

## **PRÁCTICAS DE MANEJO DE LOS SUELOS AGRÍCOLAS COMO UNA ESTRATEGIA DE REDUCCIÓN DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO DE LOS BIOCOMBUSTIBLES**

**R. Piastrellini<sup>1,2</sup>, A. P. Arena<sup>1,2</sup>, B. M. Civit<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Grupo CLIOPE, Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Mendoza – Cnel. Rodríguez 273 – C. P. 5500 – Mendoza – Teléfono 54 261 5243001

<sup>2</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas – CCT – Mendoza – Avenida Ruiz Leal s/n  
C. P. 5500 – Localidad Mendoza – Mendoza – Teléfono 54 261 5244054  
roxana.ppp@gmail.com

*Recibido 15/08/13 aceptado 23/09/13*

**RESUMEN:** El objetivo del presente estudio es cuantificar la reducción de emisiones GEI resultantes de la implementación de diferentes prácticas agrícolas en el cultivo de soja destinada a la producción de biodiesel en la Argentina. Para ello se estimó el stock de C orgánico y las emisiones de N<sub>2</sub>O de suelos agrícolas para 5 escenarios de manejo, siguiendo las Directrices del IPCC (2006). Posteriormente se calcularon las emisiones totales de GEI utilizando como indicador el Potencial de Calentamiento Global (IPCC, 2007). Los resultados obtenidos muestran que la implementación de la siembra directa genera una reducción de emisiones del 23% en comparación con la labranza convencional. Así mismo, la adopción de un sistema de riego suplementario y las fertilizaciones adicionales generan importantes variaciones en los resultados. Se sugiere, por tanto, considerar la gestión del suelo como una oportunidad para disminuir las emisiones GEI de los cultivos bioenergéticos.

**Palabras clave:** emisiones de gases de efecto invernadero, biocombustibles y manejo de suelos agrícolas.

### **1 INTRODUCCIÓN**

Los mayores impactos de los biocombustibles obtenidos a partir de cultivos energéticos están asociados a la etapa agrícola (Arena *et al.*, 2010), siendo uno de los más relevantes el Calentamiento global. El Calentamiento global es una medida de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) resultantes de una actividad, expresadas en términos de kilogramos de CO<sub>2</sub> equivalentes. Diversos autores sostienen que los factores más importantes que contribuyen al Calentamiento global durante la producción de cultivos bioenergéticos son las emisiones provenientes de los suelos agrícolas (Adler *et al.*, 2007; Crutzen *et al.*, 2008), relacionadas con el cambio en el stock de carbono del suelo y con las emisiones de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) (Robertson, 2000; Adbiento, 2007).

El manejo de los suelos agrícolas modifica las existencias de carbono a través de prácticas como la fertilización, la irrigación, la incorporación directa de abonos orgánicos, la remoción de biomasa debido a las cosechas, los incendios, el pastoreo, la elección del cultivo y la intensidad de manejo del cultivo (IPCC, 2006). Estas modificaciones pueden ocurrir en distinto grado dependiendo de la forma en que las prácticas específicas influyan sobre las entradas y salidas del sistema suelo. Así mismo, las emisiones de N<sub>2</sub>O están íntimamente relacionadas con el uso de fertilizantes nitrogenados. Ciampitti y colaboradores (2005) afirman que la fertilización nitrogenada incrementa de manera significativa las emisiones de N<sub>2</sub>O en cultivos de soja.

En la Argentina, la siembra directa ha demostrado ser una alternativa viable a las prácticas de manejo convencionales permitiendo obtener una serie de beneficios como mejoras en la retención de agua, disminución del riesgo de erosión e incrementos en las existencias de carbono orgánico en el suelo (Alvarez y Steinbach 2009, Fernández *et al.* 2010).

De lo mencionado anteriormente se deduce que la incorporación de las prácticas de manejo del suelo en la cuantificación de las emisiones GEI es un componente importante en el perfil de impactos de los biocombustibles. El objetivo del presente estudio es cuantificar la reducción de emisiones GEI resultantes de la implementación de diferentes prácticas agrícolas en el cultivo de soja destinada a la producción de biodiesel en la Argentina.

### **2 OBJETIVOS Y ALCANCE DEL ESTUDIO**

El estudio se limita a la etapa de producción del grano de soja e incluye la fabricación y transporte de insumos y materias prima, las labores agrícolas de siembra, aplicación de agroquímicos y cosecha, las existencias de carbono orgánico del suelo y las emisiones directas e indirectas de óxido nitroso. La unidad funcional definida es de 1 kg de grano de soja destinado a la producción de biodiesel.

Se consideraron, en una primera etapa, dos escenarios de estudio: Sistema en Labranza Convencional (LC) y Sistema en Siembra Directa (SD). La SD consiste en la ausencia de labranzas y la presencia de una cobertura permanente del suelo, vía cultivos y rastrojos de cultivos anteriores. Este esquema permite producir sin degradar el suelo y alcanzar un uso más eficiente del agua. Por otro lado, la LC implica tareas mecanizadas de laboreo del suelo previas a la siembra, provocando que el suelo se invierta en forma total o parcial en sus primeros 15 cm. Este sistema facilita la mineralización de nutrientes y la reducción de plagas en superficie, pero también acelera los procesos de degradación de la materia orgánica y aumenta los riesgos de erosión.

En una segunda etapa del estudio se analizaron distintas variantes del sistema en SD incorporando diferentes prácticas orientadas a intensificar la producción, es decir incrementar el rendimiento del cultivo por unidad de superficie. Estas prácticas se estudiaron a través de los siguientes escenarios: sistema en SD con aplicación adicional de azufre como fertilizante (SD-S), sistema en SD con incrementos en la dosis total de fósforo aplicado como fertilizante (SD-P), y sistema en SD bajo riego suplementario (SD-RS). Estos escenarios implican incrementos del rendimiento del cultivo energético que oscilan en promedio entre el 14% y el 60% con respecto a un escenario base de SD, según los valores presentados por Donatto *et al* (2008) y los ensayos realizados en INTA Manfredi (Salinas *et al*, 2008) e INTA Pergamino (Ferraris *et al*, 2012).

Todos los escenarios de estudio se localizan geográficamente en la Región Pampeana Argentina, específicamente en el Sur de Santa Fe (SD y SD-S), Norte de Buenos Aires (SD-P), Centro de Córdoba (SD-RS) y Sudeste de Buenos Aires (LC). Esta Región pertenece a la clase climática Templado cálido seco, con suelos del orden Molisoles de textura arcillosa y alta actividad (IPCC, 2006).

### 3 INVENTARIO DE CICLO DE VIDA

#### *Insumos y materias prima*

Los agroquímicos vinculados a cada escenario se consideraron según una regla de corte de 2% en masa, es decir que no se incluyeron aquellos compuestos que representan un aporte en masa inferior al 2% del total de agroquímicos que ingresan al sistema. Tanto las dosis de agroquímicos como las cantidades requeridas de semilla de soja (Tabla 1) corresponden a promedios para cada zona de la región en estudio (Donatto *et al*, 2008; Martelloto *et al*, 2009; Ferraris *et al*, 2012).

Para el escenario SD-RS se incluyó un Manejo Integrado de Plagas (MIP) que implica la aplicación de tratamientos en función de los umbrales de plagas y enfermedades, y además un consumo de agua para riego de 954 m<sup>3</sup> por tonelada de grano (Civit *et al*, 2010), considerando el requerimiento hídrico del cultivo en base a las características fenológicas del cultivo, los datos climáticos de la Estación Experimental Agropecuaria INTA-Manfredi (latitud: 31°49'S, longitud: 63°46'W, altitud: 292 msnm) para un año promedio y una eficiencia de riego de 90%.

Con la finalidad de evaluar la influencia de la fabricación de agroquímicos en las emisiones GEI, se realizó un análisis adicional incorporando la energía contenida en los fertilizantes y pesticidas utilizados en los escenarios SD y LC. Para ello, los procesos de fabricación de agroquímicos se tomaron de la base de datos de Ecoinvent v2 (Jungbluth *et al*, 2007). Es importante destacar que la producción de semilla genéticamente modificada queda fuera de los límites del sistema.

Escenario	Sustancia	Cantidad (kg/UF)
LC	Inoculante + fungicida	6.80E-04
	Sencorex	4.60E-04
	Lorsban 48E	7.50E-04
	Acetoclor	1.00E-03
	Superfosfato triple	1.78E-02
	Semilla	2.29E-02
SD	Roundup	2.44E-03
	Inoculante + fungicida	6.80E-04
	Roundup Max	5.36E-04
	Lorsban 48E	7.50E-04
	Fosfato monoamónico	1.40E-02
	Semilla	2.25E-02
SD-S	Roundup Full	1.50E-03
	Azufre 15	2.62E-02
	Semilla	1.30E-02
SD-P	Roundup	2.07E-03
	Lorsban 48E	6.40E-04
	Superfosfato triple	3.00E-02
	Semilla	2.10E-02
SD-RS	Roundup	1.13E-03
	Inoculante + fungicida	5.73E-04
	Carbaryl	1.71E-03
	Fosfato diamónico	1.84E-02

Tabla 1: Tipo y dosis de agroquímicos considerados para cada escenario de estudio, según regla de corte de 2% en masa (datos de Donatto *et al*, 2008; Martelloto *et al*, 2009; Ferraris *et al*, 2012)

El combustible utilizado en las labores agrícolas se estimó considerando el consumo de diesel promedio de la maquinaria utilizada (Jungbluth *et al.*, 2007) y las tareas realizadas en cada sistema estudiado. Las labores consideradas son (Donatto *et al.*, 2008; Martelloto *et al.*, 2009, Ferraris *et al.*, 2012): 1 siembra, 1 fertilización, 6 pulverizaciones y 1 cosecha para los escenarios SD y SD-S; 1 siembra, 6 pulverizaciones, 4 fertilizaciones y 1 cosecha para SD-P; 1 siembra, 4 pulverizaciones, 1 fertilización y 1 cosecha para SD-RS; y 2 disco doble, 1 vibrocultivador, 1 siembra, 1 fertilización, 3 pulverizaciones y 1 cosecha para LC.

En el sistema SD-RS se consideró un equipo de riego con pivote central transportable, de 5 tramos y 1 voladizo, que riega una superficie de 32 ha. El agua es suministrada por una perforación, que posee una electrobomba sumergible, con una demanda de energía de 40 kWh, con un caudal extraído del pozo del orden de los 136 m<sup>3</sup> por hora y una eficiencia de aplicación del riego de 90% (Martelloto *et al.*, 2005).

#### Stock de carbono en suelos minerales

En el ciclo terrestre del carbono, el carbono orgánico del suelo (COS) representa la mayor reserva en interacción con la atmósfera (FAO, 2002). Los flujos entre el COS terrestre y la atmósfera pueden ser positivos bajo la forma de secuestro de C o negativos como emisión de CO<sub>2</sub>. El secuestro de COS constituye un importante componente en el ciclo de vida de la producción de biocombustibles, por lo que representa un punto clave en la determinación del potencial de reducción de emisiones GEI en relación a los combustibles fósiles (Anderson-Teixeira *et al.*, 2009).

La capacidad de los suelos para almacenar C depende de diversos factores tales como el tipo de suelo y las características climáticas de la región. Sin embargo, los factores más influyentes son el tipo de uso de la tierra y el manejo específico del suelo y del cultivo (FAO, 2002). El manejo del suelo puede ocasionar un efecto de liberación de CO<sub>2</sub> cuando se utilizan prácticas de labranza convencionales, o de acumulación de C orgánico cuando se aplican prácticas de labranza de conservación como la SD. Reicosky y colaboradores (1997) realizaron un estudio del efecto de diferentes cultivos y sistemas de labranza (convencional, cincel y labranza cero) sobre la emisión de CO<sub>2</sub> concluyendo que los mayores flujos hacia la atmósfera se generan debido a la aplicación de LC.

En el presente estudio, las existencias de C orgánico en suelos se estimaron según el método por defecto propuesto por el IPCC (2006), para un período de 1 año:

$$SOC = SOC_{ref} * F_{lu} * F_{mg} * F_i * A \quad (1)$$

Los cálculos de inventario (Tabla 2) incluyen las existencias de C de referencia (SOC<sub>ref</sub>) a 30 cm de profundidad para la región climática Templado cálido seco y un suelo arcilloso de alta actividad, el factor de cambio de existencias (F<sub>lu</sub>) para el tipo de uso de la tierra Cultivos anuales, el factor de gestión (F<sub>mg</sub>) que representa la principal práctica de manejo del suelo, el factor de aporte (F<sub>i</sub>) que representa los distintos niveles de aporte de C al suelo y la superficie del estrato (A).

Steinbach y Alvarez (2005) encontraron que sistemas bajo SD en la Región Pampeana producen incrementos promedios del C orgánico del suelo de 2,78 t C/ha comparados con sistemas bajo labranza con arado (disco o reja), coincidiendo con los valores estimados en el presente estudio para el cultivo de soja (30,40 t C/ha para SD y 33,44 t C/ha para LC).

Sistema	SOC <sub>ref</sub> (t C/ha)	F <sub>lu</sub>	F <sub>mg</sub>	F <sub>i</sub>	A (ha)	SOC (t C/ha)
LC	38	0.8	1	1	1	30.40
SD	38	0.8	1.1	1	1	33.44

Tabla 2: Datos de inventario para la estimación de las existencias de C orgánico de suelos manejados bajo un sistema de labranza convencional y de siembra directa (los valores de referencia fueron extraídos de IPCC, 2006)

#### Emisiones de óxido nitroso de suelos agrícolas

Los fertilizantes nitrogenados constituyen una de las principales fuentes de emisiones de N<sub>2</sub>O procedentes de los suelos agrícolas (IPCC, 2007). Se estima que alrededor de 1,5 Tg de N<sub>2</sub>O son liberados a la atmósfera anualmente, producto de la aplicación de fertilizantes, sin considerar los abonos animales ni la fijación biológica de nitrógeno (Houghton *et al.*, 1992). El N<sub>2</sub>O absorbe radiación infrarroja contribuyendo al efecto invernadero, y además reacciona con los radicales de oxígeno de la estratosfera para formar monóxido de nitrógeno, que participa en el agotamiento del ozono estratosférico.

Las emisiones de N<sub>2</sub>O generadas por incorporación antrópica o por mineralización de nitrógeno se producen por vía directa e indirecta. Las emisiones directas hacen referencia a los flujos que ocurren directamente desde los suelos a los que se agrega el nitrógeno. Las emisiones indirectas se producen por dos procesos: i) la volatilización de NH<sub>3</sub> y NO<sub>x</sub> provenientes de suelos gestionados, del uso de combustibles fósiles y del quemado de la biomasa, con la subsiguiente redeposición de estos gases y sus productos (NH<sub>4</sub><sup>+</sup> y NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) en suelos y fuentes de agua; y (ii) la lixiviación y el escurrimiento del nitrógeno de suelos gestionados, principalmente como NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

Las emisiones de N<sub>2</sub>O de suelos gestionados fueron estimadas según las Directrices del IPCC (2006), por ser el enfoque más aceptado en los estudios de ACV de biocombustibles (Cherubini *et al*, 2009). Esta metodología supone una relación lineal entre los ingresos de nitrógeno al sistema y las emisiones de N<sub>2</sub>O, incluyendo además los residuos de cosecha, la lixiviación y las pérdidas de amoníaco (IPCC, 2007). La ecuación 2 se utilizó para estimar las emisiones directas y las ecuaciones 3 y 4 para las emisiones indirectas relacionadas a la volatilización y a los procesos de lixiviación y escurrimiento, evaluando los valores por defecto de los factores de emisión que propone la guía:

$$N_2O - N_{dir} = (F_{sn} + F_{on} + F_{cr} + F_{som}) * E_{f1} \quad (2)$$

El valor de  $N_2O - N_{dir}$  representa las emisiones directas anuales de N<sub>2</sub>O-N producidas a partir de suelos gestionados expresadas en kg N<sub>2</sub>O-N/año,  $F_{sn}$  es la cantidad anual de nitrógeno aplicado a los suelos en forma de fertilizante sintético,  $F_{on}$  es la cantidad anual de estiércol animal, compost, lodos cloacales y otros aportes de nitrógeno aplicados a los suelos,  $F_{cr}$  es la cantidad anual de nitrógeno en los residuos agrícolas (aéreos y subterráneos), incluyendo los cultivos fijadores de nitrógeno y la renovación de forraje/pastura,  $F_{som}$  es la cantidad anual de nitrógeno que se mineraliza, relacionada con la pérdida de C del suelo como resultado de cambios en el uso o la gestión de la tierra, y  $E_{f1}$  representa al factor de emisión para emisiones de N<sub>2</sub>O directas.

En la ecuación 3,  $N_2O - N_{ind-vol}$  representa la cantidad anual de N<sub>2</sub>O-N producida por deposición atmosférica de nitrógeno volatilizado de los suelos gestionados, expresada en kg anuales de N<sub>2</sub>O-N,  $Frac_{gasf}$  es la fracción de nitrógeno contenida en los fertilizantes sintéticos que se volatiliza como NH<sub>3</sub> y NO<sub>x</sub>,  $F_{prp}$  es la cantidad anual de nitrógeno proveniente de la orina y el estiércol de animales de pastoreo,  $Frac_{gasm}$  es la fracción de nitrógeno proveniente de fertilizantes orgánicos y de la orina y el estiércol que se volatiliza como NH<sub>3</sub> y NO<sub>x</sub>, y  $E_{f4}$  es el factor de emisión correspondiente a las emisiones de N<sub>2</sub>O por volatilización. En la ecuación 4,  $N_2O - N_{ind-lix/esc}$  representa la cantidad anual de N<sub>2</sub>O-N producida por lixiviación y escurrimiento de agregados de nitrógeno a suelos gestionados, expresada en kg N<sub>2</sub>O-N por año,  $Frac_{lix}$  es la fracción de nitrógeno agregado/mineralizado en regiones donde se produce lixiviación/escurrimiento, y  $E_{f5}$  es el factor de emisión para emisiones de N<sub>2</sub>O por lixiviación y escurrimiento de nitrógeno.

$$N_2O - N_{ind-vol} = (F_{sn} * Frac_{gasf}) + ((F_{on} + F_{prp}) * Frac_{gasm} * E_{f4}) \quad (3)$$

$$N_2O - N_{ind-lix/esc} = (F_{sn} + F_{on} + F_{prp} + F_{cr} + F_{som}) * Frac_{lix} * E_{f5} \quad (4)$$

Las emisiones totales de N<sub>2</sub>O provenientes de suelos cultivados con soja en la región de estudio alcanzan valores entre 0,21 y 0,28 kg por tonelada de grano (Tabla 3), dependiendo del tipo y dosis de fertilizante nitrogenado aplicado en los diferentes escenarios (Tabla 1). Las emisiones directas de N<sub>2</sub>O superan ampliamente a las emisiones indirectas, independientemente de las prácticas de manejo implementadas, representando al menos el 80% de las emisiones totales. Las pérdidas por volatilización representan valores inferiores al 10% del total de emisiones indirectas.

Sistema	Emisiones directas de N <sub>2</sub> O (kg N <sub>2</sub> O/kg soja)	Emisiones indirectas de N <sub>2</sub> O (kg N <sub>2</sub> O/kg soja)		Total de emisiones N <sub>2</sub> O (kg N <sub>2</sub> O/kg soja)
		Volatilización	Lixiviación/escurrimiento	
SD	2.69E-04	2.71E-06	6.06E-05	3.33E-04
LC	2.56E-04	0.00E+00	5.77E-05	3.14E-04
SD-S	2.12E-04	0.00E+00	4.78E-05	2.60E-04
SD-P	2.30E-04	0.00E+00	5.18E-05	2.82E-04
SD-RS	2.79E-04	5.73E-06	6.27E-05	3.47E-04

Tabla 3: Emisiones directas e indirectas de N<sub>2</sub>O para un cultivo de soja en la región Pampeana Argentina, expresadas en kgN<sub>2</sub>O/kg de soja bajo diferentes prácticas de manejo del suelo (valores estimados según IPCC, 2006)

### Potencial de Calentamiento Global

El Potencial de Calentamiento Global (Global Warming Potential, GWP) establece el efecto de calentamiento global relativo de un GEI específico con respecto al CO<sub>2</sub> (que se utiliza como referencia) en un período de tiempo determinado (IPCC, 2007). Representa el efecto combinado de los diferentes períodos de permanencia de cada GEI en la atmósfera y su eficacia relativa en la absorción de la radiación infrarroja. Luego, los equivalentes individuales pueden agregarse para obtener un indicador de gases invernadero.

El indicador global de gases de efecto invernadero para el cultivo de soja se calculó con la metodología sugerida por el IPCC (2007), en base a la cantidad de cada GEI emitido por Unidad funcional y al potencial de efecto invernadero por cada kg de GEI, considerando un horizonte temporal de 100 años:

$$GWP = \sum_i GWP_i * m_i \quad (5)$$

Donde,  $GWP$  se expresa en kg de  $\text{CO}_2$  equivalentes,  $GWP_i$  es el Potencial de Calentamiento Global del compuesto  $i$ , y  $m_i$  es la masa del compuesto  $i$  expresada en kg.

#### 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las emisiones GEI resultantes de la producción de soja como cultivo energético alcanzan valores de 0,224 kg  $\text{CO}_2$  equivalentes por kg de grano para el sistema en LC, y de 0,167 kg  $\text{CO}_2$  equivalentes por kg de grano para el sistema en SD analizado (Fig. 1). Estos resultados indican una reducción de emisiones GEI de aproximadamente un 25% al implementar prácticas de labranza cero, debidas principalmente a consumos menores de combustibles fósiles para la operación de la maquinaria agrícola. El impacto asociado a la labranza en el escenario LC representa alrededor del 40% del impacto total de las labores agrícolas.

Por otro lado, el incremento en la tasa de captura de C que ocurre en el escenario SD conlleva a una reducción en la liberación de emisiones de  $\text{CO}_2$  del orden del 53% con respecto al escenario LC. Sin embargo, las emisiones asociadas al secuestro de C sólo representan el 2-2,5% de las emisiones de  $\text{CO}_2$  en ambos sistemas.

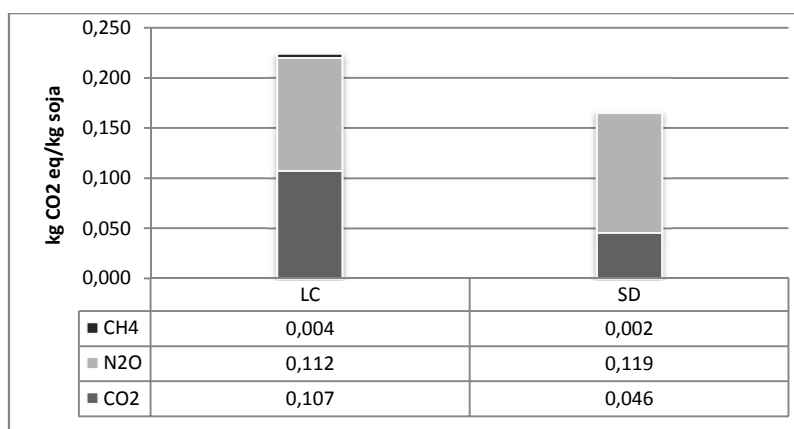


Figura 1: Emisiones de gases de efecto invernadero del cultivo de soja destinado a la producción de biodiesel, para sistemas agrícolas en labranza convencional (LC) y en siembra directa (SD).

Al incorporar en el análisis diferentes prácticas de manejo bajo SD (Fig. 2) se observa que la fertilización con azufre resulta ser el escenario menos impactante desde el punto de vista del calentamiento global debido a que no se utilizan fertilizantes nitrogenados. Esta práctica ocasionaría una reducción de las emisiones de  $\text{N}_2\text{O}$  en aproximadamente un 25% con respecto al escenario base de SD. Así mismo, en el escenario SD-F las emisiones de  $\text{N}_2\text{O}$  se reducirían en un 15% con respecto al escenario de SD. La diferencia en las emisiones totales de GEI de los escenarios SD-S y SD-F radica en los distintos rendimientos de grano obtenidos en cada caso (4500 kg/ha y 3300 kg/ha, respectivamente).

Por otro lado, la implementación de riego suplementario incrementa el impacto de calentamiento global en un 27% con respecto al escenario base de SD, debido a aumentos importantes en las emisiones de  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$  de origen fósil. Esto puede explicarse por el consumo de energía eléctrica requerida para el funcionamiento del sistema de riego.

El valor de emisiones GEI estimado por Unidad funcional para el sistema SD (167 g  $\text{CO}_2$  eq./kg soja) resulta ser sólo un 8,7% inferior a los 183 g  $\text{CO}_2$  eq./kg obtenidos por la Unión Europea para el cultivo de soja en la Argentina (Croezen *et al*, 2008) utilizando los valores por defecto publicados en la Directiva 2009/30/CE del Parlamento Europeo (RED). Sin embargo, para los sistemas SD-F y SD-S el porcentaje de reducción de emisiones del cultivo de soja resulta ser de 23,5% y 34,4% respectivamente en relación al valor europeo. La RED establece un porcentaje de reducción teórico de GEI que deben acreditar como mínimo los biocombustibles con relación al combustible fósil que sustituyen. Dicho porcentaje, en la actualidad, corresponde al 35%. Sin embargo, con los resultados presentados por la Comisión Europea, el porcentaje de reducción para el biodiesel de soja es de 31%, posicionándolo por debajo de la meta de reducción. Esto pone de manifiesto la importancia de incorporar en el cálculo datos de inventario y factores de emisión que respondan a las prácticas regionales de manejo del suelo.

En la figura 3 se observa que al realizar una equivalencia de los valores calculados en función de la unidad de superficie (1 ha), el escenario con mayores emisiones GEI resulta ser el SD-RS, a pesar de que no presenta el mayor rendimiento productivo de los sistemas estudiados (3800 kg/ha). Esto refuerza la idea de que la variable más influyente en el sistema SD-RS es la energía utilizada para el riego a diferencia del resto de los sistemas en SD, en los cuales el rendimiento del cultivo presenta un peso importante en los resultados.

Es importante destacar que en todos los escenarios que incluyen SD, el GEI de mayor relevancia es el  $N_2O$ , mientras que en el escenario de LC resulta ser el  $CO_2$  de origen fósil. En términos generales, las emisiones de  $N_2O$  incrementan en los sistemas que incluyen mayores dosis de fertilizantes nitrogenados, y las emisiones de  $CO_2$  y  $CH_4$  aumentan en la medida que se adoptan labores agrícolas con elevados requerimientos de combustible y energía. Los procesos relacionados al secuestro de C orgánico en suelos no implican grandes reducciones de las emisiones GEI.

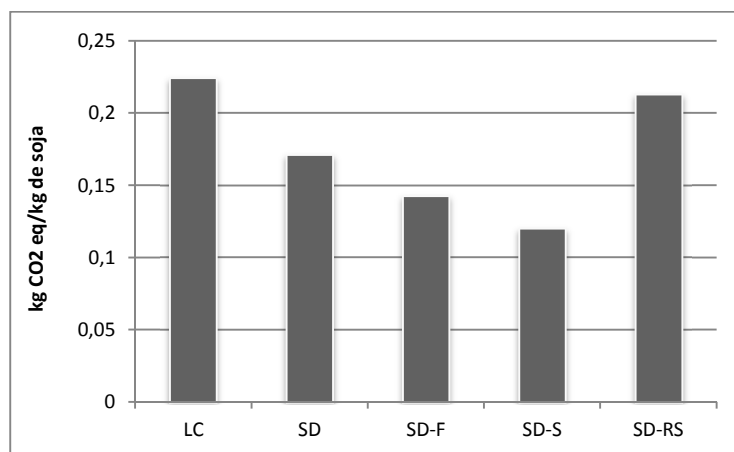


Figura 2: Emisiones de gases de efecto invernadero para 1 kg de grano de soja bajo diferentes prácticas de manejo del suelo. LC: labranza convencional, SD: siembra directa, SD-F: siembra directa con agregado de fertilizantes fosforados, SD-S: siembra directa con agregado de azufre, SD-RS: siembra directa bajo riego suplementario.

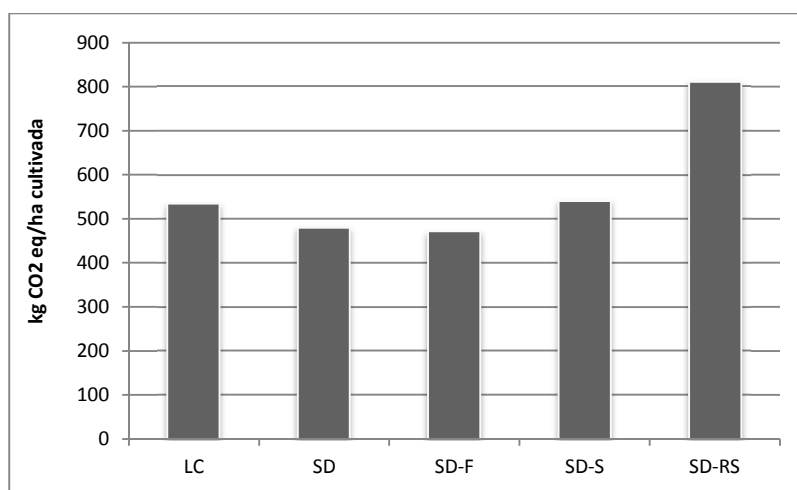


Figura 3: Emisiones de gases de efecto invernadero para 1 ha cultivada con soja bajo diferentes prácticas de manejo del suelo. LC: labranza convencional, SD: siembra directa, SD-F: siembra directa con agregado de fertilizantes fosforados, SD-S: siembra directa con agregado de azufre, SD-RS: siembra directa bajo riego suplementario.

Los resultados presentados hasta ahora en este trabajo no incluyen la fabricación de agroquímicos. La Tabla 4 muestra que esta consideración tiene una gran influencia en las emisiones GEI. La energía contenida en los agroquímicos del sistema SD ocasiona incrementos mayores al 150% en las emisiones de  $CO_2$ , y al 200% en las emisiones de  $CH_4$  con respecto al escenario base de SD que no los considera. Estos incrementos también se manifiestan en el escenario LC, pero en menor medida (del orden del 40-50%). En este sentido, los agroquímicos que ocasionan mayor impacto son el glifosato (44%) y el fosfato monoamónico (38%) para el escenario SD, y el superfosfato triple (63%) para el escenario LC.

Sustancia	Siembra Directa		Labranza Convencional	
	sin fabricación de agroquímicos	con fabricación de agroquímicos	sin fabricación de agroquímicos	con fabricación de agroquímicos
CO <sub>2</sub>	0.046	0.118	0.107	0.151
N <sub>2</sub> O	0.119	0.119	0.112	0.113
CH <sub>4</sub>	0.002	0.006	0.004	0.006
Total	0.167	0.244	0.224	0.271

Tabla 4: Emisiones GEI del cultivo de soja destinado a la producción de biodiesel (en kg CO<sub>2</sub> eq/kg grano), para sistemas agrícolas en labranza convencional (LC) y en siembra directa (SD), considerando la fabricación de agroquímicos dentro de los límites del sistema.

## 5 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que las prácticas de manejo de los suelos agrícolas influyen en gran medida en el potencial de calentamiento global del biodiesel de soja obtenido en la Argentina. Se destaca que no necesariamente los sistemas que incluyen siembra directa disminuyen las emisiones GEI por unidad de superficie, y que el escenario menos beneficioso desde el punto de vista del calentamiento global resulta ser el sistema que incorpora riego suplementario (a pesar de que la adición de agua permita incrementar el rendimiento del grano).

Con respecto a los fertilizantes nitrogenados, los resultados reflejan su importante contribución a las emisiones de N<sub>2</sub>O provenientes de los suelos agrícolas. El agregado de azufre y el incremento de las dosis de fósforo como fertilizantes podrían ser opciones de manejo apropiadas para disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> eq en el cultivo de soja. Sin embargo, se recomienda realizar un estudio complementario que evalúe otros impactos como la acidificación, la eutrofización y la ecotoxicidad, asociados a la liberación de estas sustancias a la atmósfera, el suelo y a los cursos de agua.

Teniendo en cuenta el importante incremento de emisiones GEI obtenido al incorporar la energía asociada a la fabricación de los agroquímicos, se sugiere analizar diferentes alternativas en cuanto al tipo de fertilizantes y pesticidas susceptibles de ser aplicados al cultivo de soja en la región de estudio, con el fin de evitar los efectos indeseados.

Es indispensable incorporar en el cálculo de emisiones GEI, las prácticas de manejo agrícola propias de cada región y de cada sistema considerado, así como adoptar criterios comunes de evaluación del impacto de calentamiento global. Las modificaciones en la definición del alcance y de los límites del sistema ocasionan variaciones importantes en los resultados, al punto de reducir de manera apreciable los beneficios de la siembra directa en relación a una labranza convencional.

Se sugiere la consideración de la gestión del suelo como una oportunidad de disminuir las emisiones GEI, no solo de los cultivos bioenergéticos sino de los diferentes productos agrícolas que se desarrollan en la región.

## REFERENCIAS

- Adler, P., Stephen, R., Del Grosso, J. and Parton, W.J. (2007). 'Life-Cycle Assessment of Net Greenhouse-Gas Flux for Bioenergy Cropping Systems.' *Ecological Applications*, 17(3), 675-691.
- Adviento-Borbe, M.A.A. (2007). Soil greenhouse gas fluxes and global warming potential in four high-yielding maize systems. *Global Change Biology* 13 (9), 1972-1988.
- Álvarez, R. and Steinbach, H. (2009). A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crop yields in the Argentine Pampas. *Soil & Tillage Research*, 104, 1-15
- Anderson-Teixeira, K., Davis, S., Masters, M., Delucia, E. (2009). Changes in soil organic carbon under biofuel crops. *GCB Bioenergy* 1, 75-96.
- Arena, P., Piastrellini, R., Cuccia, S., Novello, E., Civit, B. (2010). Perfil ambiental de la producción de biodiesel en la Región Pampeana Norte de Argentina. *Actas del II Congresso Brasileiro em Gestao do Ciclo de Vida*. Florianópolis, Brasil.
- Cherubini, F., Bird, ND., Cowie, A., Jungmeier, G., Schlamadinger, B., Woess-Gallasch, S. 2009. Energy- and greenhouse gas-based LCA of biofuels and bioenergy systems: key issues, ranges and recommendations. *Resources, Conservation and Recycling*, 53 (8), 434-447.
- Ciampitti, I., Ciarlo, E., Conti, M.E. (2005). Emisiones de óxido nitroso en un cultivo de soja [*Glycine max* (L.) Merrill]: efecto de la inoculación y de la fertilización nitrogenada. *Ci. Suelo* (Argentina) 23 (2), 123-131.
- Civit, B.M., Arena, A.P., Piastrellini, R., Curadelli, S., Silva Colomer, J. (2010). Comparación entre la Huella hídrica el biodiesel obtenido a partir de aceite de colza y aceite de soja. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 15, 127-134.
- Croezen, H., Kampman, B. 2008. Calculating greenhouse gas emissions of EU biofuels. An assessment of the EU methodology proposal for biofuels CO<sub>2</sub> calculations. Delft, CE Delft, October 2008.
- Crutzen, P.J., Mosier, A.R., Smith, K.A. and Winiwarer W. 2008. 'N<sub>2</sub>O Release from Agro-Biofuel Production Negates Global Warming Reduction by Replacing Fossil Fuels.' *Atmospheric Chemistry and Physics*. 8, 389-395.
- Donato, L., Huerga, I., Hilbert, A (2008) Balance energético de la producción de biodiesel a partir de aceite de soja en la republica argentina. INTA Report, 2008, N° Doc. IIR-BC-INF-08-08. <http://inta.gob.ar/documentos/balance-energetico->

de-la-produccion-de-biodiesel-a-partir-de-soja-en-la-republica-argentina-1/at\_multi\_download/file/bc-inf-08-balance\_energetico.pdf.

- FAO - Food Agricultural Organization. (2002). Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Informes sobre recursos mundiales de suelos. 96. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma, 76 p.
- Fernández, R., Quiroga, A., Zoratti, C. and Noellemeier, E. (2010). Carbon contents and respiration rates of aggregate size fractions under no-till and conventional tillage. *Soil & Tillage Research*, 109, 103-109.
- Ferraris, G.N., Couretot, L.A., Urrutia, J. (2012). Fertilización fosforo-azufrada en soja. Estrategias de dosis, localización y momentos de aplicación. INTA Pergamino. Proyecto Regional Agrícola CRBAN. [http://inta.gob.ar/documentos/fertilizacion-fosforo-azufrada-en-soja.-estrategias-de-dosis-localizacion-y-momento-de-aplicacion/at\\_multi\\_download/file/Fertilizaci%C3%B3n\\_f%C3%B3sforo\\_azufrada\\_soja2012.pdf](http://inta.gob.ar/documentos/fertilizacion-fosforo-azufrada-en-soja.-estrategias-de-dosis-localizacion-y-momento-de-aplicacion/at_multi_download/file/Fertilizaci%C3%B3n_f%C3%B3sforo_azufrada_soja2012.pdf).
- Houghton, J. T., Callander, B. A., & Varney, S. K. (Eds.). (1992). *Climate Change 1992: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment: [combined with Supporting Scientific Material]*. Cambridge University Press. Zinn YL, Lal R, Resck DVS (2005) Changes in soil organic carbon stocks under agriculture in Brazil. *Soil and Tillage Research*, 84, 28-40.
- IPCC. (2006). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. y Tanabe K. (eds). Publicado por: IGES, Japón.
- 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*. Cambridge, UK.
- Jungbluth N, Faist Emmenegger M, Dinkel F, Stettler O, Doka G, Chudacoff M, Dauriat A, Gnansounou E, Sutter J, Spielmann M, Kljun N, Schleiss K (2007). Life cycle inventories of bioenergy. Data v2.0 (2007), ecoinvent report No. 17, Swiss Center for Life Cycle Inventories, Uster.
- Martelloto, E; Salinas, A; Lovera, E (2009) El riego suplementario en cultivos extensivos. XVII Congreso AAPRESID: "La era del ecoprogreso", 2009, August, 19-21.
- Martelloto, E; Salinas, A; Lovera, E; Salas, P; Álvarez, C; Giubergia, J; Lingua, S (2005). Inventario y caracterización del riego suplementario en la provincia de Córdoba. Riego presurizado Pívor central. INTA, Boletín N°10. 2005, August.
- Reicosky, D.C, Dugas, W.A., Torbert, H.A. (1997). Tillage - induced soil carbon dioxide loss from different cropping systems. *Soil Till. Res.* 41, 105-118.
- Robertson, G.P. 2000. Greenhouse gases in intensive agriculture: Contributions of individual gases of the radiative forcing of the atmosphere. *Science* 289:1922-1925.
- Salinas, A., Martellotto, E., Giubergia, J. P., Álvarez, C., Lovera E. (2008). Soja: Evaluación de Cultivares con Riego Suplementario. <http://www.elsitioagricola.com/articulos/salinas/Soja%20-%20Evaluacion%20Cultivares%20Riego%20Suplementario%202008.asp>
- Steinbach, H. y Alvarez, R. (2005). Cambios en los contenidos de carbono de los suelos pampeanos por introducción de la siembra directa. *INFOPOS Informaciones Agronómicas*, 25, 16-23.

## ABSTRACT

The aim of this study is to quantify GHG emission reductions resulting from the implementation of different agricultural practices in growing soybeans for the production of biodiesel in the Argentina. We estimated the stock of organic C and N<sub>2</sub>O emissions from agricultural soils for five management scenarios, following the IPCC Guidelines (2006). Then we calculated the total greenhouse gas emissions as indicator Global Warming Potential (IPCC, 2007). The results show that the implementation of conservation tillage practices generates an emission reduction of 23% compared to conventional tillage. Furthermore, the adoption of supplementary irrigation and additional fertilizations generate significant variations in the results. It is suggested, therefore, to consider land management as an opportunity to reduce GHG emissions from bioenergy crops.

**Keywords:** emissions of greenhouse gases, biofuels, agricultural soil management.