipo de gas expresadas en Gg. Entre paréntesis se muestra la contribución de cada gas a las emisiones nacionales expresada en porcentaje. En la columna Comunicaciones se muestra entre paréntesis el año de publicación de cada Comunicación y del Informe Bienal.

y en el Primer Informe Bienal mostrando que las emisiones de este gas representan entre 0.5 y 7% de las emisiones generadas en el sector agrícola y 0.05% de las emisiones nacionales totales. Aunque las emisiones de CO₂ representan una parte muy pequeña de las emisiones nacionales, los efectos de estas emisiones reducen el carbono orgánico en el suelo, y la fertilidad y productividad de los suelos cultivados.

Emisiones de los Suelos por Degradación y Conversiones

Los inventarios nacionales de GEI realizados en México muestran que alrededor de un tercio de las emisiones provienen de los suelos minerales (de Jong

et al., 2010a), aunque en inventarios estatales, la cifra es de aproximadamente la mitad de las emisiones (de Jong *et al.*, 2010b)¹. En esta perspectiva, es crítico considerar las emisiones provenientes de las conversiones de bosques y selvas en sistemas agrícolas.

El Cuadro 5 muestra los almacenes de carbono orgánico del suelo (COS) en México para diferentes usos del suelo y vegetación (Paz, 2010)², de acuerdo a datos usados en el informe FAO FRA 2010 (CONAFOR, 2010).

Las estimaciones de las pérdidas de COS para las conversiones de bosques y selvas a agricultura fueron realizadas usando una densidad de 45.19 Mg ha⁻¹ del COS de uso agrícola a nivel nacional (Paz, 2010)². En el caso del paso de la sucesión primaria a la secundaria

Cuadro 4. Emisiones de GEI para México reportadas en las Comunicaciones Nacionales correspondientes a la categoría Agricultura[†].

Comunicaciones Nacionales	Emisiones por categoría									
	Gg (% de las emisiones nacionales totales)									
	Fermentación entérica		Suelos agrícolas		Manejo de estiércol		Cultivos de arroz		Quema <i>in situ</i> de residuos agrícolas	
Primera (1997)	1700.9	(84.8)	5.5	(0.3)	48.1	(2.4)	35.0	(1.7)	0.3	(0.5)
Segunda (2001)	1972.0	(84.2)	35.8	(1.5)	60.7	(2.6)	14.7	(0.6)	23.7	(1.0)
Tercera (2006)	1779.3	(95.3)	24.0	(1.3)	54.9	(2.9)	5.5	(0.3)	1.8	(0.1)
Cuarta (2009)	37 181	(81.6)	6 969.4	(15.3)	1175	(2.6)	178.5	(0.4)	48.3	(0.1)
Quinta (2012)	37 961.5	(41.2)	4 647.9	(50.4)	7 553.5	(8.2)	137.8	(0.15)	51.9	(0.06)
Informe bienal (2015)	51 208.1	(63.8)	13 298.6	(16.6)	13 735.5	(17.1)	217.2	(0.2)	1330	(1.6)

[†]Se muestran las emisiones nacionales totales de cada subcategoría expresadas en Gg. Entre paréntesis se muestra la contribución de cada subcategoría a la categoría Agricultura expresada en porcentaje. En la columna Comunicaciones se muestra entre paréntesis el año de publicación de cada Comunicación y del Informe Bienal.

¹ de Jong, B. H. J., F. Rojas, M. Olguín, V. de la Cruz, F. Paz, G. Jiménez y M. A. Castillo. 2010b. Establecimiento de una línea base de las emisiones actuales y futuras de gases de efecto invernadero provenientes de agricultura, silvicultura y otros usos del suelo. Informe final de consultoría para Conservación Internacional México A.C.

² Paz, F. 2010. Evaluación, importancia y perspectivas de la captura de carbono y la reducción de emisiones de gases efecto invernadero en pastizales y matorrales: Hacia la implementación de REDD+. pp. 7-22. In: M. E. Velasco, M. Salvador, M. L. Adriano, R.A. Perezgrovas y B. Sánchez (eds.). Memorias del I Congreso Internacional de Pastizales Chiapas 2010. SOMMAP. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.

Cuadro 5. Estimaciones del carbono orgánico en los suelos (Mg ha⁻¹) de México y los usos del suelo y la vegetación[†].

Uso del suelo y vegetación	Sucesión primaria	Conversión agrícola		Sucesión secundaria	Conversión agrícola		Pérdidas por degradación
		Pérdida a 20 años	Pérdida a 5 años		Pérdida a 20 años	Pérdida a 5 años	
Bosque de coníferas	90.5	45.3	37.8	71.1	25.9	21.6	19.4
Bosque de encino	68.8	23.6	19.6	54.0	8.9	7.4	14.7
Bosque mesófilo de montaña	138.8	93.6	78.0	109.1	63.9	53.2	29.7
Selva perennifolia	146.5	101.3	84.4	115.2	70.0	58.3	31.4
Selva subcaducifolia	99.0	53.8	44.8	77.8	32.6	27.2	21.2
Selva caducifolia	62.0	16.8	14.0	48.7	3.6	3.0	13.3
Selva espinosa	79.4	34.2	28.5	62.4	17.2	14.4	17.0
Vegetación hidrófila	95.4	50.2	41.9	75.0	29.8	24.8	20.4

[†]Adaptado de Paz, 2010².

(*sensu* INEGI), se utilizó una reducción del 78.6% estimada por Paz (2010)² de un análisis nacional. West *et al.* (2004) estimaron que las pérdidas de COS asociadas a la deforestación se presentan en un periodo de 20 años, donde en los primeros 5 años ocurre una pérdida del 83.3 %, valor que fue utilizado en las estimaciones del Cuadro 5.

Se observa del Cuadro 5 importantes pérdidas de COS de la conversión de bosques y selvas a agricultura, por lo que es necesario una alineación de las políticas forestales con las agrícolas para considerar elementos del ciclo de vida en las evaluaciones de las emisiones de GEI en México (Paz, 2015).

Perspectivas Futuras para el Mejoramiento de las Estimaciones

La limitación en la información y la inconsistencia de los sistemas de estadísticas del sector fueron los principales retos para la realización de los primeros inventarios de GEI. Estas limitaciones obligaban a usar el nivel 1 de la metodología revisada en 1996. En los Inventarios también se ha manifestado la necesidad de realizar estudios sobre factores de emisión en fuentes clave. Un factor de emisión es una relación entre la cantidad del gas emitido a la atmósfera y una unidad de actividad. Particularmente para el sector agropecuario faltan estudios acerca de las emisiones generadas por los distintos tipos de dieta del ganado y por el manejo del estiércol. Además de que se necesita información actualizada del tipo, dosis, costos y forma de aplicación de los fertilizantes sintéticos. En este sentido, en el Primer Informe Bienal se contó con información más

desagregada para cada categoría y se identificaron los huecos de información para poder contar con factores de emisión nacionales utilizando como fuente principal para los datos de actividad el SIACON del SIAP (SAGARPA) actualizado al 2012. Aunque se han hecho esfuerzos en la mayoría de los cálculos de GEI, los factores de emisión corresponden a los publicados en las directrices metodológicas del IPCC 1996 y la guía de buenas prácticas del 2000. El uso de factores de emisión por defecto estimadas por el PICC no necesariamente se ajustan a las emisiones nacionales. Por ejemplo en el cálculo de emisiones directas por escorrentía o lixiviación de nitrógeno incorporado en suelos agrícolas se tomó el factor de emisión correspondiente de las directrices metodológicas IPCC (2006) de 0.0075 kg N₂O-N kg⁻¹ N. Sin embargo hay estudios que muestran que la lixiviación podría ser mayor, sobre todo en el norte de México en donde se ha probado que estos escurrimientos afectan directamente a los ecosistemas costeros (Beman *et al.*, 2005). Si el manejo del estiércol o la lixiviación de nitrógeno incorporado en suelos agrícolas son más intensos en México que en Estados Unidos (de donde provienen la mayor parte de los factores de emisión) las emisiones de CH₄ y N₂O podrían ser subestimadas.

Otro ejemplo de ello son las emisiones de N₂O proveniente de suelos fertilizados con nitrógeno sintético. Actualmente el Inventario de GEI en México utiliza un cálculo multiplicando el N utilizado en los fertilizantes por 1% para estimar las emisiones directas de N₂O de los fertilizantes. Utilizando herramientas de modelación y diagnóstico como en el caso del Índice de Nitrógeno (Saynes *et al.*, 2014)

se estimaron las emisiones de N_2O de suelos agrícolas y fueron significativamente correlacionadas con las mediciones medidas de N_2O-N en diferentes tipos de cultivos, dosis de fertilización y sitios. Cuando se aplicó la metodología utilizada por México y se multiplicó utilizando el factor de emisión del 1% y se comparó con las estimaciones de N_2O-N de cada sitio la correlación fue mucho más baja ($r^2 = 0.18$) en comparación con la correlación obtenida con el Índice de Nitrógeno ($r^2 = 0.67$) (Figura 2). Este estudio sugiere que el Inventario de GEI en México para el caso de la agricultura está subestimando las emisiones de N_2O ya que las emisiones medidas en campo fueron de $5.3 \text{ kg } N_2O-N \text{ ha}^{-1}$ las cuales no fueron significativamente diferentes de $4.7 \text{ kg } N_2O-N \text{ ha}^{-1}$ estimadas por el Índice de Nitrógeno ($P < 0.70$). Sin embargo las estimaciones de $5.3 \text{ kg } N_2O-N \text{ ha}^{-1}$ fueron significativamente mayores en comparación con el uso del factor del 1% con $2 \text{ kg } N_2O-N \text{ ha}^{-1}$ lo que sugiere una subestimación del 50% en las emisiones de N_2O . Esta subestimación es muy importante porque las emisiones del sector agrícola son la segunda causa de emisiones nacionales y podrían ser mayores.

En general, a lo largo de las diferentes Comunicaciones se han expresado vacíos de conocimiento y necesidades que deben atenderse con el fin de reducir la incertidumbre de los cálculos. Entre estas necesidades se incluyen:

- La formación de redes de investigación y que cada vez las investigaciones sean más multidisciplinarias.
- La construcción de bases de datos y mejoras en las estadísticas y de los portales de información.
- Fortalecer el área de investigación para el uso de modelos y escenarios regionales y locales.

- Comenzar a llenar vacíos de información que fueron detectados mediante ejercicios de diagnóstico como la observación y formación de escenarios, impactos, vulnerabilidad y adaptación, mitigación y estudios jurídicos.
- Se debe seguir trabajando en la generación de factores de emisión propios. Urge también una comunicación más articulada entre investigadores y tomadores de decisiones para incorporar el conocimiento científico en los inventarios.
- Cabe señalar el gran esfuerzo realizado para aumentar la eficiencia en la recopilación y el procesamiento de la información con el objetivo de realizar los Informes Bienales. Parte de las mejoras incluye la creación de una plataforma para conjuntar bases de datos para el desarrollo de los inventarios.

Estudios de Emisiones de GEI del Sector Agrícola

Se encontraron 69 trabajos considerando artículos arbitrados por pares y literatura gris. De estos 46 fueron estudios de mediciones directas realizadas en campo y laboratorio, 10 fueron estudios donde utilizaron algún enfoque de modelación y 10 fueron estudios enfocados en la realización de inventarios.

Inventarios. Además de los inventarios nacionales reportados en las Comunicaciones Nacionales existen ejemplos de inventarios estatales de emisiones de GEI en el sector agricultura, reportados en publicaciones arbitradas por pares. Tal es el caso del primer inventario de GEI para Morelos (Quiroz-Castañeda *et al.*, 2013) en el cual se reporta que la agricultura es la cuarta causa de emisiones de GEI. Se han reportado también esfuerzos similares en el caso del Estado de Puebla en

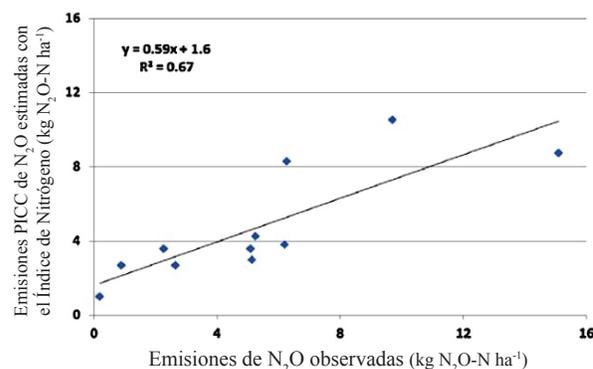
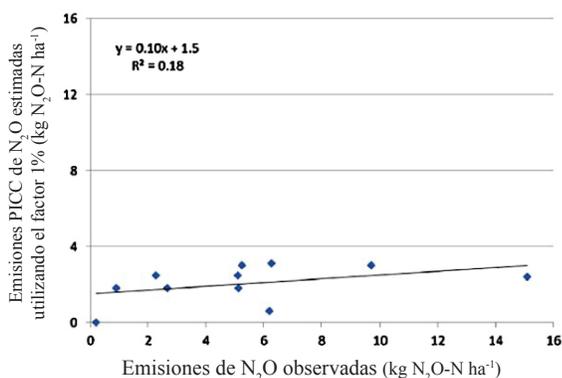


Figura 2. Cálculo de las emisiones de N_2O derivadas de suelos agrícolas fertilizados utilizando el factor de 1% propuesto por el IPCC y comparado con el uso del Índice de Nitrógeno. Tomado de Saynes *et al.* (2014).

donde se estimaron emisiones de N_2O en 14 municipios de Puebla (Saldaña-Munive *et al.*, 2015). En el Estado de México se utilizó un modelo de emisión - captura de gases de efecto invernadero (Valdez *et al.*, 2015) para calcular las emisiones de N_2O y CH_4 de la fermentación entérica y residuos agrícolas. Hay otros esfuerzos realizados en Baja California, y otras regiones del norte de México.

Otros estudios utilizaron imágenes de satélite y modelos para la estimación de la emisión de GEI, y del efecto de las prácticas de manejo en las emisiones de GEI. Algunos ejemplos son el Análisis de Ciclo de Vida para discretizar los procesos de producción y las emisiones de GEI derivadas de los mismos, en este caso para cultivos del Estado de Sonora (Yépez *et al.*, 2014). Lozada *et al.* (2010) utilizaron el modelo Long Range Energy Alternative Planning System (LEAP) para estimar las emisiones de cultivos destinados a la producción de biocombustibles. Otras investigaciones han utilizado modelos como el NLOSS (Christensen *et al.*, 2006) y el Índice de Nitrógeno (Saynes *et al.*, 2014) para estimar la circulación de nitrógeno en los sistemas agrícolas y las emisiones derivadas del uso de fertilizantes. Ahrens *et al.* (2010) utilizaron el Water and Nitrogen Management Model para determinar las mejores prácticas de manejo que permitieran identificar el mejor momento y dosis de fertilizante nitrogenado que redujera costos y emisiones de GEI pero incrementara el rendimiento de los cultivos.

Estudios de mediciones directas en campo y en laboratorio. Las investigaciones reportadas en publicaciones arbitradas por pares abordan el monitoreo y medición de GEI con diferentes objetivos. Hay estudios que investigan aspectos básicos del ciclo del N y las emisiones de N_2O (Panek *et al.*, 2000; González-Méndez, 2007; Ramírez-Villanueva, 2012). Se han documentado los efectos del establecimiento de diferentes tipos de manejo como la labranza tradicional en comparación con la labranza de conservación. Dendooven *et al.* (2012a; 2012b) encontraron que los diferentes tipos de labranza tuvieron pocos efectos en las emisiones de GEI, pero tuvieron efectos significativos en el almacenamiento de carbono en los suelos. En contraste, Patiño-Zúñiga *et al.* (2009) reportaron reducción de emisiones de GEI en sistemas con labranza reducida como las camas permanentes en comparación con el establecimiento de camas tradicionales lo que incrementa las emisiones de GEI. Otros estudios han

documentado que la adición de ciertos residuos como el biocarbono puede reducir las emisiones de N_2O en sistemas cultivados (Aguilar-Chávez *et al.*, 2012) y los efectos de la adición de residuos de *Jatropha* (Ruiz-Valdiviezo *et al.*, 2010).

También se han documentado los efectos de la adición de diferentes tipos de fertilizantes (Angoa *et al.*, 2014; Mora-Ravelo *et al.*, 2005; Trujillo-Tapia *et al.*, 2008; Grajeda-Cabrera *et al.*, 2011; Serrano-Silva *et al.*, 2011) y han encontrado que las emisiones de N_2O y de CO_2 incrementaron en los suelos adicionados con fertilizantes orgánicos en comparación con los fertilizantes sintéticos como la urea (Fernández-Luqueño *et al.*, 2009). También se ha documentado que la adición de aguas residuales a los suelos puede incrementar las emisiones de GEI (Fernández-Luqueño *et al.*, 2010; Díaz-Rojas *et al.*, 2014). Por otro lado, Astier *et al.* (2014) han documentado que no encontraron diferencias significativas en las emisiones de GEI cuando se comparó la agricultura orgánica con la agricultura convencional en cultivos de aguacate. También se han estudiado las emisiones de N_2O de cultivos y la transferencia de N desde los cultivos hacia el mar (Ahrens *et al.*, 2008), y en el agua superficial (Flores-López *et al.*, 2012). Otros estudios se enfocaron en investigar los factores que contribuyen a mejorar la eficiencia en el uso del N y reducir emisiones de N_2O (Ahrens *et al.*, 2010).

También se ha estudiado el efecto de la cobertura vegetal (Saldaña-Munive *et al.*, 2014) y hay varias investigaciones en suelos de chinampas (Márquez-Rentería, 2009; Ikkonen *et al.*, 2012; Ortíz-Cornejo *et al.*, 2015).

CONCLUSIONES

- De acuerdo con las estimaciones más actuales las actividades agropecuarias son la segunda causa de generación de emisiones de GEI con una contribución del 12% a las emisiones nacionales. Dentro de esta categoría la mayor parte de las emisiones se generan por el manejo del estiércol y por el uso de fertilizantes en los suelos agrícolas. Las implicaciones del incremento en las emisiones de GEI en el sector agrícola son importantes en términos de contribución al calentamiento global pero también en términos de potencial de mitigación. Las emisiones de GEI derivadas del manejo del estiércol y del uso de

fertilizantes en suelos agrícolas son de CH₄ y N₂O. Es imperativa la planeación y ejecución de políticas públicas para reducir las emisiones de estos gases ya que están dentro de los llamados gases “no-CO₂” con un poder de calentamiento que en el caso del CH₄ es 28 veces mayor comparado con el CO₂ y 265 veces mayor en el caso del N₂O. Además de su poder de calentamiento una vez que estos gases son emitidos se quedan en la atmósfera de 9 a 15 años en el caso del CH₄ y 120 años en el caso del N₂O. El sector agropecuario tiene un gran potencial de mitigación de estos gases GEI si se implementan buenas prácticas de manejo.

- Aunque el CO₂ no tiene una participación importante en términos de emisiones ya que representa el 0.5% de las emisiones de la categoría agricultura, esta pérdida de carbono en forma de CO₂ si puede tener efectos significativos en la fertilidad y productividad de los suelos agrícolas,

- El incremento de estas emisiones del sector agrícola no significa necesariamente una reactivación de este sector, ni un incremento en la seguridad alimentaria ya que se siguen importando granos básicos. Es un indicador del incremento en la actividad ganadera y del manejo intensivo no sostenible de los suelos agrícolas y del estiércol.

- Los esfuerzos de mitigación del sector agropecuario deberían orientarse a la reducción de emisiones de la actividad ganadera, el manejo de los suelos agrícolas y del estiércol.

- En los inventarios de GEI se ha manifestado la falta de estudios científicos para mejorar los factores de emisión de fuentes clave. En la revisión realizada se encontró que si hay información. Sin embargo se encuentra dispersa y falta realizar trabajos de síntesis y recopilación permanente. Esto permitiría mejorar los factores de emisión y la reducción paulatina de la incertidumbre en las estimaciones. La síntesis y generación de información sobre todo de mediciones directas en el campo permitiría también la calibración de modelos para una mejor estimación de las emisiones del campo mexicano.

LITERATURA CITADA

Aguilar-Chávez, A., M. Díaz-Rojas., M. R. Cárdenas-Aquino, L. Dendooven, and M. Luna-Guido. 2012. Greenhouse gas emissions from a wastewater sludge-amended soil cultivated with wheat (*Triticum* spp. L.) as affected by different application rates of charcoal. *Soil Biol. Biochem.* 52: 90-95.

- Ahrens, T. D., D. B. Lobell, J. I. Ortiz-Monasterio, Y. Li, and P. A. Matson. 2010. Narrowing the agronomic yield gap with improved nitrogen use efficiency: a modeling approach. *Ecol. App.* 20: 91-100.
- Ahrens, T. D., J. M. Beman, J. A. Harrison, P. K. Jewett, and P. A. Matson. 2008. A synthesis of nitrogen transformations and transfers from land to the sea in the Yaqui Valley agricultural region of northwest Mexico. *Water Resour. Res.* 44: 1-13.
- Angoa-Pérez, M. V., J. Gonzalez-Castañeda, J. T. Frías-Hernández, O. Franco-Hernández, O. Van Cleemput, L. Dendooven, and V. Olalde. 2014. Trace gas emissions from soil of the central highlands of Mexico as affected by natural vegetation: A laboratory study. *Biol. Fertil. Soils.* 40: 252-259.
- Astier, M., Y. Merlin-Urbe, L. Villamil-Echeverri, A. Garciarreal, M. E. Gavito, and O. R. Masera. 2014. Energy balance and greenhouse gas emissions in organic and conventional avocado orchards in Mexico. *Ecol. Indic.* 43:281-287.
- Baumert, K., T. Herzog, and J. Pershing. 2005. Navigating the Numbers. *Greenhouse Gas Data and International Climate Policy.* World Resources Institute. USA.
- Beman, J. M., K. R. Arrigo, and P. A. Matson. 2005. Agricultural runoff fuels large phytoplankton blooms in vulnerable areas of the ocean. *Nature* 434: 211-214.
- Bousquet, P., P. Ciais, J. B. Miller, E. J. Dlugokencky, D. A. Hauglustaine, C. Prigent, G. R. Van der Werf, P. Peylin, E. G. Brunke, C. Carouge, R. L. Langenfelds, J. Lathière, F. Papa, M. Ramonet, M. Schmidt, L. P. Steele, S. C. Tyler, and J. White. 2006. Contribution of anthropogenic and natural sources to atmospheric methane variability. *Nature* 443, 439-443.
- Cardinale, B. J., J. E. Duffy, A. Gonzalez, D. U. Hooper, C. Perrings, P. Venail, A. Narwani, G. M. Mace, D. Tilman, D. A. Wardle, A. P. Kinzig, G. C. Daily, M. Loreau, J. B. Grace, A. Larigauderie, D. S. Srivastava, and S. Naeem. 2012. Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature* 486: 59-67.
- Christensen, L., W. J. Riley, and I. Ortiz-Monasterio. 2006. Nitrogen cycling in an irrigated wheat system in Sonora, Mexico: measurements and modeling. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 75: 175-186.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2010. Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales 2010, Informe Nacional México. FAO. Roma.
- de Jong, B., C. Anaya, O. Masera, M. Olguin, F. Paz, J. Etchevers, R. Martinez, G. Guerrero, and C. Balbontin. 2010a. Greenhouse gas emissions between 1993 and 2002 from land-use change and forestry in Mexico. *For. Ecol. Manage.* 260: 1689-1701.
- Delgado, J. and R. F. Follet. 2010. Advances in nitrogen management for water quality. *Soil and water conservation society.* Ankeny, IA, USA.
- Dendooven, L., L. Patiño-Zúñiga, N. Verhulst, M. Luna-Guido, R. Marsch, and B. Govaerts. 2012a. Global warming potential of agricultural systems with contrasting tillage and residue management in the central highlands of Mexico. *Agr. Ecosyst. Environ.* 152: 50-58.
- Dendooven, L., V. F. Gutiérrez-Oliva, L. Patiño-Zúñiga, D. A. Ramírez-Villanueva, N. Verhulst, M. Luna-Guido, R. Marsch, J. Montes-Molina, F. A. Gutiérrez-Miceli, S. Vásquez-Murrieta, and B. Govaerts. 2012b. Greenhouse gas emissions under conservation agriculture compared to traditional

- cultivation of maize in the central highlands of Mexico. *Sci. Total Environ.* 431: 237-244.
- Denman, K. L., G. Brasseur, A. Chidthaisong, P. Ciais, P. M. Cox, R. E. Dickinson, D. Hauglustaine, C. Heinze, E. Holland, D. Jacob, U. Lohmann, S. Ramachandran, P. L. da Silva Dias, S. C. Wofsy, and X. Zhang. 2007. Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry. pp. 499-587. *In*: S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, and H. L. Miller (eds.). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Díaz-Rojas, M., A. Aguilar-Chávez, M. R. Cárdenas-Aquino, V. M. Ruíz-Valdiviezo, E. Hernández-Valdez, M. Luna-Guido, V. Olalde-Portugal, and L. Dendooven. 2014. Effects of wastewater sludge, urea and charcoal on greenhouse gas emissions in pots planted with wheat. *App. Soil Ecol.* 73:19-25.
- FAOSTAT (The Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database). 2014. <http://faostat3.fao.org/home/E>. 2014. (Consulta: junio 10, 2015).
- Field, C. B. and M. R. Raupach. 2004. The global carbon cycle. Integrating humans, climate, and the natural world. Island Press. Washington, DC, USA.
- Erisman, J. W., M. A. Sutton, J. Galloway, Z. Klimont, and W. Winiwarter. 2008. How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature Geosci.* 1: 636-639.
- Fernández-Luqueño, F., V. Reyes-Varela, C. Martínez-Suárez, E. E. Reynoso-Keller, J. Méndez-Bautista, E. Ruíz-Romero, F. López-Valdez, M. L. Luna-Guido, and L. Dendooven. 2009. Emissions of CO₂ and N₂O from soil cultivated with common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) fertilized with different N sources. *Sci. Total Environ.* 407: 4289-4296.
- Fernández-Luqueño, F., V. Reyes-Varela, F. Cervantes-Santiago, C. Gómez-Juárez, A. Santillán-Arias, and L. Dendooven. 2010. Emissions of carbon dioxide, methane and nitrous oxide from soil receiving urban wastewater for maize (*Zea mays* L.) cultivation. *Plant Soil* 331: 203-215.
- Flores-López, H. E., C. Mora-Orozco, Á. A. Chávez-Durán, J. A. Ruiz-Corral, H. Ramírez-Vega, and V. O. Fuentes Hernández. 2012. Nonpoint pollution caused by the agriculture and livestock activities on surface water in the highlands of Jalisco, Mexico. *In*: V. Abrol y P. Sharma. (eds.). *Agricultural and biological sciences: Resource management for sustainable agriculture.* DOI: 10.5772/51203. Available from: <http://www.intechopen.com/books/resource-management-for-sustainable-agriculture/nonpoint-pollution-caused-by-the-agriculture-and-livestock-activities-on-surface-water-in-the-highla>.
- Flückiger, J. T. Blunier, B. Stauffer, J. Chappellaz, R. Spahni, K. Kawamura, J. Schwander, T. F. Stocker, and D. Dahl-Jensen. 2004. N₂O and CH₄ variations during the last glacial epoch: insight into global processes. *Glob. Biochem. Cycles* 18.
- Foley, J. A., N. Ramankutty, K. A. Brauman, E. S. Cassidy, J. S. Gerber, M. Johnston, N. D. Mueller, C. O'Connell, D. K. Ray, P. C. West, C. Balzer, E. M. Bennett, S. R. Carpenter, J. Hill, C. Monfreda, S. Polasky, J. Rockström, J. Sheehan, S. Siebert, D. Tilman, and D. P. M. Zaks. 2011. Solutions for a cultivated planet. 2011. *Nature* 478: 337-342.
- Galloway, J. N., J. D. Aber, J. W. Erisman, S. P. Seitzinger, R. H. Howarth, E. B. Cowling, and B. J. Cosby 2003. The nitrogen cascade. *BioScience* 53: 341-356.
- Gleick, P. H., H. Cooley, and M. Morikawa. 2010. The world's water 2008-2009: The biennial report on freshwater resources. Island Press. Washington, DC, USA.
- Ikkonen, E., N. E. García-Calderón, E. Stephan-Otto, and A. Martínez-Arroyo. 2012. Gas diffusivity in chinampas soils in Mexico City. *Span. J. Soil Sci.* 2: 13-19.
- INE-SEMARNAT (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2012. Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. INE/SEMARNAT, México, D. F.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. Core Writing Team, R. K. Pachauri, and A. Reisinger (eds.). IPCC, Geneva, Switzerland.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2013. Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Stocker, T. F., D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P.M. Midgley (eds.). Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- Lal, R. 1999. Soil management and restoration for C sequestration to mitigate the accelerated greenhouse effect. *Prog. Env. Sci.* 1: 307-326.
- Lal, R. 2003. Offsetting global CO₂ emissions by restoration of degraded soils and intensification of world agriculture and forestry. *Land Degrad. Develop.* 14: 309-322.
- Lal, R. 2004. Agricultural activities and the global carbon cycle. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 70: 103-116.
- Lozada, I., J. Islas, and G. Grande. 2010. Environmental and economic feasibility of palm oil biodiesel in the Mexican transportation sector. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 14: 486-492.
- Montzka, S. A., E. J. Dlugokencky, and J. H. Butler. 2011. Non-CO₂ greenhouse gases and climate change. *Nature* 476: 43-50.
- Mora-Ravelo, S. G., M. Sandoval-Villa, F. Gavi-Reyes, and P. Sánchez-García. 2005. Emisión de N₂O con fertilización nitrogenada en fertirriego y fertilización convencional. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 21: 2329.
- Pan, Y., R. A. Birdsey, J. Fang, R. Houghton, P. E. Kauppi, W. A. Kurz, O. L. Phillips, A. Shvidenko, S. L. Lewis, J. G. Canadell, P. Ciais, R. B. Jackson, S. W. Pacala, A. D. Maguire, S. Piao, A. Rautiainen, S. Sitch, and D. Hayes 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science* 333: 988-993.
- Panek, J. A., P. A. Matson, I. Ortíz-Monasterio, and P. Brooks. 2000. Distinguishing nitrification and denitrification sources of N₂O in a Mexican wheat system using ¹⁵N. *Ecol. App.* 10: 506-514.
- Patiño-Zúñiga, L., J. A. Ceja-Navarro, B. Govaerts, M. Luna-Guido, K. D. Sayre, and L. Dendooven. 2009. The effect of different tillage and residue management practices on soil characteristics, inorganic N dynamics and emissions of N₂O, CO₂ and CH₄ in the central highlands of Mexico: A laboratory study. *Plant Soil.* 314: 231-241.

- Paustian, K., C. V. Cole, D. Sauerbeck, and N. Sampson. 1998. CO₂ mitigation by agriculture: An overview. *Climatic Change* 40: 135-162.
- Paustian, K., J. Six, E. T. Elliott, and H. W. Hunt. 2000. Management options for reducing CO₂ emissions from agricultural soils. *Biogeochemistry* 48: 147-163.
- Paz, F. 2015. Servicios ambientales integrales del bosque: carbono, agua y biodiversidad – más allá de REDD+. pp. 173-197. *In*: A. A. Villavicencio (ed.). Los pagos por servicios ambientales: Intercambio de experiencias de la Red Iberoamericana de PSA. El Colegio de Michoacán. Zamora, Michoacán.
- Power, A. G. 2010. Ecosystem services and agriculture: tradeoffs and synergies. *Pill. Trans. R. Soc. B.* 365: 2959-2971.
- Quiroz-Castañeda, R. E., E. Sánchez-Salinas, M. L. Castrejón-Godínez, and M. L. Ortiz-Hernández. 2013. Greenhouse gas emissions in the state of Morelos, Mexico: A first approximation for establishing mitigation strategies. *J. Air Waste Manage.* 63: 1298-1312.
- Robertson, P. 2004. Abatement of nitrous oxide, methane, and other non-CO₂ greenhouse gases: The need for a system approach. pp. 493-506. *In*: C. R. Field and M. R. Raupach. (eds.). *The Global Carbon Cycle Integrating Humans, Climate, and the Nature World.* Scope 62. Island Press. Washington, DC, USA.
- Ruiz-Valdiviezo, V. M., M. Luna-Guido, A. Galzy, F. A. Gutiérrez-Miceli, and L. Dendooven. 2010. Greenhouse gas emissions and C and N mineralization in soils of Chiapas (México) amended with leaves of *Jatropha curcas* L. *Appl. Soil Ecol.* 46: 17-25.
- Saldaña-Munive, J. A., L. G. Ruiz-Suárez y J. A. Ticante-Roldán. 2014. Emisiones de óxido nitroso en suelos con diferente cobertura vegetal en Coatzacoalcos, Ver., México. *Rev. Iberoame. Cienc.* 2334-2501.
- Saldaña-Munive, J. A., A. Lozada-Carrera, M. A. Valera-Pérez y E. M. Otazo-Sánchez. 2015. Emisiones de N₂O estimadas mediante la evaluación rápida de fuentes de contaminación ambiental. *Rev. Iberoame. Cienc.* 2: 79-94.
- Sauerbeck, D. R. 2001. CO₂ emissions and C sequestration by agriculture—perspectives and limitations. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 60: 253-266.
- Saynes, V., J. A. Delgado, C. Tebbe, J. D. Etchevers, D. Lapidus, and A. Otero-Arnaiz. 2014. Use of the new nitrogen index tier zero to assess the effects of nitrogen fertilizer on N₂O emissions from cropping systems in Mexico. *Ecol. Eng.* 73: 778-785.
- Serrano-Silva, N., M. Luna-Guido, F. Fernández-Luqueño, R. Marsch, and L. Dendooven. 2011. Emission of greenhouse gases from an agricultural soil amended with urea: A laboratory study. *Appl. Soil Ecol.* 47: 92-97.
- SIAP (Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera). Atlas agroalimentario 2014. SIAP/SAGARPA. México, D. F.
- Six, J., E. T. Elliott, and K. Paustian. 1999. Aggregate and Soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 1350-1358.
- Six J, E. T. Elliott, and K. Paustian. 2000. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biol. Biochem.* 32: 2099-2103.
- Six, J., R. T. Conant, E. A. Paul, and K. Paustian. 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant Soil* 241: 155-176.
- Snyder, C. S., T. W. Bruulsema, T. L. Jensen, and P. E. Fixen. 2009. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agric. Ecosyst. Environ.* 133: 247-266.
- Sutton, M. 2011. Too much of a good thing. *Nature* 472: 159-161.
- Trujillo-Tapia, N., C. Cruz-Mondragón, M. S. Vásquez-Murrieta, O. Van-Cleemput, and L. Dendooven. 2008. Inorganic N dynamics and N₂O production from tannery effluents irrigated soil under different water regimes and fertilizer application rates: A laboratory study. *Appl. Soil Ecol.* 38: 279-288.
- Weathers, K. C., D. L. Strayer, and G. E. Likens. 2013. *Fundamentals of ecosystem science.* Elsevier. San Diego, CA, USA.
- West, T. O., G. Marland, A. W. King, W. M. Post, A. K. Jain, and K. Andrasko. 2004. Carbon management response curves: estimates of temporal soil carbon dynamics. *Environ. Manage.* 33: 507-518.