



Huella de carbono de rotaciones agrícolas con fines bioenergéticos: evaluación de cultivos anuales y perennes

Foto: Guillermo Siri-Prieto

Mauricio Bustamante

Ing. Agr. (MSc). Profesor Ayudante de la Fagro. Departamento de Producción Vegetal. EEMAC –Universidad de la República. mauriciobs_22@hotmail.com

Guillermo Siri-Prieto

Ing. Agr. (PhD). Profesor Agregado de la Fagro. Departamento de Producción Vegetal – EEMAC - Universidad de la República. siriprieto@fagro.com

Leonidas Carrasco-Letelier

Lic. (PhD). Investigador Adjunto. INIA La Estanzuela. Recursos hídricos y su ordenación; Ciencia del suelo. lcarrasco@inia.org.uy

INTRODUCCIÓN

Las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI) han aumentado 40 % desde el año 2000. La producción de biomasa para generar bioenergía permitiría reducir las emisiones de GEI. Diferentes materias primas han sido evaluadas para producir bioenergía, sin embargo, es necesario considerar los beneficios y daños ambientales asociados. Reducciones significativas de emisiones de GEI han sido cuantificadas en la producción y uso de biocombustibles en sustitución de combustibles fósiles (Fazio and Monti 2011). Hay evidencia de que los cultivos perennes lignocelulósicos producen una mayor productividad medida en materia seca, menos erosión del suelo, menores demandas de insumos y, así, costos energéticos asociados menores (Lewandowski and Schmidt 2006). Por otro lado, varios estudios han tratado de cuantificar los efectos que genera el retiro de residuos del suelo para uso bioenergético y su impacto en el balance de GEI (Liska *et al.* 2014). Como parte del marco de sostenibilidad de la Unión Europea (UE) para la producción y uso de biocombustibles, la Directiva de Energía Renovable de la UE (RED) determina los requisitos mínimos de emisión de GEI que deben cumplirse de manera obligatoria. Más detalladamente, el Reglamento 2018/841/CE determina que a partir de 2018 el ahorro de emisiones de GEI será al menos del 60 % para biocombustibles. Esta regulación también determina la cuantificación del cambio en el uso del suelo y la pérdida de erosión del suelo en el balance de GEI.

La reducción comprometida de emisiones de GEI por el protocolo de Kyoto y el Acuerdo de París, condujo a una política de estado de largo plazo en el Uruguay para diversificar su matriz energética a través de la incorporación de energías renovables. Mientras que en el periodo 1990-2007 solo el 20 % de la energía provino de fuentes renovables, en 2017 alcanzó el 43 %, disminuyendo el uso de petróleo en un 25 %. Históricamente en el Uruguay ha habido una gran área destinada a la agricultura basada fundamentalmente de cultivos de invierno (trigo y cebada) así como cultivos de verano (maíz, sorgo, soja entre otros). Este sistema de producción, que a través del tiempo a veces a rotado con pasturas, implica la cosecha del grano pero siempre dejando los residuos de los cultivos en el sistema (incorporado con laboreo convencional o usado como sistema de siembra directa en la superficie). Es decir que hasta ahora no se ha planteado retirar esos residuos de cultivos para la utilización para energía (rara vez se usa para alimentación de animales como fardos). Por lo tanto, el desarrollo de cultivos para bioenergía y/o uso de residuos de cultivos es escaso en Uruguay y existe casi nula información sobre su sostenibilidad ambiental. Basado en los antecedentes anteriores, es posible proponer como hipótesis la evaluación de diferentes sistemas agrícolas con mayor intensidad del uso del suelo tendrán una menor emisión de GEI. Por lo tanto se estimaron las huellas de carbono de cuatro rotaciones de cultivos con diferentes grados de intensidad del uso del suelo o retiro de residuos en un experimento de largo plazo (ELP) ubicado en la Estación Experimental «Mario A. Cassinoni» (EEMAC). Las rotaciones de cultivo evaluadas son: rotación maíz-trigo-sorgo con y sin retiro de residuos (MTS-R y MTS); monocultivo de sorgo dulce (SD) con cobertura invernal y un monocultivo perenne de switchgrass (SW).

La información agronómica utilizada pertenece a un ELP ubicado en la EEMAC, Paysandú, que se inició en el verano de 2008 y presentó un uso previo del suelo con una rotación agrícola de trigo-soja-maíz realizada entre los años 2003-2007. El experimento se encuentra sobre un Brunosol Éútrico Típico de la Unidad San Manuel con una profundidad de 40 - 90 cm y una pendiente promedio dentro del ensayo de 1%. Se evaluaron: una rotación de cultivos de grano, compuesta por la secuencia maíz-trigo-sorgo-barbecho químico; con dos niveles de remoción de residuos de cultivos (0 y 80 %) para todos los cultivos. Ambos tratamientos están desfasados en el tiempo para que todos los años estén presentes todos los cultivos de cada rotación. El tratamiento continuo de sorgo dulce incluye avena (*Avena sativa*) como cultivo de cobertura para reducir la erosión del suelo. El cuarto tratamiento es Switchgrass, un cultivo lignocelulósico perenne plantado en 2008 y cosechado cada año durante el invierno. Los rendimientos de los cultivos (grano, residuos, biomasa total) corresponden a los valores medios de las mediciones de campo de ocho años (2009-2016). En los sistemas agrícolas para grano, el rendimiento total (materia seca o etanol) corresponde a la suma del rendimiento de cada cultivo (grano o residuo) en la rotación del cultivo.

Tabla 1. Tratamientos evaluados en el ensayo de largo plazo instalado en la EEMAC (2009-2016).

Tratamientos	Cultivo Cobertura	Retiro de Residuos (%)
Maíz-Trigo-Sorgo (MTS)	No	0
Maíz-Trigo-Sorgo (MTS-R)	No	80
Sorgo Dulce (Sd)	Si	80
Switchgrass (Sw)	No	80

Para los cultivos anuales se utilizó siembra directa con un barbecho previo con herbicidas mientras que en el cultivo de switchgrass se realizó laboreo convencional. En switchgrass las actividades e insumos de las etapas de preparación de suelo y siembra se hicieron solo en el año de establecimiento del cultivo por lo que todas las entradas y emisiones asociadas a este periodo fueron amortizadas en un periodo de ocho años. Densidades de siembra recomendadas fueron utilizadas para todos los cultivos. Las fertilizaciones fosfatadas se realizaron al momento de la siembra con diferentes dosis según el cultivo utilizándose como fuente fosfato diamónico (18% N-46% P). En cuanto a las fertilizaciones nitrogenadas, las mismas se realizaron en etapa de post siembra variando las dosis según cultivo y utilizando urea (46% N) como fertilizante.

Se realizó una estimación de la emisión de GEI para calcular una huella de carbono utilizando los criterios definidos por la Normas ISO 14064. La estimación de GEI tuvo en cuenta las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), y óxido nitroso (N₂O). El potencial de calentamiento global (GWP) fue 1, 25, y 265 para CO₂, CH₄ y N₂O, respectivamente. La unidad funcional utilizada para los sistemas fueron las emisiones por unidad de área expresada en CO_{2-eq} ha⁻¹ y las emisiones por litro de etanol, expresadas en CO_{2-eq} L⁻¹ etanol. El inventario para el cálculo de las emisiones comprendió las fases de preparación de campo, siembra, post-siembra, cosecha y transporte a una planta de producción de bioenergía ubicada a 100 km. Se utilizaron ocho años de información de rendimientos de cultivos de grano y de residuos de los cultivos anuales y de switchgrass (2009-2016).

Las pérdidas de carbono por erosión fueron estimadas con el software Erosión 6.0 basado en la combinación de los modelos validados y calibrados para Uruguay (USLE-RUSLE). Este modelo estimó la erosión para las condiciones del ELP. Las tasas de erosión obtenidas para cada sistema fueron expresadas en Mg ha⁻¹ año⁻¹ y multiplicadas por un factor de enriquecimiento de materia orgánica que permitió obtener el contenido de SOC perdido por erosión. Los cambios de stock de carbono del suelo por cambios en el uso del suelo fueron estimados con el modelo AMG (Andriulo *et al.* 1999). Se consideró el rendimiento en grano de cada cultivo y la producción de biomasa total derivado del índice de cosecha; la biomasa radicular estimada como un 18 % de la biomasa aérea; la concentración de carbono en los residuos como un 40 % y el carbono del suelo (COS) inicial el cual se obtuvo a través de análisis de suelo. Para switchgrass se utilizó una tasa de secuestro de COS de 0,4 Mg ha⁻¹ año⁻¹

RENDIMIENTOS DE LA PRODUCCIÓN DE GRANO Y BIOMASA Y ETANOL

Switchgrass logró los mayores rendimientos de materia seca y etanol, con valores de 15,0 Mg ha⁻¹ año⁻¹ y 4263 L ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente (Tabla 2). El rendimiento de etanol producido por SW fue seguido por MTS-R con 3104 L ha⁻¹ año⁻¹. Como es de esperar, al considerar la producción de etanol sólo a partir del grano producido (6.08 Mg ha⁻¹ año⁻¹), la rotación MTS produjo menos etanol (2128 L año⁻¹ ha⁻¹). Por otro lado, la cosecha de residuos de cultivos, al aportar un 58 % más de materia seca, incrementó la producción de etanol en 46 %. La rotación con cultivos para grano (MTS) debería de rendir el doble en grano para igualar la producción de etanol del mejor tratamiento (SW). Si a este sistema de grano además le utilizamos los residuos, con un aumento de la productividad del 25 %, estaría igualando el tratamiento del SW.

Tabla 2. Rendimiento en materia seca (Mg ha⁻¹) y etanol (L ha⁻¹ yr⁻¹) de los sistemas.

	Rendimiento Materia Seca (Mg ha ⁻¹ yr ⁻¹)			Rendimiento Etanol (L ha ⁻¹ año ⁻¹)		
	Grano	Biomasa*	Total			
MTS	6.08		6.08	c	2128	c
MTS-R	5.86	3.75	9.62	b	3104	b
Sd		9.30	9.30	b	1861	c
Sw		15.22	15.22	a	4263	a

Medias con igual letra no difieren estadísticamente entre sí (p < 0,05)

*Biomasa total para SW y SD, residuos para MTS-R,

¿CUÁNTO CO₂ EMITE CADA SISTEMA?

Las emisiones netas de CO₂ de los diferentes sistemas (Tabla 3) mostraron tres perfiles de emisión: baja emisión en SW; emisión media para la rotación de cultivos MTS; y altas emisiones para la rotación de cultivos SD y MTS-R; con 619, 3162, 4703 y 5078 kg de CO_{2-eq} (ha año)⁻¹, respectivamente. Las emisiones equivalentes de CO₂ expresadas por rendimiento de etanol identificaron tres grupos principales: bajas emisiones, para cultivos SW (0,18 kg CO_{2-eq} L⁻¹ etanol), emisiones medias para MTS y MTS-R con valores de 1,60 y 1,70 kg CO_{2-eq} L⁻¹ etanol, respectivamente, y altas emisiones de SD (2,84 kg CO_{2-eq} L⁻¹ etanol). Sin embargo, cuando las emisiones se expresaron por hectárea, las emisiones de MTS-R fueron un 60 % más altas que las del sistema de cultivo MTS. El ahorro de emisiones de GEI según RED (2009/28/EC) fue de 89,7 % para SW. Los sistemas de cultivo anuales presentan 9,3 y 3,4 % de reducción para MTS y MTS-R, respectivamente, Sin embargo, SD presentó un incremento de las emisiones de GEI del 60 % en comparación con los combustibles fósiles.

Tabla 3. Emisiones netas totales de CO₂ por hectárea y por litro de etanol para los diferentes sistemas agrícolas.

Sistema	kg CO _{2-eq} ha ⁻¹ año ⁻¹	kg CO _{2-eq} L ⁻¹ etanol	Reducción GHG (%)*
	MTS	3,162	
MTS-R	5,078	1.70 b	-3.4
Sd	4,703	2.84 a	61.1
Sw	619	0.18 c	-89.7

Medias con igual letra no difieren estadísticamente entre sí (p < 0,05)

* Para la comparación se utilizaron las emisiones promedio de gasolina (83,8 g CO_{2-eq} MJ⁻¹) informadas en el Reglamento 2009/28/ CE.



¿QUÉ COMPONENTES APORTAN A LAS EMISIONES DE GEI?

El análisis de la participación de las emisiones de GEI por las diferentes etapas de producción (Fig. 1) mostró que el 80 % de las emisiones totales de carbono fue debido a operaciones e insumos utilizados en las etapas de preparación de suelo, siembra y post siembra, en los sistemas de cultivos anuales. En cambio, en switchgrass las etapas de preparación de suelo y siembra representaron solo un 10 % de las emisiones. Esto es debido a que solo se lo sembró al inicio del experimento, ya que es un cultivo perenne. Por otro lado, en este cultivo perenne la post-siembra representó un 60 % de las emisiones totales de carbono.

El uso de fertilizantes nitrogenados representa, en promedio, un 36 % de las emisiones de GEI. Asimismo, el uso de fitosanitarios y actividades de cosecha (de grano y/o biomasa) representan en promedio un 16 y 19 % de las emisiones totales (Fig. 2). Los resultados confirman que diferencias en las prácticas agrícolas entre tratamientos (número de operaciones y carga de insumos) tienen una gran influencia en las emisiones de GEI, 53 % en los cultivos anuales y 90 % en los cultivos perennes. La etapa de post siembra en switchgrass presentó un mayor aporte a las emisiones totales (60 %) debido a un mayor uso de insumos como fertilizante nitrogenado en las etapas de rebrote del cultivo (100 kg de N por ha año⁻¹).

El fertilizante nitrogenado fue uno de los insumos con mayor participación en las emisiones GEI de los sistemas, por lo que todas las medidas que disminuyan su uso y aumenten su eficiencia determinarán una disminución de las emisiones.

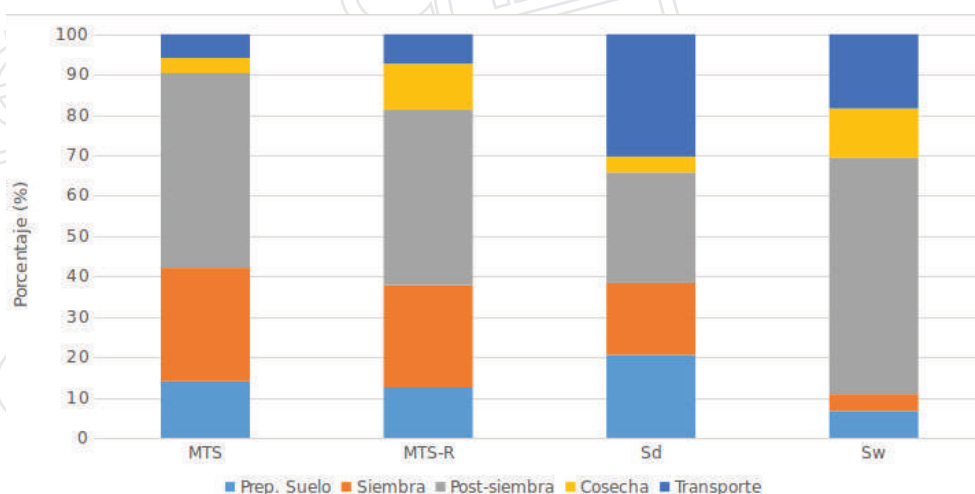


Figura 1. Emisiones de carbono en cada sistema según etapa de producción.

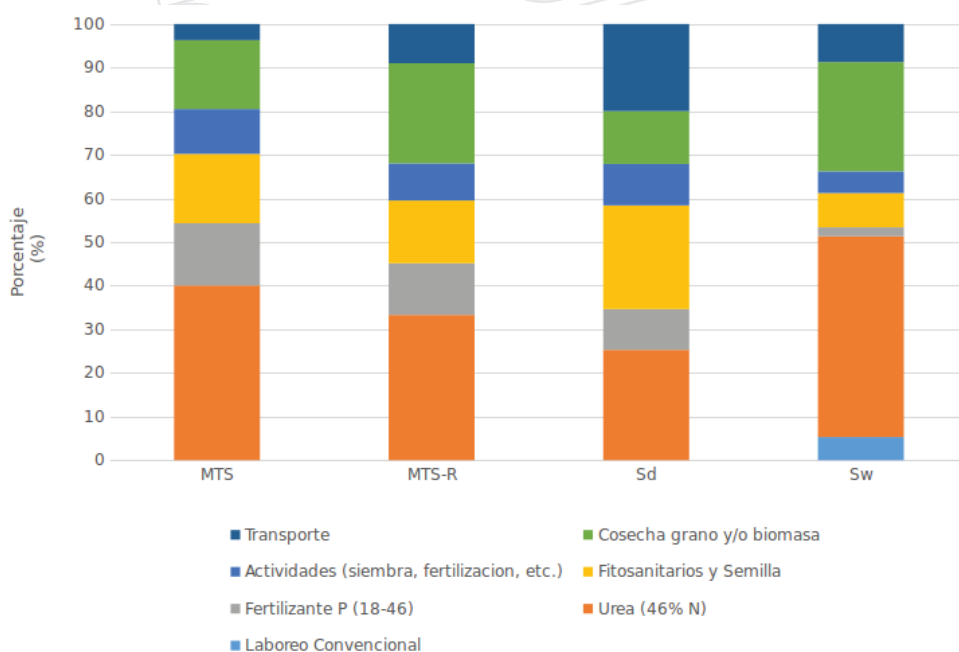


Figura 2. Emisiones de carbono de cada sistema según insumos utilizados.

¿QUÉ RELACIONES ENCONTRAMOS ENTRE EMISIONES Y SECUESTRO DE CARBONO EN EL SUELO?


Los cambios en el contenido estimado de carbono orgánico del suelo afectaron de manera importante el balance global de GEI de los sistemas evaluados (Fig. 3). Los sistemas donde se consideró el retiro de los residuos (MTS-R) y/o donde se cosechó toda la biomasa como el SD, el carbono perdido por erosión y mineralización correspondió a un 37 y 20 %, respectivamente, de las emisiones GEI. Los tratamientos MTS-R y SD se caracterizaron por una baja cobertura del suelo post-cosecha, lo que genera un menor ingreso de carbono y una mineralización de materia orgánica mayor. Por otro lado, el sistema sin retiro de residuos (MTS) presentó estimaciones de pérdidas de carbono por erosión y mineralización 70 % menores al sistema con retiro de residuos (MTS-R).

De acuerdo a la Ley de Conservación de Suelos y Aguas del Uruguay (Ley No. 15239), para nuestra zona de estudio un sistema se considera sustentable si las pérdidas de suelo estimadas son inferiores a 7 Mg ha⁻¹año⁻¹. Con estos criterios, los sistemas MTS-R y SD con pérdidas de 12,3 y 9,0 Mg ha⁻¹año⁻¹, respectivamente, no cumplirían con el criterio de sostenibilidad; mientras que los sistemas MTS y SW con pérdidas de suelo de 3,5 y 1,1 Mg ha⁻¹año⁻¹, respectivamente, podrían calificarse de sostenibles.

El cultivo de switchgrass presentó un perfil de emisión muy diferente. Donde el 70 % de las emisiones correspondieron al sistema de producción (insumos y actividades) y la erosión de suelos solo alcanzó al 10 % del SOC perdido en los sistemas MTSR y Sd. Además, el cultivo de switchgrass fue el único sistema con secuestro de carbono (1,47 Mg CO₂-eq ha⁻¹), valor que corresponde al 70 % de las emisiones totales de este sistema. Cabe aclarar que este secuestro de carbono fue un supuesto utilizado por referencias internacionales, no presentando al día de la fecha registros de secuestro de carbono nacionales.

CONCLUSIONES PRELIMINARES

Los sistemas de cultivos anuales con los rendimientos medios alcanzados presentaron una mayor huella de carbono, lo que se corresponde con sistemas agrícolas anuales con mayor consumo de insumos. La utilización de los rastrojos en los sistemas para grano (MTS-R) incrementó las emisiones potenciales de GEI, y causaría una disminución de SOC, en comparación al sistema sin retiro de residuos. Los sistemas MTS-R y SD presentaron estimaciones de pérdidas de suelo por encima de la tolerancia por lo que no cumplen con el criterio de sostenibilidad de suelo.

Switchgrass presentó las menores emisiones GEI, por lo que sería recomendable implementar su producción en Uruguay. Presentó un elevado potencial de producción de biomasa en las condiciones de clima y suelo del Uruguay y según la bibliografía se caracteriza por un alto secuestro de carbono orgánico al suelo y bajos niveles de erosión. Estas características lo definen como una opción interesante para integrarlo a sistemas agrícolas del Uruguay. 

BIBLIOGRAFÍA

- Andriulo A.; Mary B.; Guerif J. 1999. *Modelling soil carbon dynamics with various cropping sequences on the rolling pampas*
- Fazio S.; Monti A. 2011. *Life cycle assessment of different bioenergy production systems including perennial and annual crops*. Biomass and Bioenergy 35:4868–4878. doi: 10.1016/J.BIOMBIOE.2011.10.014
- Lewandowski, I.; Schmidt, U. 2006. *Nitrogen, energy and land use efficiencies of miscanthus, reed canary grass and triticale as determined by the boundary line approach*. Agric Ecosyst Environ 112:335–346. doi: 10.1016/j.agee.2005.08.003
- Liska, A. J.; Yang H.; Milner, M.; et al. 2014. *Biofuels from crop residue can reduce soil carbon and increase CO₂ emissions*. Nat Clim Chang 4:398–401. doi: 10.1038/nclimate2187

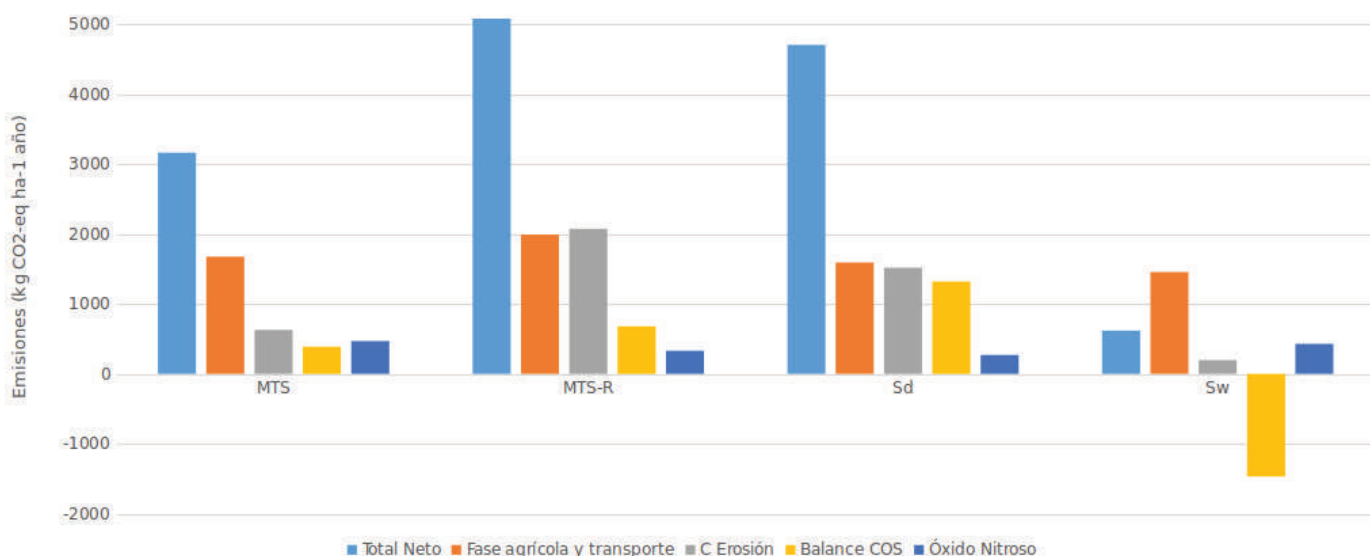


Figura 3. Estimaciones de las emisiones de carbono totales (kg CO₂-eq (ha.año)⁻¹) y aporte de cada fuente.