

# EL USO DE LA CROMATOGRAFÍA DE GASES EN INVESTIGACIONES DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO DEL SECTOR PECUARIO

## THE USE OF GAS CHROMATOGRAPHY IN GREENHOUSE GAS EMISSION RESEARCH IN THE LIVESTOCK SECTOR

Saynes-Santillan, V.<sup>1</sup>; Ramírez-Briebesca, E.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5. Montecillo, Texcoco, Estado de México. C. P. 56230.

\*Autor de correspondencia: vinisa.saynes@colpos.mx

---

### RESUMEN

Las actividades agropecuarias proveen funciones alimentarias, económicas y sociales de vital importancia para el ser humano, aunque también deterioran los suelos, el agua y la biodiversidad, y contribuyen al cambio climático por los gases de efecto invernadero (GEI) producidos en diferentes etapas de la cadena productiva. En México las actividades pecuarias ocupan más de la mitad del territorio, por lo cual es importante medir y monitorear las emisiones de este sector. La cromatografía de gases es una herramienta útil para cuantificar las emisiones de GEI. Este trabajo se enfoca en mostrar la importancia de esta herramienta en la determinación de las emisiones de GEI en diferentes etapas de la producción pecuaria. El uso de la CG en estudios de emisiones puede reducir la incertidumbre al contribuir a mejorar los factores de emisión en el sector pecuario. La implementación de esta metodología requiere la formación de grupos de trabajo que coadyuve al fortalecimiento de capacidades, a la obtención de fondos para mejorar la infraestructura de laboratorios y a la construcción de sinergia entre cuerpos académicos, el sector privado y el gobierno.

**Palabras clave:** Cambio climático, ganadería, GEI, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, cromatografía, CG.

### ABSTRACT

Agricultural and livestock activities provide food, economic and social functions of crucial importance for human development, but they also deteriorate soils, water and biodiversity, and contribute to climate change by greenhouse gases (GHG) produced at different stages of the production chain. In Mexico, livestock activities occupy more than half of the territory, so it is important to measure and monitor the emissions of this sector. Gas chromatography is a useful tool for quantifying GHG emissions. The focus of this work is on showing the importance of this tool in the determination of GHG emissions in different stages of livestock production. The use of GC in emissions studies can reduce the uncertainty by improving emission factors in the livestock sector. The implementation of this methodology requires the formation of working groups that contribute to strengthening skills, obtaining funds to improve the infrastructure of laboratories, and constructing synergy between academic, private and governmental groups.

**Keywords:** Climate change, livestock production, GHG, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, chromatography, GC.

## INTRODUCCIÓN

**Los gases** de efecto invernadero (GEI) emitidos por las actividades antropogénicas a nivel mundial son principalmente dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) y óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Aunque las actividades del sector agropecuario son la cuarta causa de emisiones antropogénicas de GEI, éste sector emite grandes cantidades de los llamados gases que no son  $\text{CO}_2$  (Montzka *et al.*, 2011) como el  $\text{N}_2\text{O}$  y el  $\text{CH}_4$  los cuales tienen un poder de calentamiento 265 y 28 veces mayor respectivamente en comparación con el  $\text{CO}_2$  (IPCC, 2013). Por su poder de calentamiento, pequeños cambios en la concentración de estos gases en la atmósfera pueden contribuir significativamente al calentamiento global en comparación con cambios similares en flujos de  $\text{CO}_2$  (Robertson, 2004). Por esta razón, es importante medir y monitorear las emisiones del sector agropecuario, ya que la remoción de gases como el  $\text{N}_2\text{O}$  de la atmósfera podría tener un impacto 300 veces mayor que remover la misma masa de  $\text{CO}_2$  (Robertson, 2004). Adicionalmente, si no se intensifican los esfuerzos de mitigación de estos gases, las emisiones de GEI del sector pecuario podrían neutralizar los esfuerzos de mitigación y de captura de carbono de otros sectores (Riple *et al.*, 2014).

### Emisiones de GEI en el sector pecuario a nivel global

El sector pecuario provee funciones alimentarias, económicas y sociales de alto valor en nuestras sociedades, pero utiliza y deteriora parte importante de los recursos naturales. Se estima que 20 mil millones de animales vinculados a las actividades pecuarias utilizan 30 % de la superficie terrestre para el pastoreo, una tercera parte de la superficie agrícola se utiliza en la producción de su alimentación y 32 % del agua dulce la utilizan directamente 1.3 billones de productores y comerciantes (Thornton, 2010). Además de impactar negativamente los suelos, el agua y la biodiversidad, las actividades del sector pecuario también tienen un papel fundamental en el cambio climático por los GEI producidos en diferentes etapas de la cadena productiva. Las actividades ganaderas representan 14.5 % de las emisiones antropogénicas mundiales (Gerber *et al.*, 2013). La mayor parte de estas emisiones corresponden al  $\text{CH}_4$  (44 %), mientras que las emisiones de  $\text{N}_2\text{O}$  contribuyen con 29 % y el  $\text{CO}_2$  con 27 % (Gerber *et al.*, 2013). La fermentación entérica del ganado vacuno contribuye con 39 % a las emisiones globales del sector pecuario, seguidas del 16 % proveniente del  $\text{N}_2\text{O}$  emitido con la aplicación de fertilizantes a cultivos forrajeros y 13 % correspondiente a emisiones de  $\text{CO}_2$  generadas durante la producción del alimento para ganado (Gerber *et al.*, 2013).

### Emisiones de GEI en el sector pecuario en México

En México la ganadería es una actividad esencial en la economía, pues representa 32 % del PIB agropecuario (en 2013), y emplea 10.1 % de la población económicamente activa (2012) de este sector (Banxico, 2014; INEGI, 2014; SAGARPA). Las actividades pecuarias ocupan 56 % del territorio nacional generando deterioro ambiental y aportando entre un 7 y 64 % a las emisiones nacionales totales y del sector agropecuario, respectivamente (INECC, 2015). En el sector agropecuario mexicano las emisiones de  $\text{CH}_4$  se generan fundamentalmente mediante fermentación entérica, produciendo la mayoría de las emisiones de este sector contribuyendo con ~63 % al total de las

emisiones de las actividades agropecuarias. Las emisiones de  $\text{N}_2\text{O}$  se derivan del uso de fertilizantes nitrogenados y contribuyen con ~31 % a las emisiones del sector agropecuario.

### ¿Cuál es la importancia de medir de forma directa las emisiones de GEI?

La medición directa de las emisiones del sector pecuario es relevante porque: 1) son la tercera causa a nivel nacional, pero dentro del sector la mayoría de las emisiones provienen de las actividades pecuarias, fundamentalmente de la fermentación entérica; 2) las actividades pecuarias ocupan más de la mitad del territorio, y sería adecuado monitorear las consecuencias ambientales de este enfoque extensivo, sobre todo en términos de emisiones de GEI; 3) la fermentación entérica es la causa principal de las emisiones pecuarias, pero se le debe prestar más atención a las emisiones generadas en toda la cadena de producción, incluyendo aquellas emisiones producidas por el estiércol y su manejo; 4) es necesario fortalecer e idear nuevas estrategias de mitigación en el sector pecuario, y para ello el primer paso es la medición de las emisiones. Posteriormente se pueden utilizar modelos y herramientas web pero es necesario obtener datos para su calibración.

Para medir, monitorear y modelar las emisiones del sector pecuario es necesario realizar mediciones directas de las emisiones generadas en diferentes etapas de la producción ganadera. Una herramienta para lograrlo es la colecta de muestras in situ y su posterior análisis mediante cromatografía de gases (CG). El presente trabajo se enfoca en mostrar la importancia de esta herramienta

en la determinación de las emisiones de GEI en diferentes etapas de la producción pecuaria. La medición de las emisiones asociadas a la ganadería tiene altas incertidumbres por la falta de esquemas integrados en su determinación (Gerber *et al.*, 2013). El uso de la CG en estudios de emisiones puede reducir la incertidumbre al contribuir a mejorar los factores de emisión en el sector pecuario. Por ejemplo, el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) establece que la cantidad de CH<sub>4</sub> emitida por una población o subgrupo de rumiantes puede calcularse multiplicando la tasa de emisión por animal (factor de emisión en kg de CH<sub>4</sub> por animal), por el número de animales dentro del subgrupo. La incertidumbre de ésta estimación depende en gran medida del factor de emisión, es decir de la cuantificación la emisión de CH<sub>4</sub> bajo determinadas circunstancias de alimentación, clima, etc.

Frecuentemente en las guías desarrolladas por el IPCC se utilizan factores de emisión para estimar emisiones en varias categorías (IPCC, 2007). Estos factores de emisión se han obtenido a partir de investigaciones previas realizadas en diferentes regiones. Por ejemplo, se asume que la emisión de CH<sub>4</sub> es una fracción constante emitida del estiércol. Sin embargo este tipo de metodologías donde se utilizan factores por defecto podrían no considerar los distintos regímenes de precipitación, diferencias entre cultivos, excretas, dietas, especies de animales, propiedades de los suelos etc. de un país o región. Las mediciones directas de las emisiones pueden contribuir a mejorar los factores de emisión al considerar factores específicos y diferentes escenarios.

### El reto de la medición de flujos de gases

Previo al análisis cromatográfico de las muestras de gas, éstas deben ser colectadas. Esto es un reto ya que el transporte de gases ocurre bajo la influencia de gradientes de concentración (flujos de difusión) y de gradientes de presión (flujo de masas). Frecuentemente la concentración de los gases en los suelos, excretas y en los animales es varios órdenes de magnitud mayor en

comparación con las concentraciones atmosféricas. Si la metodología perturba la concentración de los gases en estas matrices puede distorsionar el gradiente lo que conduciría a errores experimentales. Aunado a esto, los gases son extremadamente heterogéneos en el tiempo y espacio. Por ello es un desafío colectar muestras representativas, en tiempos representativos y cuantificar de forma precisa la variabilidad espacial y temporal de los flujos de gases (Luo y Zhou, 2006).

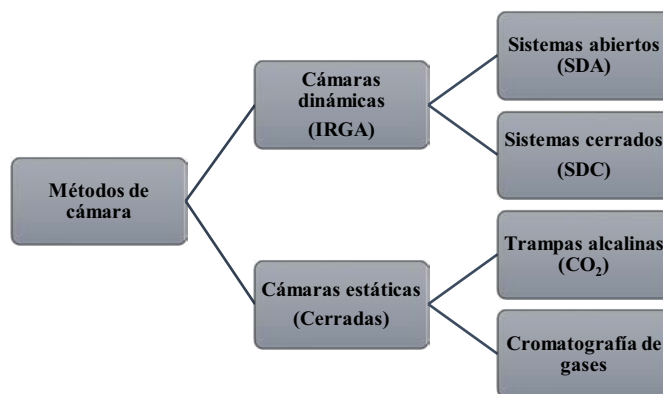
Para enfrentar este reto se han desarrollado diferentes métodos de medición. Para la cuantificación de las emisiones de GEI provenientes de las excretas y de los suelos abonados con excretas los métodos utilizados más frecuentemente implican el uso de cámaras, mediante las cuales es posible obtener mediciones directas de los flujos de gases en la superficie de la matriz requerida (Figura 1).

Las cámaras dinámicas pueden tener sistemas abiertos o cerrados dependiendo de la presencia o ausencia de

circulación de aire a través un sensor infrarrojo (IRGA) para detección de CO<sub>2</sub>. Las cámaras estáticas cerradas aíslan una parte de la atmósfera ambiental durante el periodo de medición, posteriormente la concentración de gases en la cámara se mide mediante trampas alcalinas colocadas en el interior de las cámaras, aunque con este método únicamente puede cuantificarse la emisión

de CO<sub>2</sub>. Alternativamente, las emisiones de CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O y CH<sub>4</sub> pueden medirse colectando muestras de aire del interior de las cámaras en diferentes tiempos para posteriormente ser analizadas mediante CG (Figura 2). Este método no es caro, es de fácil implementación en el campo, las cámaras pueden colocarse en diferentes sustratos como suelos, establos, excretas y pueden realizarse un mayor número de repeticiones en comparación con otros métodos como los sensores portátiles.

Para cuantificar las emisiones derivadas de la fermentación entérica en los rumiantes se puede usar la técnica de hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>), en la cual nuestro grupo



**Figura 1.** Clasificación de los métodos para medición de flujos de gases utilizando diferentes tipos de cámaras. (Luo y Zhou, 2006). Infrared Gas Analyzer (IRGA), Sistema Dinámico Abierto (SDA), Sistema Dinámico Cerrado (SDC).

de trabajo cuenta con experiencia satisfactoria. Ésta se realiza en cuatro pasos mostrados en la Figura 3.

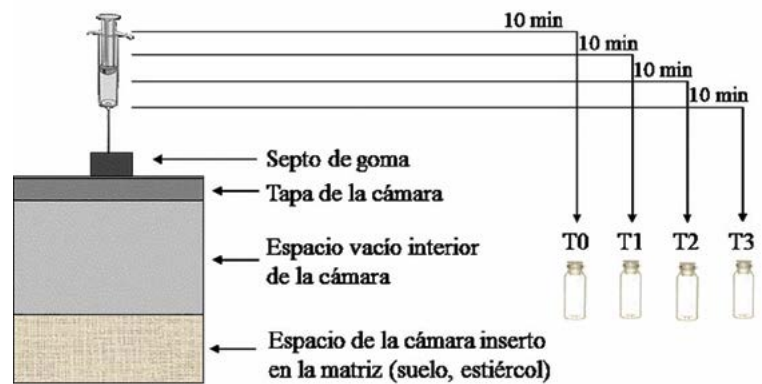
Los recipientes colectores de gas entérico y respiratorio del rumiante se colectan con recipientes de acero inoxidable de 0.5. Los tubos previamente se limpian con nitrógeno y se mantienen al vacío (menos de 70 mbares) a través de una válvula de conexión rápida Swagelok®, que permite mantener cerrado el tubo durante el periodo en que no se colecta muestra. Una vez calibrados en vacío, dos recipientes se colocan en el bozal de cada animal, permitiendo la obtención de muestras duplicadas (Figura 4). Las válvulas reguladoras de flujo permiten calcular el tiempo de llenado de los tubos, posteriormente los tubos se retiran y se extraen las muestras por duplicado y es inyectada para su análisis cromatográfico. El procedimiento descrito asegura que los cromatogramas sean muy limpios y confiables. En el caso de los rumiantes el SF6 se utiliza como un marcador externo (con un tiempo de retención de la cromatografía 9 minutos y calibrado con estándar de 25 a 250 ppt) para calcular las emisiones de CH4, aplicando la siguiente fórmula (Ec. 1):

$$CH_4(g/d) = TPSF_6(g/d) \times [CH_4] / [SF_6]$$

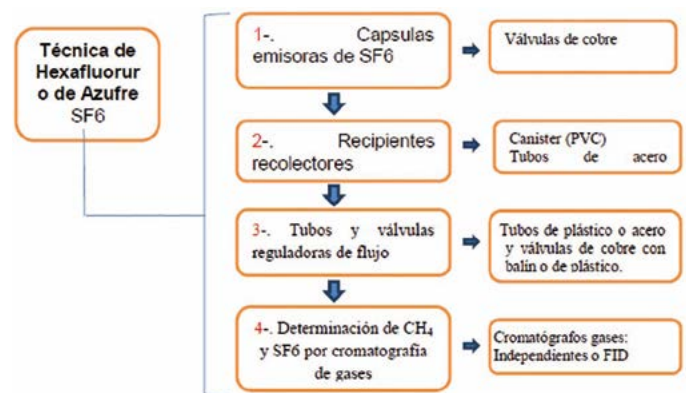
Dónde: *TPSF6* es la tasa de liberación de *SF6* de la cápsula,  $[CH_4]$  y  $[SF_6]$  son las concentraciones de los gases obtenidos por cromatografía.

### La cromatografía de gases y la detección de GEI

La CG es una técnica analítica utilizada comúnmente con fines de investigación para identificar y cuantificar diferentes compuestos en una mezcla. Esta técnica permite la detección de compuestos en concentraciones muy bajas, en pequeñas cantidades y de una gran variedad de matrices siempre y cuando los compuestos sean estables térmicamente y razonablemente volátiles. En la CG están involucradas dos fases, una móvil y una estacionaria. La fase móvil, frecuentemente llamada gas acarreador es un gas inerte por ejemplo helio, argón o nitrógeno. La fase estacionaria consiste de columnas empacadas en las cuales la parte sólida actúa como fase estacionaria. La separación de los compuestos en una muestra de gas se basa en las diferencias en la fuerza con la cual éstos interactúan con la fase estacionaria. Entre más fuerte sea la interacción mayor es el tiempo



**Figura 2.** Colecta de muestras de aire mediante el método de cámaras estáticas cerradas. Muestras de aire del interior de las cámaras se extraen mediante jeringas y son inyectadas en viales sellados previamente evacuados o bien, desplazando el aire del interior del vial con la inyección de la muestra del interior de las cámaras. Las tapas de las cámaras están equipadas con un septo de goma por donde se introduce la jeringa para tomar la muestra. Una vez que las cámaras se cierran las muestras son colectadas a intervalos de 10 o 15 minutos durante 30 a 60 minutos. Las muestras son transportadas en viales de 10-14 ml hasta su análisis por CG.



**Figura 3.** Fases en la realización de la técnica de hexafluoruro de azufre para coleccionar y cuantificar el metano en rumiantes.



**Figura 4.** Tubos colectores de metano, aplicando la técnica de hexafluoruro de azufre.

que el compuesto interactúa con la fase estacionaria y por lo tanto le toma mayor tiempo migrar a lo largo de la columna y el compuesto en cuestión tiene un mayor tiempo de retención. Aunque puede variar dependiendo de los equipos, los tiempos de retención son de 2 a 2.5, de 4.7 a 6.3 y de 5.5 a 6.2 para el CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>O, respectivamente.

#### Detección de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>

La detección del CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> frecuentemente se realiza mediante un detector de ionización de flama (FID, por sus siglas en inglés). Es un detector muy sensible en a moléculas orgánicas pero es relativamente insensible en el caso de moléculas como N<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, H<sub>2</sub>S, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O. Sin embargo, en la mayoría de los estudios se realiza la cuantificación del CO<sub>2</sub> se utiliza un detector FID equipado con un metanizador. Si se introducen otros compuestos que contienen carbono se producirán cationes en el efluente. Entre más átomos de carbono tenga una molécula, mayor número de fragmentos se formarán y el detector será más sensible para ese compuesto. Infortunadamente no existe una relación directa entre el número de átomos de carbono y la magnitud de la señal. Por esta razón, factores de respuesta individual para cada compuesto tienen que ser determinados experimentalmente para cada instrumento. Para el funcionamiento de este detector se requieren gases como el hidrógeno, oxígeno (o aire comprimido) y un gas acarreador.

La concentración de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> de una muestra de gas también puede cuantificarse con un detector de conductividad térmica (TCD). Este detector es menos sensible comparado con el FID y la detección se basa en la comparación de dos flujos de gas, uno que contiene únicamente el gas acarreador y el otro que contiene el gas acarreador además del compuesto de interés. Un gas acarreador con una alta conductividad térmica como el helio o el hidrógeno es utilizado para maximizar las diferencias en temperatura (y por lo tanto la diferencia en resistencia) entre dos filamentos delgados de tungsteno. La amplia relación superficie-masa permite un rápido equilibrio a un estado estable. Las diferencias de temperatura entre el filamento de referencia y el de la muestra son monitoreadas por un circuito puente de Wheatstone.

#### Determinación del N<sub>2</sub>O

La concentración de N<sub>2</sub>O en una muestra de gas se realiza con un cromatógrafo acoplado a un detector de

captura de electrones. Este detector posee dos electrodos y una fuente de radiación como <sup>63</sup>Ni e <sup>3</sup>H. La colisión entre los electrones y el gas acarreador, que en este caso es CH<sub>4</sub> mezclado con un gas inerte como el argón produce un plasma que contiene electrones y cationes. Si en la muestra está presente un compuesto que contiene átomos electronegativos, éstos serán capturados para formar iones negativos y la tasa de captura de electrones disminuirá. Este detector es extremadamente sensible a compuestos con átomos con alta afinidad por los electrones.

#### Cálculo de la concentración de N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>

Las concentraciones de los gases se calculan con base en la concentración marginal de los picos de las áreas generadas con el CG obtenidas mediante curvas de calibración con diferentes concentraciones. La metodología de las cámaras se basa en la linealidad de las mediciones, es decir en la acumulación progresiva en el tiempo del gas de interés en el interior de la cámara. Si los datos de una cámara tienen una  $r^2 < 0.8$  pueden ser excluidos (no hay linealidad). Si los datos tienen una  $r^2 \geq 0.8$  pero algunas de las mediciones de una cámara son mucho más altos o bajos en comparación con las otras mediciones también pueden ser excluidos. Aunque no existe un consenso, estos criterios pueden tomarse como un indicador de fugas del gas en las cámaras o bien como contaminación (Luo y Zhou, 2006).

Las concentraciones de los gases analizados mediante CG son reportados frecuentemente en partes por millón. Para transformar la concentración a unidades de masa por volumen se utiliza la ley de los gases ideales y parámetros como el volumen de las cámaras, la temperatura interna de las cámaras y la presión atmosférica del sitio en el cual se realizó la colecta de las muestras. Con estos datos pueden calcularse los flujos mediante una regresión lineal de la concentración de los gases en el tiempo.

Para calcular los flujos de los gases es necesario estimar el volumen molar corregido (MV<sub>corr</sub>) considerando la presión y temperatura del sitio donde se realizaron las mediciones (Ec. 2) (Kahmark y Millar, 2014).

$$MV_{corr} = 22.41 * \left( \frac{273.15 + T}{273.15} \right) * \frac{p_0}{p_1} \quad (\text{Ec. 2})$$

Dónde: MV<sub>corr</sub> = Volumen Molar corregido; 22.41 = Vo-

lumen molar ( $L$ ) de cualquier gas a temperatura y presión estándar;  $T$  = temperatura de la cámara (Celsius);  $p_0$  = presión del aire al nivel del mar;  $p_1$  = presión del aire en el sitio experimental.

Para calcular la tasa de emisión puede utilizarse la siguiente ecuación:

$$\text{Flujo} = \frac{\delta * M\omega * V * 10000 \text{ ha} * 60 \text{ min} * 24 \text{ horas} / \text{día}}{A * MV_{\text{corr}} * 1000 \text{ mg} * 1000 \mu\text{g}}$$

(Ec. 3)

Dónde: Flujo = emisiones  $\text{g ha}^{-1} \text{d}^{-1}$ ;  $\delta$  = pendiente del gas (ppm/min);  $M\omega$  = peso molecular del gas ( $\mu\text{g} \mu\text{mol}^{-1}$ );  $V$  = volumen de la cámara ( $L$ );  $A$  = área de la cámara ( $\text{m}^2$ );  $MV_{\text{corr}}$  = Temperatura y presión corregida del Volumen Molar.

## La cromatografía de gases y sus aplicaciones en el sector pecuario

### Mediciones de $\text{CH}_4$ en rumiantes

A nivel global la cría de rumiantes es el uso de suelo que mayor superficie ocupa y es la mayor fuente de emisiones antropogénicas de  $\text{CH}_4$  (Riple *et al.*, 2014). Los rumiantes incluyen herbívoros que consumen plantas y las digieren mediante fermentación entérica en un estómago con varias cámaras. El  $\text{CH}_4$  es un subproducto del proceso de digestión microbiana en el rumen. La cantidad de  $\text{CH}_4$  liberado depende del tipo de tracto digestivo, la edad, peso del animal, y de la calidad y cantidad del alimento consumido (IPCC, 2006).

### Mediciones de $\text{CH}_4$ y $\text{N}_2\text{O}$ en excretas

La mayor parte de las investigaciones se enfocan en las emisiones generadas por la fermentación entérica. Sin embargo, la generación de estiércol y orín que se acumula en las granjas son una consecuencia inevitable de la producción pecuaria que también es una fuente importante de emisiones de GEI. El orín, lodos y estiércol contienen nitrógeno inorgánico, carbono y agua disponible para los microorganismos los cuales son sustratos necesarios para la producción microbiana de  $\text{CH}_4$  y  $\text{N}_2\text{O}$  (Chadwick *et al.*, 2011). De acuerdo con Jungbluth *et al.* (2001), del 0.05 al 0.7 % del nitrógeno excretado en el estiércol se emite como  $\text{N}_2\text{O}$  en el caso de las vacas, aunque las emisiones pueden ser hasta de 50-60 % en el caso de los cerdos que son criados con camas gruesas de paja (Groenestein y Guarino, 2009). Hay pocas

mediciones en el caso de las áreas de cobijo selladas cuando hay áreas de colecta de excretas y orina (Chadwick *et al.*, 2011).

Aunque el estiércol depositado en los establos también emite  $\text{CH}_4$  no ha sido extensamente documentado ya que la mayoría de las emisiones se generan durante la fermentación entérica. Faltan investigaciones enfocadas en discriminar el  $\text{CH}_4$  emitido del estiércol de aquel emitido por fermentación entérica. La cuantificación directa de las emisiones derivadas del estiércol son relevantes ya que podrían contribuir a esclarecer si las emisiones de  $\text{CH}_4$  atribuidas únicamente a la fermentación entérica podrían ser sobreestimadas ya que se ha observado que estas emisiones pueden reducirse cuando el estiércol es removido de los establos (Sommer *et al.*, 2009).

## Emisiones durante el almacenamiento y tratamiento de las excretas

Las emisiones de  $\text{N}_2\text{O}$  representan entre 1 y 4 % del nitrógeno total contenido en excretas de vacas y cerdos (Chadwick *et al.*, 2011), aunque se han reportado emisiones cercanas a 10 % en el caso del estiércol aviar (Thorman *et al.*, 2006). También se ha observado una tendencia al incremento en las emisiones de  $\text{N}_2\text{O}$  con el aumento en la densidad de las pilas de estiércol (Webb *et al.*, 2004). En el caso de los lodos residuales las emisiones de  $\text{N}_2\text{O}$  dependen de la temperatura, de la presencia o ausencia de cubierta y de su contenido de agua (Sommer *et al.*, 2000). Las emisiones de  $\text{N}_2\text{O}$  derivadas de la fracción sólida son similares al estiércol sin tratar y pueden llegar hasta 4 % dependiendo de la circulación del oxígeno (Hansen *et al.*, 2006).

El estiércol almacenado y las pilas del estiércol en proceso de compostaje también emiten  $\text{CH}_4$  (Chadwick *et al.*, 2011) y puede liberarse hasta ~10 % de su contenido de carbono total (Chadwick *et al.*, 2005). El manejo adecuado de las excretas puede modificar estas emisiones al favorecer o prevenir las condiciones anaeróbicas. Por ejemplo la adición de paja reduce las emisiones de  $\text{CH}_4$  hasta 45 % al promover la aireación en la pila de estiércol (Yamulki, 2006) o al reducir la temperatura en establos y almacenes (IPCC, 2007). No hay resultados conclusivos acerca de las emisiones de  $\text{CH}_4$  generadas a partir de lodos residuales en comparación con su separación en fase sólida y líquida (Chadwick *et al.*, 2011).

## Mediciones de N<sub>2</sub>O en excretas añadidas al suelo como abonos

Los factores de emisión de N<sub>2</sub>O se generan calculando la proporción del nitrógeno contenido en el estiércol que se emite en forma de este gas al ser aplicado al suelo como abono (Chadwick *et al.*, 2011). Se ha reportado que esta proporción varía entre 1 y 3 % aunque las emisiones tienden a ser más altas en el caso de las excretas porcinas (7-13 %; Velthof *et al.*, 2003). Las emisiones de N<sub>2</sub>O son dependientes del tipo de estiércol y frecuentemente el aviar genera mayores flujos de N<sub>2</sub>O (Chadwick *et al.*, 2011).

En el caso del CH<sub>4</sub> las emisiones ocurren de forma inmediata posterior a la aplicación del abono al suelo, aunque éstas son efímeras ya que la difusión de oxígeno inhibe la metanogénesis (Chadwick *et al.*, 2000).

## Impacto de las mediciones

Las proyecciones indican que los efectos del cambio climático en México incluyen la reducción de 10 % en la precipitación y un incremento en la temperatura entre 1 y 1.5 °C en los próximos 25 años (IEA, 2014). Por ello el país se ha comprometido en la instrumentación de acciones de mitigación y adaptación (INECC, 2014). Las estrategias de mitigación pueden ser condicionadas o no condicionadas; las primeras se solventan con recursos propios de México, mientras que las segundas solo pueden realizarse si se obtienen recursos adicionales y transferencia de tecnología mediante cooperación internacional. La estrategia de mitigación no condicionada para el sector pecuario es la instalación y operación de biodigestores para aprovechar el biogás derivado de las excretas del ganado estabulado bovino y porcino, lo que implicaría la reducción anual de 2 % en las emisiones de GEI del 2015 al 2030. Estudios internacionales reportan que durante el manejo del estiércol hasta 60 % del nitrógeno puede emitirse en forma de N<sub>2</sub>O y 10 % del C en forma de CH<sub>4</sub> por lo que el establecimiento de biodigestores tendría impacto no únicamente en la mitigación de CH<sub>4</sub> sino también de N<sub>2</sub>O. Sin embargo, considerando que en México 64 % de las emisiones totales del sector agropecuario provienen de la fermentación entérica (INECC-SEMARNAT, 2015) el potencial de mitigación en esta área es significativo y actualmente no está considerado en las estrategias nacionales de mitigación. Las mediciones directas de emisiones de CH<sub>4</sub> podrían contribuir inicialmente a crear una línea base y posteriormente a diseñar estrategias de mitigación basadas en modifica-

ciones en la dieta de los rumiantes, en diferentes tipos de clima y con diferentes especies.

## Áreas de oportunidad en México

Las acciones planteadas para mejorar el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero incluyen la caracterización de la composición de la dieta y de los sistemas del manejo del estiércol para ganado estabulado en sistemas de producción intensiva, tales como bovinos lecheros, porcinos y aves, y sistemas de ganadería extensiva de bovinos, ovinos y caprinos (INECC-SEMARNAT, 2015). Lograr una mejor caracterización requiere por un lado la organización de los estudios existentes y por otro la implementación de investigaciones enfocadas en explorar estrategias de mitigación como modificaciones en la dieta y suplementación con sustancias modificadoras del ambiente ruminal. Adicionalmente se requiere un esfuerzo de investigación importante en la medición directa de emisiones derivadas del manejo y uso del estiércol. Para lograr estas mejoras y la implementación de investigaciones se requiere de: 1) Formación y fortalecimiento de grupos de trabajo ya que en México existe el conocimiento y las capacidades pero falta coordinación para establecer vínculos entre cuerpos académicos e instituciones; 2) La formación de grupos de trabajo de investigación que coadyuve a la obtención de fondos para subsanar la carencia de infraestructura y mejorar el equipamiento de laboratorios y la adquisición de instrumentos especializados; 3) Construcción y fortalecimiento de sinergias entre cuerpos académicos y el gobierno, tomadores de decisiones y diseño de políticas públicas. Es esencial mejorar la comunicación para construir puentes entre las necesidades y la generación de conocimiento.

## LITERATURA CITADA

- Amonc B., Misselbroock, T. 2011. Manure management: Implications for greenhouse gas emissions. *Animal Feed Science and Technology* 166-167: 514-531.
- Banxico. 2014. Estadísticas del Banco de México: Producción. CR145-Producto Interno Bruto (precios corrientes). Recuperado el 23 de septiembre de 2014 de: <http://www.banxico.org.mx/SielInternet/consultarDirectorioInternetAction.do?accion=consultarCuadro&idCuadro=CR145&sector=2&locale=es>
- Chadwick D. 2005. Emissions of ammonia, nitrous oxide and methane from cattle manure heaps: effect of compaction and covering. *Atmosphere and Environment* 39: 787-799.
- Chadwick D., Pain B.F., Brookman S.K.E. 2000. Nitrous oxide and methane emissions following application of animal manures to grassland. *Journal of Environmental Quality* 29: 277-287.
- Gerber P.J., Steinfeld H., Henderson B., Mottet A., Opio C., Dijkman J., Falcucci A., Tempio G. 2013. Tackling climate change through livestock – A global assessment of emissions and mitigation

- opportunities. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Rome, Italy.
- Hansen M.N., Henriksen K., Sommer S.G. 2006. Observations of production and emission of greenhouse gases and ammonia during storage of solids separated from pig slurry: effects of covering. *Atmosphere and Environment* 40: 4172-4181.
- Herrero M., Henderson B., Havlik P., Thornton P.K., Conant R.T., Smith P., Wiersenius S., Hristov A.N., Gerber P., Gill M., Butterbach-Bahl K., Valin H., Garnett T., Stehfest E. 2016. Greenhouse gas mitigation potentials in the livestock sector. *Nature Climate Change* 6: 452-461.
- IEA. 2014. Key world energy statistics 2014. Recuperado el 14 de octubre de 2014 de: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2014.pdf>
- INECC. 2014. Cuarto informe de la Consultoría del Control de Calidad de la Actualización del Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2012 en la Categoría Uso del Suelo, Cambio del Uso del Suelo y Silvicultura. México.
- INECC. 2015. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Primer Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. INECC/SEMARNAT. México.
- INEGI. 2014. Sistema de Cuentas Nacionales de México. Recuperado el 25 de agosto de 2014 de: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/scn/>
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom. 996 p.
- IPCC. 2006. Chapter 10: Emissions from Livestock and Manure Management. En Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
- IPCC. 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, United Kingdom. 1535 p.
- Jungbluth T., Hartung E., Brose G. 2001. Greenhouse gas emissions from animal houses and manure stores. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 60: 133-145.
- Luo Y., Zhou X. 2006. Soil Respiration and the Environment. Academic Press. USA. 328 p.
- Kahmark K., Millar N. 2014. Stainless Steel Chamber Construction Method. W.K. Kellogg Biological Station, Michigan State University, Hickory Corners, Michigan.
- Montzka S.A., Dlugokencky E.J., Butler J.H. 2011. Non-CO<sub>2</sub> greenhouse gases and climate change. *Nature* 476: 43-50.
- Mosier A.R., 2001. Exchange of gaseous nitrogen compounds between agricultural systems and the atmosphere. *Plant and Soil* 228: 17-27.
- Ripple W.J., Smith P., Haberl H., Montzka S. A., McAlpine C., Boucher D.H. 2014. Ruminants, climate change and climate policy. *Nature Climate Change* 4: 2-5.
- Robertson G.P., Groffman P.M. 2007. Nitrogen transformation. In Paul E.A. (Ed.). *Soil Microbiology, Biochemistry, and Ecology*. Springer, New York, N. Y., USA. pp. 341-364.
- SAGARPA. 2013. Programa Sectorial de Desarrollo Agropecuario, Pesquero y Alimentario 2013-2018. SAGARPA. Ciudad de México.
- Sommer S.G., Olesen J.E., Petersen S.O., Weisbjerg M.R., Valli L., Rohde L., Béline F., 2009. Region-specific assessment of greenhouse gas mitigation with different manure management strategies in four agroecological zones. *Global Change Biology* 15: 2825-2837.
- Sommer S.G., Petersen S.O., Sogaard H.T. 2000. Greenhouse gas emission form stored livestock slurry. *Journal of Environmental Quality* 29: 744-751.
- Thorman R.E., Chadwick D.R., Boyles L.O., Matthews R., Sagoo E., Harrison R. 2006. Nitrous oxide emissions during storage of broiler litter and following application to arable land. *International Congress Series* 1293: 355-358.
- Thornton P.K. 2010. Livestock production: recent trends, future prospects. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 365: 2853-2867.
- Velthof G.L., Kuikman P.J., Oenema O. 2003. Nitrous oxide emission from animal manures applied to soil under controlled conditions. *Biology and Fertility of Soils* 37: 221-230.
- Webb J., Chadwick, D., Ellis S. 2004. Emissions of ammonia and nitrous oxide following incorporation into the soil of farmyard manures stored at different densities. *Nutrient Cycling Agroecosystems* 70: 67-76.
- Yamulki S. 2006. Effect of straw addition on nitrous oxide and methane emissions from stored farmyard manures. *Agriculture Ecosystem and Environment* 112: 140-145.

