

## **EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO CON ALTO POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL: EL SECTOR AGROPECUARIO**

**Alejandro D. González \***, **Annika Carlsson-Kanyama \*\***

\* Grupo de Estudios Ambientales, Instituto de Investigaciones en Biodiversidad y Medioambiente (INIBIOMA), CONICET y Universidad Nacional del Comahue, 8400 Bariloche, Río Negro. [agonzalez@crub.uncoma.edu.ar](mailto:agonzalez@crub.uncoma.edu.ar)

\*\* Division of Industrial Ecology, Royal Institute of Technology, 100 44 Stockholm, Suecia. [annikack@ket.kth.se](mailto:annikack@ket.kth.se)

**RESUMEN:** Se estudió la emisión de metano y óxido nitroso en rubros de la producción agropecuaria. Estos gases de efecto invernadero tienen potenciales de calentamiento mucho mayor al del dióxido de carbono. Se obtuvieron factores de intensidad de emisión de metano y óxido nitroso utilizando la metodología recomendada por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático. Los productos de origen animal y los cultivos de arroz con anegamiento son los que presentan mayor cantidad de gases con alto potencial de calentamiento global. Esto se debe a varios procesos que en ese sector contribuyen simultáneamente: emisiones producidas por el estiércol en su almacenamiento y manejo, la fermentación entérica en el sistema digestivo de los rumiantes, y el metano emitido en suelos bajo agua. Se encuentra que la contribución de metano y óxido nitroso proveniente de cereales y legumbres de secano es de menor relevancia.

**Palabras clave:** Cambio climático, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, Producción agropecuaria

### **INTRODUCCIÓN**

Al presente, existe evidencia de que algunas emisiones producidas por las actividades humanas conducen a un calentamiento global del planeta. El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (PICC) investiga estos fenómenos desde hace varias décadas, formando grupos de trabajo especializados en distintas áreas (PICC, 2007). Para la evaluación sistemática, en las últimas recomendaciones para realizar los inventarios nacionales el PICC (2006) ha clasificado a las actividades en: 1) energía; 2) procesos industriales y uso de productos; 3) agricultura, forestación, y otros usos de la tierra; y 4) residuos. Las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) son más relevantes en los sectores de energía y de procesos industriales, los cuales son generalmente los de mayores emisiones globales, y de estas la mayor parte proviene del uso de recursos no renovables derivados de combustibles fósiles.

Sin embargo, dependiendo del proceso que los origine, otros gases que no se relacionan con el uso de combustibles fósiles, pueden tener efecto significativo debido a potenciales de calentamiento mayores a los que presenta el CO<sub>2</sub>. La agricultura y la producción alimentaria son sectores que producen una diversidad de gases de alto potencial de calentamiento, como el metano (CH<sub>4</sub>) y el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O). Estos casos son relevantes a la planificación en energías renovables y sustentabilidad ambiental, ya que no disminuiría su emisión al reducirse el uso de combustibles fósiles.

En trabajos previos, a través de estudios de ciclo de vida, distintos autores mostraron que una determinada elección de alimentos puede derivar en energías y emisiones de valores muy diferentes. Por ejemplo, Carlsson-Kanyama (1998) y Engström et al (2007) estudiaron la emisión de gases de efecto invernadero para distintos ingredientes. En el análisis de comidas usuales con el mismo valor calórico y proteico, encontraron que estas pueden diferir en un factor entre 2 y 9 en las emisiones; y concluyen también que las dietas comunes actuales en Suecia superan el límite de sustentabilidad para estabilizar las emisiones en el sector alimenticio. Además, Carlsson-Kanyama et al. (2003) investigaron las energías de ciclo de vida de 300 productos, y encontraron que comidas nutricionalmente similares pero con distinta elección de ingredientes, pueden diferir hasta en un factor 4 en la energía necesaria para la producción y el consumo.

En este artículo, se estudian las intensidades de emisión de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O para etapas primarias de la producción alimentaria. El objetivo es incluir los resultados en una base de datos de intensidades de emisión en función de la cantidad en gramos de distintos ingredientes. De esta forma, a través de cálculos de ciclo de vida se podrá evaluar el impacto ambiental de la producción y consumo de alimentos. El presente trabajo difiere de un inventario, en el cual las emisiones se calculan para la producción de un país o región. Por el contrario, aquí se busca obtener intensidades de emisión por cantidad de alimento producido. Los datos pueden usarse para diseñar estrategias de mitigación que conduzcan a menores emisiones de gases de efecto invernadero en rubros específicos. Como se utilizan datos primarios que son promedios por sector agropecuario y para varios países, entonces los resultados son indicativos de tendencias globales para distintos rubros alimenticios.

En la primera parte del presente trabajo se resumen los mecanismos de emisión de metano y óxido nitroso en el sector agropecuario, y los potenciales de calentamiento global usados. En las secciones siguientes, se detallan las ecuaciones para

calcular las intensidades de emisión. Combinando datos de PICC (2006) y de la Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAO, [www.fao.org](http://www.fao.org)), se muestran ejemplos cuantitativos para productos agropecuarios primarios.

## METODOLOGÍA Y DATOS UTILIZADOS

### *Potencial de Calentamiento Global*

Cada gas de efecto invernadero tiene un potencial de calentamiento global (simbolizado por la sigla GWP derivada de Global Warming Potential), y es la capacidad de un gas de contribuir al apantallamiento radiativo relativo a otro gas de referencia (PICC, 2007). La Tabla 1 muestra algunos valores para óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), metano (CH<sub>4</sub>), y HFCs (Hydro-Fluoro-Carbon). El GWP de CO<sub>2</sub> es igual a 1.

	20 años	100 años	500 años
N <sub>2</sub> O	289	298	153
CH <sub>4</sub>	72	25	7,6
HFC-23	12000	14800	12200
HFC-32	2330	675	205

Tabla 1: Potencial de calentamiento por efecto invernadero para distintos gases y distintas escalas temporales de decaimiento. Los potenciales están en unidades equivalentes a CO<sub>2</sub> (datos de PICC, 2007: pág. 210-214)

Como los gases presentes en la atmósfera interactúan con otros gases, con aerosoles, y con la radiación, pueden ocurrir decaimientos o aumentos en su efectividad. Entonces, los GWP de utilidad se calculan para 20, 100 o 500 años. En la Tabla I se muestran sólo los valores para gases relevantes en agricultura y producción alimentaria. Los HFCs son gases usados en equipos de refrigeración, y reemplazaron a los CFCs que presentaban altos índices de destrucción de Ozono.

Por ejemplo, un valor de GWP de 25 para CH<sub>4</sub> en una escala temporal de 100-años significa que este gas produce 25 veces más efecto radiativo para el calentamiento global que el CO<sub>2</sub>. Entonces, toda cantidad de CH<sub>4</sub> calculada en gramos en la evaluación de emisiones para un proceso en particular, deberá ser multiplicada por 25 para obtener el resultado en gramos equivalentes de CO<sub>2</sub>. Los valores de GWP para N<sub>2</sub>O variaron poco desde su publicación por el PICC en 1996 y 2001 (310 en 1996, 296 en 2001, 298 en 2007, para un período de 100 años). Sin embargo, los valores para CH<sub>4</sub> aumentaron cerca de un 20% con respecto a los valores considerados en 1996 (21 en 1996, 23 en 2001, y 25 en 2007, para un período de 100 años). Estas variaciones se deben a la inclusión de estimaciones más precisas en las interacciones de metano y vapor de agua en la atmósfera (PICC, 2007).

### *Óxido nitroso (N<sub>2</sub>O)*

Se denomina nitrificación a la oxidación de amonio para formar nitratos, y denitrificación a la reducción de nitratos en nitrógeno gaseoso (N<sub>2</sub>). Ambas reacciones producen N<sub>2</sub>O en actividades microbianas en el suelo, y eventualmente estos gases se liberan a la atmósfera. Estos procesos tienen mayor probabilidad de ocurrir cuando se agrega nitrógeno a los suelos, por ejemplo cuando se usan fertilizantes sintéticos o cuando se aplican fertilizantes orgánicos en base a desechos vegetales y animales. Entonces, los aumentos de emisiones de N<sub>2</sub>O relativos a los niveles naturales son contabilizados como adiciones inducidas por las actividades del ser humano.

Por otro lado, en producción animal, el almacenamiento y manejo de estiércol también contribuye a emisiones de N<sub>2</sub>O. La tasa de nitrificación de estiércol almacenado depende de la cantidad de nitrógeno que contiene, y del oxígeno disponible para la reacción química. Los procesos de manejo de estiércol en forma anaeróbica producen baja nitrificación, aunque sí denitrificación y consecuentemente emisiones de N<sub>2</sub>O en forma anaeróbica. Entonces, para evaluar las intensidades de emisión debe considerarse en especial cada forma de almacenamiento y manejo de estiércol de la producción animal.

Para el sector de agricultura estudiado en el presente trabajo se consideran tres contribuciones directas:

- N<sub>2</sub>O proveniente de la aplicación de fertilizantes sintéticos en suelos
- N<sub>2</sub>O proveniente de la aplicación de estiércol en suelos
- N<sub>2</sub>O emitido en el almacenamiento y manejo de estiércol

En los cálculos realizados aquí, los factores de emisión y los niveles de actividad para estos procesos se obtuvieron de la referencia PICC (2006). Más abajo se dan detalles para su obtención y las ecuaciones correspondientes.

### *Metano (CH<sub>4</sub>)*

El metano es un producto de la degradación de materia orgánica en condiciones anaeróbicas. En los herbívoros, y en mayor medida en rumiantes, la celulosa y otros carbohidratos se digieren con ayuda de la actividad bacteriana en el rumen: a estos procesos se denomina fermentación entérica. La fermentación producida por los microorganismos libera CH<sub>4</sub>, dependiendo la cantidad emitida del tipo de animal, y de la calidad y cantidad de los alimentos que ingiere. Los rumiantes que producen mayores cantidades de metano son el ganado vacuno y el ovino, y se consideran para los cálculos las condiciones de domesticación estándar. El metano se produce en la digestión y se elimina directamente por boca o heces en forma gaseosa.

El almacenamiento y manejo de estiércol también puede producir emisiones de metano. En este caso el mecanismo dominante es la descomposición del estiércol, la cual es independiente de la fermentación entérica. Las mayores emisiones de metano se producen en los manejos de estiércol en sistemas líquidos, los cuales son usuales en corrales de engorde de vacunos, en producción lechera, en cría intensiva de cerdos, y en almacenamiento húmedo de estiércol en producciones avícolas. Por el contrario, el estiércol depositado sobre la superficie presenta factores de emisión de metano bajos, pero altos en emisión de óxido nitroso por procesos aeróbicos.

Otra fuente de emisión de metano en agricultura son los cultivos que utilizan zonas anegadas, como la mayor parte del arroz, ya sea en régimen de anegamiento permanente o temporario. Existen microorganismos en el suelo bajo el agua que emiten metano, y su transporte a la atmósfera es facilitado por los tallos de las plantas; mecanismo similar al que ocurre en las represas hidroeléctricas, con distintas intensidades de emisión según el contenido de materia orgánica del suelo bajo agua.

En este trabajo se incluyen tres fuentes de CH<sub>4</sub> en la producción alimentaria:

- d) CH<sub>4</sub> debido al manejo de estiércol
- e) CH<sub>4</sub> proveniente de la fermentación entérica
- f) CH<sub>4</sub> producido en cultivos de arroz

La importancia de las emisiones de alto potencial de calentamiento dependen de los factores de actividad regionales y por países. Sin embargo, como la tendencia mundial es hacia un fuerte incremento de la producción agropecuaria, con énfasis en la producción animal (Smil, 2002), se espera que las cantidades globales de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O emitidos se incrementen. Por ejemplo, en Suecia, las tres cuartas partes de CH<sub>4</sub> y la mitad de N<sub>2</sub>O son debidas al sector de la agricultura. En los EE.UU., la única categoría con emisiones de metano similares a la de agricultura es la de basureros a cielo abierto (Engström et al, 2007).

#### *Elección del procedimiento y condiciones de contorno*

El PICC (2006) sugiere diferentes aproximaciones para calcular emisiones. Con detalle y complejidad creciente, los niveles se denominan Tier 1, Tier 2 y Tier 3. El primero utiliza promedios globales, aunque distinguiendo variables significativas como clima, cantidad de insumos utilizados, tipo de cosecha o de animal, tipo de manejo de suelo y de estiércol, régimen de riego, y otros de nivel similar. Cuando se necesitan datos agronómicos estos se obtienen de bases de datos globales (por ejemplo de FAO). El nivel Tier 2 utiliza las ecuaciones y conceptos de Tier 1 pero requiere información local más detallada de cada paso; por ejemplo, peso de los animales, cantidad y tipo de alimento suministrado, digestibilidad, uso local de fertilizantes, etcétera. El método Tier 3 involucra estudios exhaustivos y datos tomados con repetición para obtener factores de emisión locales y de baja incerteza. Los métodos de nivel más alto se recomiendan para los rubros de mayor influencia en un inventario, y en aquellos casos en que se conocen los detalles. El PICC sugiere que pueden combinarse los métodos y trabajar parte de la evaluación en un nivel y parte en otro.

En el presente trabajo se utiliza el método Tier 1, con los índices de actividad y factores de emisión dados por el PICC en su último informe (PICC, 2006). Para usos de fertilizantes y producción de cereales se usan datos de FAO (2004a, 2004b) y de INTA (2007), y para la producción de carne y leche datos del centro de estadísticas de Suecia (CES, 2007). Consideramos a este nivel suficiente para obtener resultados comparativos entre distintos rubros alimenticios, y con validez global. Pueden ocurrir variaciones significativas respecto de estos resultados si se intentara calcular una producción local determinada, lo cual no se encuadra en los objetivos de este trabajo.

Es importante notar que existen otras emisiones de CO<sub>2</sub> directas que aquí no son tenidas en cuenta, como ser: producción de alimento para el animal, transporte, energía en manejo de corrales, refrigeración, etcétera. Estas emisiones son calculadas para evaluaciones completas, de las cuales la contribución debida a N<sub>2</sub>O y CH<sub>4</sub> es una parte relevante del total.

## **INTENSIDADES DE EMISIÓN**

En esta sección se resumen las ecuaciones para obtener emisiones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O en los procesos estudiados. Por ejemplo, para la producción lechera el PICC (2006) reporta datos de emisión por kg de estiércol y por año, entonces es necesario combinar estas cantidades con kg de estiércol por animal y producción de leche por animal. De la misma forma, los factores de emisión para plantaciones de arroz se dan por m<sup>2</sup> de área cosechada, lo cual requiere del uso de datos de rendimiento en la producción de arroz en condiciones de irrigación. En lo que sigue, las ecuaciones se expresan en unidades de masa de CO<sub>2</sub>-equivalente por cada unidad de masa de producto analizado.

### *a) Óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) proveniente de la aplicación de fertilizantes sintéticos en suelos*

La cantidad de N<sub>2</sub>O emitido por la aplicación de fertilizantes sintéticos,  $N_2O_{fertil}$ , se debe a la conversión del nitrógeno presente en los suelos, y está dada por la expresión

$$N_2O_{fertil} = M_{fertil} * (1 - f_{r_{atm,f}}) * \epsilon_{factor} * (M_{N_2O} / M_{N_2}) * GWP_{N_2O} \quad (1)$$

donde,

$M_{fertil}$  , masa de nitrógeno aplicado para producir la cantidad de producto analizado (kg N aplicado / kg producto analizado )

$fr_{atm,f}$  , fracción de nitrógeno liberado a la atmósfera en forma de  $NH_3$  o de  $NO_x$  volatilizado, y que no es usado por la actividad microbiana del suelo.

$\mathcal{E}_{factor}$  , factor de emisión para fertilizantes (kg de  $N_2O$  / kg N aplicado)

$M_{N_2O} / M_{N_2} = 44/28$  es la relación de masas de las moléculas de  $N_2O$  y  $N_2$

$GWP_{N_2O}$  , Potencial de calentamiento global por efecto invernadero,  $N_2O$  con respecto a  $CO_2$

El resultado de la Eq. (1) queda expresado en kg  $CO_2$ -equivalente / kg producto analizado. La cantidad de producto analizado representa el paso del proceso productivo que quiere evaluarse. Por ejemplo, si el producto analizado es un pan puesto en la mesa del consumidor, entonces es necesario incluir en  $M_{fertil}$  las transformaciones intermedias. Esto permite generalizar las ecuaciones para análisis de alimentos procesados, que incluyen desperdicios o reciclados en distintas etapas de la manufactura.

La Tabla 2 muestra los resultados para distintos cultivos. En todos los casos, el factor de emisión es de 0,01 kg de  $N_2O$  / kg N aplicado (obtenido de la Tabla 11.1 en PICC 2006); y la fracción de volatilización es del 10% (de Tabla 11.3 en PICC 2006).

	$M_{fertil}$ (kg N aplicado / ton cosechada)	$N_2O_{fertil}$ (kg $CO_2$ -equivalente / ton cosechada)
Trigo rendimiento medio <sup>a</sup>	16	67
Trigo rendimiento muy alto <sup>b</sup>	24	100
Avena <sup>b</sup>	22	92
Maíz <sup>a</sup>	5	21
Soja <sup>a</sup>	1	4
Girasol <sup>a</sup>	5	21
Papas <sup>b</sup>	3,5	15

<sup>a)</sup> Datos de fertilización y rendimiento promedio para Argentina, de FAO (2004a) e INTA (2007); 2500 kg/ha.

<sup>b)</sup> Datos correspondientes a Suecia (CES, 2007); 6400 kg/ha

Tabla 2: Cantidad de fertilizante utilizado y emisiones de  $N_2O$  en función del tipo de cultivo, en unidades de  $CO_2$  equivalente por tonelada de cosecha en campo.

Para el potencial de calentamiento se usó el valor a 100 años (Tabla 1 del presente trabajo). El valor para soja es muy bajo debido a que se trata de una leguminosa, y por lo tanto requiere baja fertilización.

#### b) Óxido nitroso ( $N_2O$ ) proveniente de la aplicación de estiércol en suelos

En el caso de utilizar estiércol como fertilizante, la intensidad de emisión  $N_2O_{estier,fertil}$  , en unidades de masa de  $CO_2$ -equivalente por unidad de masa de producto analizado, está dada por la ecuación:

$$N_2O_{estier,fertil} = M_{estier} * (1 - fr_{N,atm,estier}) * \mathcal{E}_{factor} * (M_{N_2O} / M_{N_2}) * GWP_{N_2O} * N_{estier} \quad (2)$$

con,

$M_{estier}$  , masa de estiércol aplicada para producir la cantidad de producto analizado (kg estiércol / kg producto analizado)

$fr_{N,atm,estier}$  , fracción de nitrógeno en el estiércol aplicado y que se libera como  $NH_3$  o  $NO_x$  a la atmósfera

$\mathcal{E}_{factor}$  , factor de emisión para convertir nitrógeno en  $N_2O$ , (kg of  $N_2O$  / kg N aplicado)

$N_{estier}$  , fracción de N por unidad de masa de estiércol (kg N / kg estiércol)

El factor de emisión es el mismo que para el caso anterior, ya que no depende del origen del nitrógeno, aunque la fracción de volatilización de nitrógeno en el caso de estiércol es distinta, del 20% (Tabla 11.3 de PICC 2006). A modo de ejemplo podemos considerar el caso de la producción de cítricos abonada con estiércol vacuno. El contenido de N en este estiércol es cercano al 1% en peso. Usando la Eq. (2), el factor de emisión resultante es de 0,04 kg  $CO_2$ -equivalente por cada kg de estiércol usado como fertilizante. Según datos del INTA, en Argentina aproximadamente el 15% del área cultivada de cítricos utiliza estiércol, y se aplican 7 ton/ha (FAO, 2004a). Esto implica una emisión neta por unidad de superficie de 280 kg  $CO_2$ -equivalente /ha. Si se usara fertilizante sintético, la cantidad promedio para cítricos en Argentina es de 116 kg N/ha (FAO, 2004a), y usando la Eq. (1) resulta una emisión neta de 485 kg  $CO_2$ -equivalente /ha. En este caso, la diferencia encontrada para las emisiones de la aplicación de estiércol conduce a valores de  $N_2O$  proveniente de N significativamente menores a las del fertilizante sintético.

En la Tabla 3, se muestran los resultados de la Eq. (2) para distintos cultivos fertilizados con estiércol en Suecia (CES, 2007).

	$M_{estier} * N_{estier}$ (kg N aplicado / ton cosechada)	$N_2O_{ester, fertil}$ (kg CO <sub>2</sub> -equivalente / ton cosechada)
Trigo rendimiento muy alto	18	67
Avena	23	87
Papas	3,5	15

Tabla 3: Cantidad de estiércol utilizado como fertilizante y emisiones asociadas de N<sub>2</sub>O en función del tipo de cultivo.

El valor de emisión de N<sub>2</sub>O para trigo es significativamente menor al encontrado en el mismo tipo de producción pero con el uso de fertilizante sintético (Tabla 2). Para avena y papa los valores son iguales o un poco menores.

c) Óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) emitido en el Almacenamiento y Manejo de Estiércol (AME)

Dependiendo del tipo de animal en producción, las distintas formas de almacenamiento y procesamiento de estiércol conducen a diferentes emisiones. En la producción bovina intensiva o en corrales de engorde (“feed lot”), los métodos de manejo más relevantes son los sistemas líquidos, las lagunas anaeróbicas y la acumulación sólida. Mientras que para cerdos predomina la acumulación confinada a los corrales y las lagunas anaeróbicas. Cada método presenta un factor de emisión distinto, y en nivel Tier 1 están dados por la Tabla 10.21 del informe PICC (2006). La cantidad de N<sub>2</sub>O emitido por el procesamiento de estiércol de un animal *i* en particular,  $N_2O_{AME, animal-i}$ , considerando todos los tipos de almacenamiento y manejo (AME), está dada por la siguiente ecuación:

$$N_2O_{AME, animal-i} = M_{estier, AME} * GWP_{N_2O} * (M_{N_2O} / M_{N_2}) * N_{excr, animal-i} * \sum_j fr_{animal-i, j} * \epsilon_{factor, j} \quad (3)$$

donde el resultado se expresa en kg CO<sub>2</sub>-equivalente / kg producto analizado, y cada símbolo tiene el significado siguiente:

$M_{estier, AME}$ , cantidad de estiércol manejado con todos los métodos AME para producir la cantidad de producto analizado (kg estiércol / kg producto analizado).

$\epsilon_{factor, j}$ , factor de emisión para convertir nitrógeno en N<sub>2</sub>O (kg of N<sub>2</sub>O / kg N) para el manejo AME de tipo *j*

$fr_{animal-i, j}$ , fracción de estiércol del animal tipo *i* manejado como un AME tipo *j*

$N_{excr, animal-i}$ , cantidad de nitrógeno excretado en el estiércol del animal tipo *i* (kg N / kg estiércol)

En la Eq. (3), la sumatoria incluye todos los tipos de manejo de estiércol que corresponden a un animal determinado. La Tabla 4 muestra un ejemplo de cálculo para dos tipos de animales y en condiciones de producción intensiva de Europa.

		Sist. líquido	Sist. sólido	Confinado en corral	Pastura	Otros, sin emisión	$N_2O_{AME, animal}$ (kg CO <sub>2</sub> -eq/ ton estiércol)	$N_2O_{AME, animal-i}$ (kg CO <sub>2</sub> -eq/ animal.año)
	Factor de emisión (kgN <sub>2</sub> O / kg excretado)	0,005	0,005	0,002	0,02	0		
	Estiércol en producción lechera bovina	36 %	37 %	0	20 %	7 % <sup>a</sup>	37,5	424 <sup>c</sup>
	Estiércol en producción de carne bovina	25 %	39 %	0	32 %	2 % <sup>a</sup>	47,5	323 <sup>f</sup>
	Estiércol en cerdos para consumo	0	14 %	72 %	0	14 % <sup>b</sup>	24,3	12 <sup>d</sup>
	Estiércol en cerdos de reproducción	0	14 %	72 %	0	14 % <sup>b</sup>	24,3	56 <sup>e</sup>

<sup>a)</sup> corresponde a estiércol usado como fertilizante (contabilizado en otro rubro)

<sup>b)</sup> el 9% corresponde a lagunas anaeróbicas sin emisión (PICC, 2006), y el 5% a uso como fertilizante

<sup>c)</sup> se considera el promedio para vacas lecheras en Suecia, de 11300 kg estiércol /animal.año (CES, 2007)

<sup>d)</sup> se considera el promedio para cerdos de consumo en Suecia, de 483 kg estiércol /animal.año (CES, 2007)

<sup>e)</sup> se considera el promedio para cerdos de reproducción en Suecia, de 2310 kg estiércol /animal.año (CES, 2007)

<sup>f)</sup> se consideran 6800 kg de estiércol / animal .año (CES, 2007)

Tabla 4: Sistemas de manejo de estiércol, factores de emisión, y resultados de la Eq. (3) para producción lechera, carne bovina y de cerdos.

Las dos últimas columnas muestran los resultados de emisión de N<sub>2</sub>O en AME, por tonelada de estiércol producido, y por cada animal y año, respectivamente. Los sistemas anaeróbicos producen bajas emisiones de N<sub>2</sub>O, pero altas en metano, como se verá en la sección siguiente.

d) Contribución de CH<sub>4</sub> proveniente del estiércol

Las emisiones de metano provenientes de estiércol dependen fuertemente de la temperatura. En la Tabla 10.14 del informe del PICC (2006) se dan los factores de emisión en el método Tier 1, por animal y para cada región según la temperatura media. Las variaciones entre los extremos de temperatura ambiente (clima frío, templado o cálido) se encuentran entre un factor 2 y un factor 3. Una vez elegido el factor de emisión correspondiente, la emisión de metano debida al estiércol, CH<sub>4</sub> CH<sub>4,animal-i</sub>, por año y para un determinado animal, viene dada por la expresión,

$$CH_4_{CH4,animal-i} = M_{estier} * \epsilon_{CH4,animal} * GWP_{CH4} / M_{estier,animal-i} \quad (4)$$

en unidades de masa de CO<sub>2</sub>-equivalente por unidad de masa de producto analizado producido en un año. Las abreviaturas tienen el siguiente significado:

$\epsilon_{CH4,animal}$  factor de emisión de CH<sub>4</sub> por animal y por año

$M_{estier,animal-i}$  masa de estiércol por animal y por año

$M_{estier}$  masa de estiércol aplicada asociada con la cantidad de producto analizado. Por ejemplo, kg estiércol involucrado en la producción de una unidad de carne empaquetada en el comercio, o de un litro de leche. (kg estiércol / kg producto analizado)

$GWP_{CH4}$  Potencial de calentamiento por efecto invernadero para el metano (CH<sub>4</sub> con respecto a CO<sub>2</sub>)

En la Tabla 5 se muestran los resultados de emisiones por animal y por kg de producto para leche y carne bovina en Suecia. La producción de leche es de 8000 kg/animal.año (en puerta de tambo). Para la producción de carne se consideran tres tamaños de faena, con un promedio de 570 kg por animal vivo y 300 kg de carcaza faenada, los que corresponden a 16 meses de promedio de vida (CES, 2007).

	Factor de emisión (kg CO <sub>2</sub> -equiv./ animal año)	Producto analizado	Rendimiento del producto analizado (kg producto/ animal. año)	Emisión de metano (kg CO <sub>2</sub> -equiv./kg producto)
Ganado bovino lechero	1375	Leche	8000	0.17
Ganado bovino	400	Carne	300	1.78

Tabla 5: Emisiones de CH<sub>4</sub> provenientes de estiércol asociado con la producción de leche y carne bovina

Estas contribuciones debidas a CH<sub>4</sub> son mayores que las provenientes de N<sub>2</sub>O debidas a los sistemas de manejo de estiércol. En efecto, usando los resultados de la Tabla 4, se emiten emisiones de N<sub>2</sub>O de 0,053 kg CO<sub>2</sub>-equivalente/kg de leche, y 1,06 kg CO<sub>2</sub>-equivalente/kg de carne. En la sección siguiente se calcula la contribución de metano debida a los procesos de digestión del animal.

e) Contribución de CH<sub>4</sub> debido a la fermentación entérica

Los procesos de digestión del alimento producen emisiones de metano, las cuales son mayores para los rumiantes. En el nivel Tier 1, el PICC (2006) provee los valores anuales de emisión por animal, de acuerdo a la zona geográfica y al tipo de producción. La emisión por unidad del producto analizado viene dada por:

$$CH_4_{fe,animal} = \epsilon_{fe,animal} * GWP_{CH4} / M_{producto} \quad (5)$$

donde  $CH_4_{fe,animal}$  es la producción de CH<sub>4</sub> por animal en fermentación entérica ( $fe$ ) (kg CO<sub>2</sub>-equivalente / animal)

$\epsilon_{fe,animal}$  factor de emisión para producir CH<sub>4</sub> en  $fe$ , por animal

$M_{producto}$  cantidad de producto analizado por animal (por ejemplo kg de carne / animal)

Para la producción lechera en Europa, el factor de emisión es de 109 kg de metano por animal y por año (Tabla 10.11 de PICC (2006)), el cual corresponde a 2725 kg CO<sub>2</sub>-equivalente por animal y por año (usando el GWP a 100 años).

En la Tabla 6 se muestran resultados para emisiones de CH<sub>4</sub> en fermentación entérica para producción de leche y carne en Suecia, obtenidas con los datos de producción usados en la sección anterior. Sumando las tres contribuciones directas dadas por las Eqs. (3), (4) y (5), se obtiene una emisión total de (0,053+0,172+0,34) = 0,565 kg CO<sub>2</sub>-equivalente por kg de leche en puerta de tambo. En el caso de la carne bovina, la suma de las mismas contribuciones resultan en (1,07+1,78+6,33) = 9,20 kg CO<sub>2</sub>-equivalente por kg de carne de faena primaria (carcaza). Para conocer la incidencia de estos valores de emisión en los productos que llegan al consumidor deben aplicarse los factores de corrección que dependen de los desperdicios en las etapas de manufactura. Los datos detallados escapan al alcance de este artículo. En el caso de la leche el desperdicio es pequeño, pero en la carne debe tenerse en cuenta que el peso en faena considerado puede tener una merma significativa hasta llegar a consumo.

	Factor de emisión $\epsilon_{fe,animal}$ (kg CO <sub>2</sub> -equiv./ animal año)	Producto analizado	Rendimiento del producto analizado (kg producto / animal.año)	Emisión de metano (kg CO <sub>2</sub> -equiv./kg producto)
Ganado bovino lechero	2725	Leche	8000	0.34
Ganado bovino	1425	Carne	300	6.33

Tabla 6: Emisiones de CH<sub>4</sub> provenientes de la fermentación entérica para producción de leche y carne bovina

#### f) Contribución de CH<sub>4</sub> en cultivos de arroz

La producción de arroz en sistemas anegados conlleva emisiones de metano, CH<sub>4</sub> arroz, durante el tiempo en que se tiene el campo inundado. El PICC (2006) propone varios factores de corrección a tener en cuenta, y que, en el nivel Tier 1 están representados en la siguiente ecuación:

$$CH_4_{arroz} = M_{arroz} * \epsilon_{arroz} * f_{aneg} * f_{pre} * GWP_{CH_4} / R_{arroz} \quad (6)$$

con el resultado en unidades (kg CO<sub>2</sub>-equivalente / kg producto analizado), y la siguiente terminología:

$\epsilon_{arroz}$  factor de emisión para la estación de cosecha (kg CH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>)

$M_{arroz}$  cantidad de arroz a cosechar por unidad de masa de arroz analizado, en kg cosechado / kg producto analizado. (Igual a 1 si se analiza la cosecha en campo).

$R_{arroz}$  rendimiento anual de arroz (kg cosechado / m<sup>2</sup>)

$f_{aneg}$  factor de escala para el régimen de anegamiento (valores entre 0 y 1; 0 si es de secano y 1 completamente anegado)

$f_{pre}$  factor de escala para el régimen de anegamiento en el período anterior a la siembra (pretemporada)

Para evaluar las emisiones de este tipo de producción se tomaron datos sobre Tailandia y EE.UU. (FAO, 2004b). Se eligieron estos dos países porque presentan gran diferencia en sus técnicas de cultivo, régimen de agua, y tasas de producción, y por lo tanto, representan situaciones ambientales diferentes. La Tabla 7 resume el análisis de datos, y en la última columna el resultado obtenido de la aplicación de la Eq. (6).

	Tipo de producción	Factor de emisión kg CH <sub>4</sub> / ha	Fracción por anegamiento en cultivo <sup>b</sup>	Fracción por anegamiento pre siembra <sup>c</sup>	Producción kg / ha	Emisión CH <sub>4</sub> kg CO <sub>2</sub> -equiv. / kg cultivo
EE.UU.	100 % irrigado	156 <sup>a</sup>	0,78	1,22	7400 <sup>e)</sup>	0,50
Tailandia	7 % irrigado	156 <sup>a</sup>	0,78	1,22	2650 <sup>e)</sup>	0,54
	92 % pluvial	156 <sup>a</sup>	0,27	1,22		

a) se usa el valor dado por PICC (2006) es de 1,3 kg CH<sub>4</sub>/ día.ha; y 120 días de anegamiento (Minamikawa y Sakai, 2006).

b) se considera el valor sin detalle de aireación

d) dato promedio para casos con pretemporada pero sin detalle en la irrigación previa

e) referencia FAOSTAT ([www.faostat.fao.org](http://www.faostat.fao.org))

Tabla 7: Emisiones de metano en cultivos de arroz para dos países distintos y en regímenes de irrigación distinta.

El resultado promedio es de (0,50+0,54)/2 = 0,52 kg CO<sub>2</sub>-equivalente / kg de arroz cultivado. Para evaluar esta estimación, comparamos con datos de Japón e India. En el análisis de inventario de India, Grag et al. (2006) informan que, para una producción de arroz de 1,34 · 10<sup>11</sup> kg se emiten 8,6 · 10<sup>10</sup> kg CO<sub>2</sub>-equivalente, lo cual resulta en 0,64 kg CO<sub>2</sub>-equivalente / kg de arroz cultivado. Breiling et al. (2005) analiza los datos para Japón, resultando en 0,59 kg CO<sub>2</sub>-equivalente / kg de arroz cultivado. Ambos son comparables con el promedio de 0,52 encontrado aquí, siendo la diferencia menor al 20%. En parte, esta diferencia puede deberse a la incerteza en la cantidad de días de anegamiento, y a los regímenes de aireación sin detalles provistos por el método Tier 1. De todos modos, este nivel de precisión es aceptable para una estimación aplicada a la comparación de distintos productos.

#### ANÁLISIS DE LOS DATOS PRELIMINARES OBTENIDOS

Comparando las emisiones de metano y óxido nítrico en la producción láctea y en cultivos, se observa que es muy baja para cultivos que no requieren anegamiento, como ser trigo, maíz, soja, girasol, y papa. El arroz de secano, de producción minoritaria a nivel mundial, no presenta emisiones de metano, y puede estimarse que las correspondientes a fertilizantes son similares a las de los cereales estudiados en la Tabla 2. Las emisiones debidas a fertilización en secano, ya sea con productos sintéticos o estiércol, son mucho menores a las correspondientes al metano en anegamiento. Las emisiones de N<sub>2</sub>O en el

anegamiento son relativamente muy pequeñas, con un factor de emisión por kg de nitrógeno que es 3 veces menor al usado para cereales de secano (PICC, 2006).

En el caso de la producción animal, las emisiones principales son por el metano en la fermentación entérica de los rumiantes y por el manejo de estiércol, y en menor medida por la emisión de óxido nitroso en almacenamiento de estiércol. Las emisiones de gases de calentamiento global obtenidas para la producción lechera y de carne en Europa puede considerarse muy alto si se lo compara con los cereales y legumbres de secano. Si se incluyera el valor nutricional del alimento, esto es, cantidad de energía, proteínas, vitaminas, grasas, etc., el arroz con anegamiento podría resultar de emisiones inferiores a las encontradas para la producción lechera. Por ejemplo, 1 kg de leche contiene aproximadamente 32 g de proteína y provee una energía alimentaria de 252 kJ, mientras que en 1 kg de arroz se encuentran cerca de 80 gramos de proteína y provee 1548 kJ de energía alimentaria. De todos modos, estas comparaciones son sólo ilustrativas y no pueden hacerse directamente sino a través de considerar comidas completas.

## CONCLUSIONES

Se estudiaron las emisiones de los dos gases principales de efecto invernadero de alta capacidad de calentamiento, metano (CH<sub>4</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O). En varios procesos de la producción agropecuaria se emiten cantidades significativas de estos gases. Siguiendo el procedimiento del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (PICC), analizamos los casos más relevantes: a) emisiones de N<sub>2</sub>O por aplicación de fertilizantes sintéticos; b) emisiones de N<sub>2</sub>O por aplicación de estiércol; c) emisiones de N<sub>2</sub>O por almacenamiento y manejo de estiércol; d) emisiones de CH<sub>4</sub> debidas a estiércol; e) emisiones de CH<sub>4</sub> debidas a fermentación entérica (digestión, en particular en rumiantes); f) emisiones de CH<sub>4</sub> debidas a anegamientos en cultivos de arroz.

Usando los datos primarios provistos por el PICC en el método Tier 1 (este es el nivel básico para el cálculo de emisiones sin conocer detalles), se desarrollaron ecuaciones para ser usadas en el cálculo específico de alimentos que contienen los productos agropecuarios estudiados, por unidad de producto que se quiere analizar. Esto es parte de un proyecto en el cual se desarrolla un programa para calcular emisiones de efecto invernadero en alimentos usuales. En el presente trabajo, se evalúan los gases N<sub>2</sub>O y CH<sub>4</sub> para producción de cereales en secano, arroz en sistema de anegamiento, y producción lechera y de carne bovina. Los valores obtenidos muestran que estos gases son relevantes en la producción animal y en arroz, y de emisiones mucho menores en cereales de secano y leguminosas. El estudio de la emisión de estos gases en agricultura y ganadería es importante para las evaluaciones de sustentabilidad y energías renovables, ya que una disminución en el uso de combustibles fósiles no implica necesariamente una disminución de estas emisiones.

## REFERENCIAS

- Breiling M. et al., 2005. Rice related greenhouse gases in Japan, variations in scale and time and significance for the Kyoto Protocol. *Paddy Water Environment* 3, 39-46
- Carlsson-Kanyama A., 1998. Climate change and dietary choices—how can emissions of greenhouse gases from food consumption be reduced? *Food Policy* 23 (3/4), 277-293
- Carlsson-Kanyama A. et al, 2003 Food and life cycle energy inputs: consequences of diet and ways to increase efficiency. *Ecological Economics* 44, 293-307
- CES, 2007. Centro de estadísticas de Suecia (Statistiska Centralbyrån). Agriculture, Forestry and Fishery, en [www.scb.se](http://www.scb.se)
- Engström R., Wadskog A., Finnveden G., 2007. Environmental assessment of Swedish agriculture. *Ecological Economics* 60, 550-563
- FAO, 2004a. Organización para la Agricultura y la Alimentación. Fertilizer use by crop in Argentina, en <ftp://ftp.fao.org/agl/agll/docs/fertuseargent.pdf>
- FAO, 2004b. International year of rice 2004: all about rice. <http://www.fao.org/rice2004/en/aboutrice.htm>
- Grag A., Shukla P.R., Kapshe M., 2006. 'The sectoral trends of multigas emissions inventory of India'. *Atmospheric Environment* 40 (24), 4608-4620
- INTA, 2007 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. [www.inta.gov.ar](http://www.inta.gov.ar)
- Minamikawa K., Sakai N. 2006. The practical use of water management based on soil redox potential for decreasing methane emission from paddy field in Japan. *Agriculture Ecosystems & Environment* 116, 181-188
- PICC, 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponible en <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.htm>
- PICC, 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Working Group I (ISBN 978 0521 70596-7). Disponible en <http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/wg1-report.html>
- Smil V., 2002. Eating meat: evolution, patterns, and consequences. *Population and Development Rev.* 28 (4), 599-639

**ABSTRACT:** The emission of methane and nitrous oxide in the agricultural sector has been studied. These greenhouse gases have a Global Warming Potential much higher than carbon dioxide itself. Following the procedure stated by the Intergovernmental Panel on Climate Change, product-oriented emission intensities have been obtained. The production of foods from animal origin and the cultivation of rice under water are the main sources of methane and nitrous oxide emissions. Several processes in animals and soils are responsible for the emissions: manure storage and management, enteric fermentation in ruminants, and methane emitted in flooded agricultural soils. The contribution of N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emissions from upland grains and legumes is found to be of less relevance.

**Keywords:** Climate change – N<sub>2</sub>O – CH<sub>4</sub> – Agriculture and livestock production