



GRUPO DE PAÍSES PRODUCTORES DEL SUR

GROUP OF PRODUCING COUNTRIES FROM THE SOUTHERN CONE

**Contribuyendo a la producción global sustentable de alimentos
Contributing to the global sustainable food production**

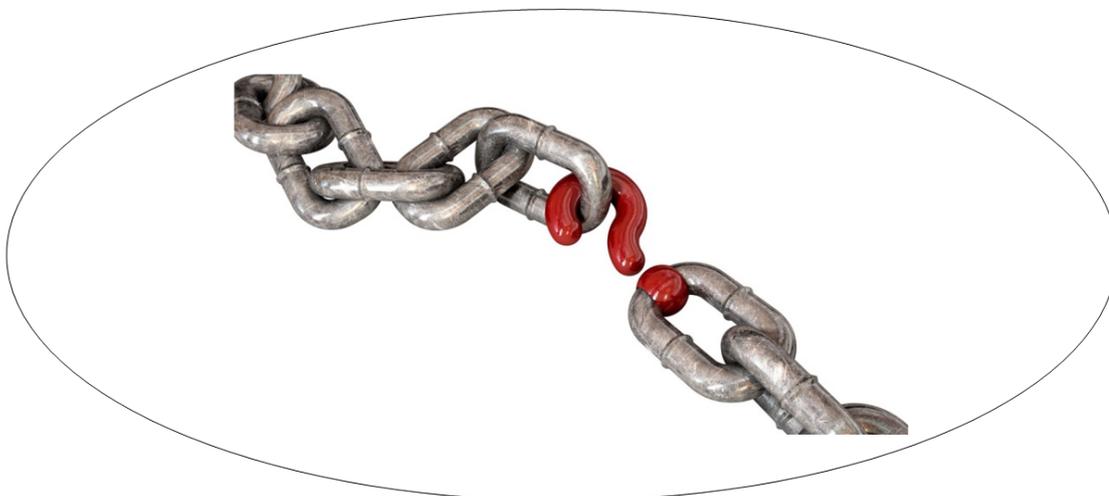
www.grupogpps.org | hgpps@hotmail.com

SECUESTRO DE CARBONO EN TIERRAS RURALES: ¿UN “ESLABÓN PERDIDO” EN LOS INVENTARIOS?

NOVIEMBRE, 2017
(VERSION PRELIMINAR)

Ernesto F. Viglizzo & M. Florencia Ricard

**Secuestro de carbono en tierras rurales:
¿un 'eslabón perdido' en los inventarios?**



Ernesto F. Viglizzo & M. Florencia Ricard
GPS-SRA-CONICET

Resumen

Los científicos del clima en general acuerdan que los métodos recomendados por el IPCC (1996, 2006) predicen con aceptable rigor las emisiones internas de los países. Pero las estimaciones de secuestro de carbono, en cambio, aparecen incertidumbres y dudas metodológicas que son motivo de discusión y debate. Un cambio en el método puede modificar de manera drástica los resultados de un balance anual de carbono. El presente estudio tiene por objetivo recalcular los balances de carbono a través de una metodología alternativa destinada a evaluar, de una manera distinta a la recomendada por el IPCC, la captura y secuestro de carbono en las tierras rurales y naturales de la región del MERCOSUR, integrada por Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay. Nuestro análisis se focalizó excluyentemente en los cambios que ocurren en la biomasa de raíces de los biomas estudiados, ya que las reservas de carbono en raíces son, dentro del año analizado, un componente más estable que el carbono de la biomasa aérea. El carbono de la materia orgánica del suelo -el componente más estable- no es totalmente apropiado para estimar los flujos anuales de carbono secuestrado porque sus cambios se miden y detectan en plazos más largos (generalmente unos 20 años). Los balances de carbono en esta investigación se presentan en tres componentes que corresponden (i) a la ganadería, (ii) a la agricultura granaria (oleaginosas y cereales) y (iii) a los cambios en el uso de la tierra. Aunque todos los balances de los sistemas ganaderos pastoriles fueron positivos, los resultados muestran grandes diferencias absolutas entre los cuatro países. Son los dos países de mayor extensión territorial (Brasil y Argentina) quienes definen el balance final de carbono para la región del MERCOSUR. En términos relativos, Argentina es el país que presentaría en sus tierras de pastoreo el balance de carbono más favorable. Los cultivos anuales en los cuatro países y la propia región MERCOSUR presentan balances negativos de carbono, aunque sus valores absolutos de escasa significación en el balance global del sector rural. Los cambios anuales en el uso de la tierra juegan un papel decisivo y generan un balance anual negativo de carbono en el caso del Brasil, país que muestra las tasas absolutas de deforestación y arrastra con el gigantismo de sus números al resto del MERCOSUR. Los balances generales del sector rural en los cuatro países y la región muestran un balance positivo, que aparece maximizado en el caso de la Argentina debido al aporte de sus tierras ganaderas. Estas evidencias de la literatura científica demuestran que el debate acerca del secuestro de carbono en los ecosistemas terrestres dista de estar cerrado, y que los resultados de este estudio añaden una perspectiva metodológica diferente para evaluar el mismo problema. Son necesarias más estimaciones para validar el método y los balances de carbono del sector rural que hemos calculado en este estudio.

EMISIONES, SECUESTRO Y BALANCE DE CARBONO EN AMBIENTES RURALES DEL MERCOSUR: EN BUSCA DEL “ESLABÓN PERDIDO” DE CARBONO

Ernesto F. Viglizzo y M. Florencia Ricard

GPS/SRA/CONICET

El problema y sus matices

En un trabajo reciente, Papendiek & Idígoras (2017) señalan que un desafío mayor que deberán enfrentar la producción y el comercio internacional de alimentos será garantizar al mismo tiempo la seguridad alimentaria (en términos cuantitativos y cualitativos) y la seguridad ambiental, especialmente en relación a su impacto sobre el cambio climático global. El debate en torno a las emisiones de carbono se traslada, en ese contexto, al centro de la escena. Sin duda la problemática del carbono gravita de manera creciente debido a la importancia que la ciencia le asigna al calentamiento del planeta y al cambio climático global (IPCC, 2014, Le Quéré, 2016).

En términos de seguridad alimentaria, basados en datos de FAO del 2015, Regúnaga y Elverdín (2017) demuestran que los cuatro países del MERCOSUR (Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay) juegan un rol clave en la seguridad alimentaria global por su participación en el comercio internacional de alimentos. Esta región provee aproximadamente, entre otros productos, el 20 % de los cereales, el 47 % de las oleaginosas, el 41 % de los azúcares y el 25 % de las carnes que se comercializan en el mundo. Y las proyecciones indican que esa participación se incrementará en las próximas décadas. Ahora bien, ¿cómo incide esta posición dominante en el mercado de alimentos sobre las emisiones regionales de gases de efecto invernadero (GEI)?

Hay que destacar que hoy los países son evaluados con particular meticulosidad mediante indicadores que los “rankean” de acuerdo a su posición relativa en las emisiones globales. Sin embargo, no hay referencias explícitas que se ocupen de “rankear” la capacidad de esos países para capturar y almacenar carbono en sus tierras. En alguna medida ese sesgo es distorsivo, ya que ordena a los países en función de sus emisiones, pero no en función de su secuestro de carbono. Por ejemplo, mientras los cuatro países del MERCOSUR registran menos del 3 % de las emisiones globales de carbono, algunos indicadores le asignan una emisión *per capita* mayor que las de China e India, dos naciones que se cuentan entre los más grandes emisores mundiales. Los números se ordenan de manera radicalmente distinta cuando esas emisiones son expresadas por hectárea de tierra y no por habitante (Viglizzo, 2015).

Si evaluamos a los países productores de alimentos en función de sus emisiones agropecuarias sin tener en cuenta la capacidad de secuestro de sus tierras rurales, nos hemos resignado a ver solo una parte de la realidad. Los protocolos del IPCC evalúan con meticulosidad las emisiones GEI, pero imperfectamente la captura y secuestro de carbono (Figura 1). Los inventarios GEI no parecen reflejar hoy adecuadamente el balance de carbono, y el secuestro se convierte en un “eslabón perdido” dentro la

economía del carbono, poniendo en desventaja a los países que tienen mayor capacidad para capturarlo y almacenarlo en sus tierras.

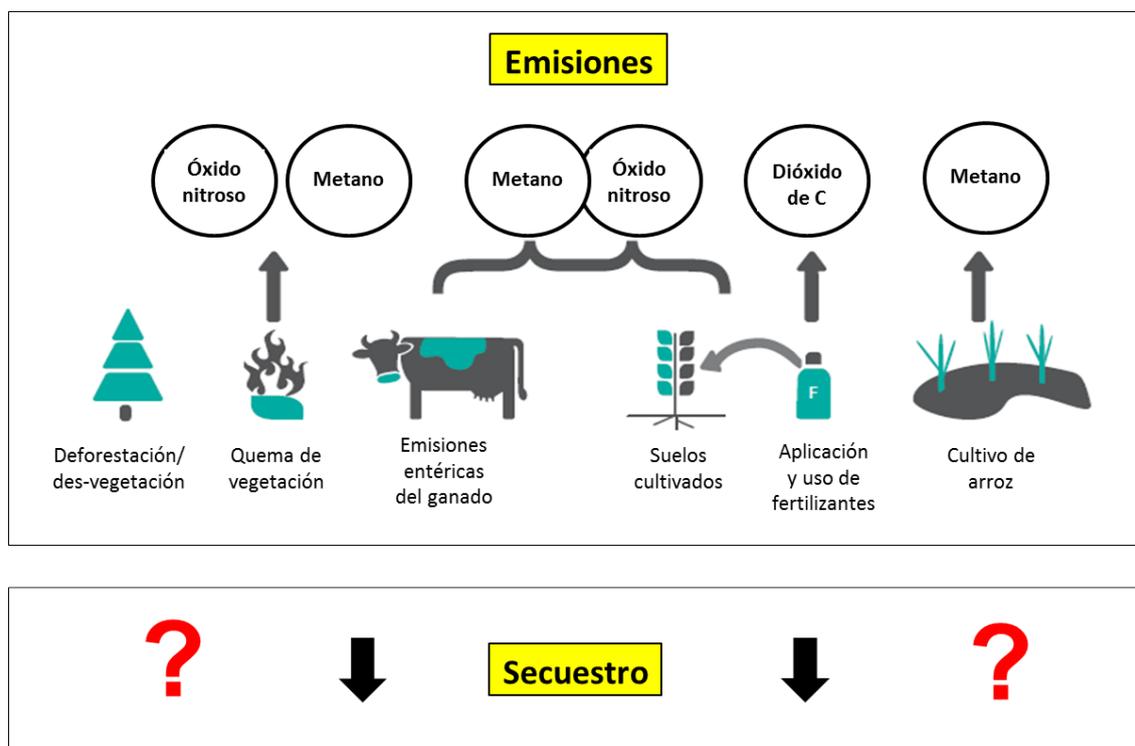


Figura 1. Descripción simplificada de los inventarios de gases de efecto invernadero de acuerdo a los protocolos del IPCC (1996, 2006).

De aquí surgen algunas preguntas inevitables ¿Cuánto carbono puede ser capturado y secuestrado en las tierras rurales del MERCOSUR? ¿Qué balance de carbono se generaría si computáramos con mayor rigor y meticulosidad la captura y secuestro? ¿Es necesario un cambio de paradigma en la forma que hoy medimos el carbono?

Las estrategias de mitigación de emisiones apuntan prioritariamente al reemplazo de las energías convencionales por las renovables y a la incorporación de tecnologías que mejoren la eficiencia de uso de los combustibles fósiles. Sin duda, son dos caminos lógicos y racionales. Pero también debemos admitir que hay muchos intereses estratégicos, económicos y comerciales detrás de esta visión. Sin soslayarlos, ¿debemos por ello ignorar el potencial mitigador de nuestras tierras rurales y naturales? La lógica y la razón indican que no y el argumento es claro: los sectores no rurales tienen una capacidad muy limitada para capturar y secuestrar carbono.

Estas razones justifican el objetivo de este estudio, que consiste recalculando los balances de carbono a través de una metodología alternativa para evaluar la captura y secuestro de carbono en las tierras rurales y naturales de la región del MERCOSUR.

Fundamentos eco-fisiológicos del secuestro de carbono en los biomas terrestres

Un vasto cuerpo de evidencias empíricas y teóricas demuestra que a medida que las plantas almacenan carbono por fotosíntesis y crecen, una fracción se almacena en su biomasa aérea, y otra fracción en su biomasa subterránea. El carbono almacenado en los suelos representa la mayor reserva de carbono del planeta, lo cual indica que hay más carbono en el subsuelo que en el conjunto de la atmósfera y la biomasa aérea (Lal, 2008; Lehmann y Kleber, 2015). En los agro-ecosistemas, la fracción aérea es altamente inestable porque está expuesta a remoción por cosecha o pastoreo, o a pérdida por fuegos, heladas, granizo, etc. No ocurre lo mismo con la fracción de carbono almacenada en las raíces, que es menos afectada por el ambiente externo y se comporta como un componente más estable del ecosistema. Más aún, parte de ese carbono es mineralizado e incorporado al carbono orgánico del suelo, que es una fracción aún más estable que la de las raíces. Mediante la incorporación en el subsuelo se extrae carbono de la atmósfera y se lo almacena bajo una condición de mayor estabilidad (van Groenigen et al., 2017).

Buena parte del carbono capturado en el subsuelo retorna a la atmósfera a través de procesos respiratorios cuando los tejidos mueren y se descomponen (Bradford, 2017). Si las condiciones favorables persisten a lo largo de muchos años, la acumulación en el suelo continúa año a año hasta alcanzar un nivel de equilibrio en el cual las emisiones y los secuestros alcanzan un balance cercano a cero. ¿Durante cuánto tiempo podría almacenar carbono en el subsuelo un pastizal o una pastura? Una investigación reciente (Stahl et al., 2017) demuestra que existe un almacenaje continuo de carbono en pasturas de más de 20 años, con baja carga animal, localizadas en la Amazonia francesa. Mientras esas pasturas lograron almacenar carbono dentro de un rango que osciló 1.27 y 5.31 ton/ha/año, el secuestro fue de 3.31 ton/ha/año en un bosque nativo cercano. Los autores remarcan que bajo las condiciones evaluadas, las pasturas aseguran un secuestro continuo de carbono que se adiciona anualmente al que ya que existe almacenado en los bosques amazónicos tropicales. Algunos estudios (Gill & Jackson, 2000, van Groenigen et al., 2017) demuestran que las pérdidas respiratorias de carbono en raíces son muy significativas, y que esas pérdidas se acrecientan en los ambientes tropicales y zonas cálidas. Pero una reciente y extensa revisión de literatura (Bradford et al., 2016) indica que no está comprobado que se acelere la fuga de carbono en condiciones de alta temperatura. Concluyen estos autores en que no existiría una pérdida del stock de carbono si las temperaturas altas aceleran las pérdidas, pero al mismo tiempo intensifican la síntesis de biomasa. Es decir, aproximadamente se ganaría tanto carbono como el que se pierde. Kämpf et al. (2016), por su parte, señalan que el almacenaje y fuga de carbono son afectados tanto por factores biológicos como factores geológicos vinculados al material parental de los suelos. Esto significa que los resultados obtenidos en estudios individuales no son fácilmente transferibles de una región a otra, y que hay un efecto local que no se puede ignorar.

Un trabajo relativamente reciente de Smith (2014) reanalizó datos de parcelas experimentales que llevaban más de un siglo de duración (Johnson et al., 2009), y

concluyó que una pastura sin perturbación externa podía secuestrar carbono en forma continua y alcanzar un equilibrio a partir de los 100 años. Otras investigaciones sugieren que esa condición podría alcanzarse en menor tiempo. Estudios sobre 470 parcelas realizados en Rusia y Siberia a partir del abandono de tierras de cultivo en la era post-Soviética (Wertebach et al., 2017) demostraron que la tasa media de incorporación de carbono orgánico en los primeros 5 cm de suelo fue muy alta (1.04 ton C/ha/año) durante la primera década, y comenzó a declinar entre la primera y segunda década (0.26 ton C/ha/año). Debe no obstante admitirse que no están totalmente esclarecidos los mecanismos que explican por qué un cambio en el uso de la tierra afecta la acumulación de carbono en el subsuelo. Wiesmeier et al. (2005) sostienen que los cambios en el carbono del suelo pueden atribuirse tanto a los cambios en el uso de la tierra como a propiedades específicas de los suelos. Es decir que las propiedades de cada suelo pueden desplazar el punto de equilibrio entre pérdida y ganancia de carbono. Como en la práctica es muy difícil mantener un campo en producción sin intervención humana durante mucho tiempo, debemos inferir que el equilibrio total es improbable, y que el proceso de captura y secuestro de carbono será dinámico e inestable.

Los bosques tienen una capacidad evaluada y medida para secuestrar carbono en la biomasa aérea y en el suelo (Davidson et al., 2012; Brien et al., 2015), especialmente en los ambientes tropicales donde se registran altas tasas de crecimiento (Guo et al., 2002, Smith et al., 2016). Por ejemplo, se estima que la selva tropical de la cuenca amazónica, retiene anualmente un 10 % de todo el carbono que se almacena en los ecosistemas terrestres (Galford et al., 2013). Esta capacidad de captura y almacenamiento de los bosques ha servido de soporte a la elaboración de los protocolos metodológicos del IPCC (1996, 2006) que evalúan los cambios de stock de bosques y plantaciones de los países como una vía para estimar indirectamente los cambios (absolutos y relativos) en el balance de carbono.

¿Pero qué ocurre con las tierras en pastoreo? Se produce aquí un debate con posiciones muy polarizadas tanto en el ámbito científico-académico como en la opinión pública menos especializada. Existe una oposición marcada –y mucha confusión– entre quienes creen que los rumiantes en pastoreo son una amenaza para el clima mundial, y aquellos que los ven a los sistemas ganaderos como un camino racional para mitigar el calentamiento y el cambio climático global. La discusión acerca de la capacidad de las tierras de pastoreo para secuestrar carbono no es novedosa, pero aún no hay acuerdos conceptualmente sólidos. Numerosos estudios se han ocupado de tratar y debatir el tema desde hace algunos años (Fearnside & Imbrozio, 1998; Dawson et al., 2000; Conant & Paustian, 2002; Guo et al., 2002; Lal, 2004; Conant, 2010; Follett & Reed, 2010; Henderson et al., 2015; Oliveira Silva et al., 2016) sin resultados concluyentes. Los pastizales y pasturas parecen ser particularmente importantes porque cubren un 25 % aproximadamente de las tierras libres de hielo (Asner et al., 2004), y algunos estudios indican que pueden almacenar más del 75 % del carbono orgánico en el suelo (Jobbágy & Jackson, 2000).

Dada la relación reportada por la literatura científica entre el carbono retenido en la biomasa aérea y en el subsuelo, y dado que la fracción aérea está mayormente

expuesta a apropiación y/o remoción frecuente, es el carbono almacenado en las raíces el que se mantiene en una forma más estable, persistente. En una publicación reciente (titulada *Grazed and Confused?*), Garnett et al. (2017), miembros de una prestigiosa red que investiga la relación entre los alimentos y el clima (Food Climate Research Network), sostienen que los sistemas ganaderos pastoriles contribuyen potencialmente al proceso de secuestro de carbono al estimular el crecimiento vegetal y favorecer su captura y almacenamiento en las raíces y la materia orgánica del suelo. Concluyen que remover a los rumiantes de las tierras de pastoreo causaría potencialmente más daños que beneficios al clima global, e indican que el secuestro global de los sistemas pastoriles puede mitigar entre 20-60 % del carbono emitido por los propios rumiantes. Aunque el rango que reportan es amplio y sujeto a incertidumbre, crece la idea de que los pastos tienen una capacidad de almacenamiento potencial de carbono mayor al que se creía algunos años atrás.

Evaluando la captura de carbono: Enfoques y métodos

¿Cómo evaluar la captura y almacenamiento de carbono? El balance de carbono en las tierras (las naturales y las intervenidas por el hombre) tiene dos componentes: la emisión y el secuestro. Más allá de un largo e interminable debate, los científicos del clima en general acuerdan que los métodos recomendados por el IPCC (2006) reflejan con bastante rigor las emisiones internas de los países. Eso explica por qué su uso se ha generalizado entre los países que elaboran sus inventarios anuales. Pero las estimaciones de secuestro de carbono, en cambio, presentan zonas grises y aparecen limitaciones metodológicas que son motivo de discusión y debate. La estimación del secuestro, de acuerdo a la forma en que sea calculado, puede modificar de manera drástica los resultados de un balance anual de carbono.

Los informes del IPCC reconocen esta última dificultad. En el informe especial del IPCC (2006), los autores del capítulo 9 (*IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage (2006). Chapter 9*) indican que "...que las metodologías para contabilizar Captura y Almacenamiento de Carbono (CAC) en los inventarios nacionales deben ser todavía desarrolladas...", y agregan que "...hoy las CAC solo son estimadas en pequeña escala, y generalmente no son descritas en los inventarios nacionales de los países...". Expresan que "...deben desarrollarse guías específicas para estimar fugas físicas que ocurren en el carbono almacenado...", puesto que "...no hay conocimiento suficiente para estimar fugas desde distintas opciones de almacenaje...". Recomiendan que... "en última instancia, "... sean las políticas quienes asignen un valor a los almacenajes temporarios...". Estos comentarios reflejan de manera inequívoca la existencia de dificultades metodológicas para estimar el carbono que capturan y secuestran los biomas dominantes (bosques y plantaciones, arbustales, sabanas, pastizales, pasturas cultivadas, cultivos anuales).

El método de cálculo más elemental (Tier 1) sugerido por el IPCC (2006) asume en el caso de los pastizales, sabanas y pasturas, que la biomasa que captura y almacena carbono se encuentra en un estado "casi estacionario o estable", ya que "...la acumulación de carbono debido al crecimiento vegetativo está en general balanceado

por pérdidas que ocurren a través del pastoreo, la descomposición (de la biomasa) y el fuego...”. Por lo tanto, un país que aplica esta primera opción metodológica “...asume que no hay cambio en la biomasa...” y, por lo tanto, asume una estabilidad en el secuestro de carbono que no es tal en los sistemas dinámicos que funcionan en la vida real. En el caso de los ecosistemas leñosos, la captura y secuestro de carbono se estiman por defecto (valores default), o a través de ecuaciones que predicen los incrementos anuales por cambios en el stock de biomasa. Una opción más avanzada (Tier 2) sugiere estimar diferencias temporales en el stock de biomasa como una forma indirecta de calcular captura y secuestro de carbono.

Volviendo a la idea de balance mencionada más arriba, su estimación en este estudio para los cuatro países del MERCOSUR sigue una lógica de flujos sencilla (Figura 2). Tomando como referencia el año 2010, se estimaron por un lado las emisiones de carbono que se produjeron en los distintos biomas involucrados, y por el otro, tal como fue mencionado, se desarrolló un método alternativo para estimar los flujos anuales de carbono secuestrado. Al basarse en un estudio detallado de los flujos y no en los cambios de stock, nuestro método para estimar secuestro de carbono se diferencia del sugerido por el IPCC (IPCC, 1996, 2006). Creemos que un cálculo exhaustivo de los flujos año a año refleja mejor la realidad de un sistema rural que, lejos de ser estático, es dinámico y está expuesto a cambios permanentes.

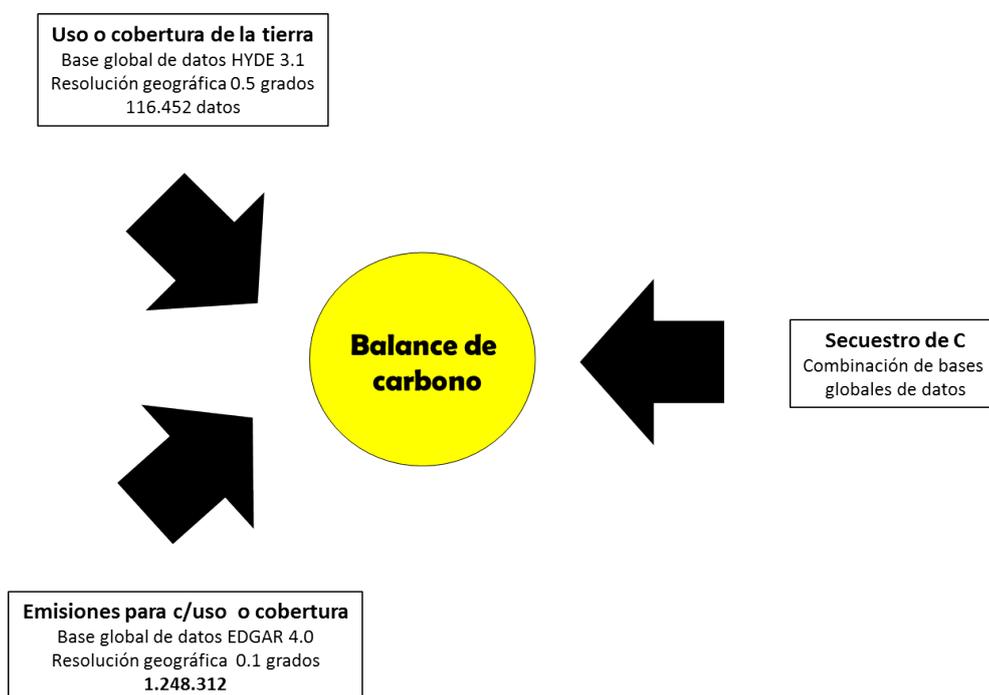


Figura 2. Enfoque utilizado en este estudio para estimar el balance de carbono en los países y en la región del MERCOSUR

El IPCC (2006) identifica cinco componentes que secuestran y almacenan carbono: la biomasa aérea (tallos y hojas), los residuos leñosos, los residuos de hojarasca, la

biomasa subterránea (raíces), y la materia orgánica del suelo. El pastoreo, la cosecha en los cultivos, el fuego, y la senescencia del material aéreo no leñoso provocan un rápido reciclado (*turnover*) y pérdida de carbono contenido en la vegetación. Por otra parte, el carbono se puede acumular en cantidades significativas en los componentes leñosos de la vegetación, en la biomasa de las raíces y en la materia orgánica del suelo. Como se describe con mayor detalle en el Anexo Metodológico insertado al final de este informe, nuestro análisis se ha focalizado exclusivamente en los cambios que ocurren en la biomasa de raíces de los biomas estudiados (Figura 3). Esto se justifica en el hecho de que las reservas de carbono en raíces son, dentro del año analizado, un componente más estable que el carbono de la biomasa aérea no leñosa. Asimismo, se considera que los cambios en la materia orgánica del suelo, el componente más estable, no es totalmente apropiado para estimar los flujos anuales de carbono secuestrado porque sus cambios ocurren y se miden en el largo plazo (generalmente unos 20 años).

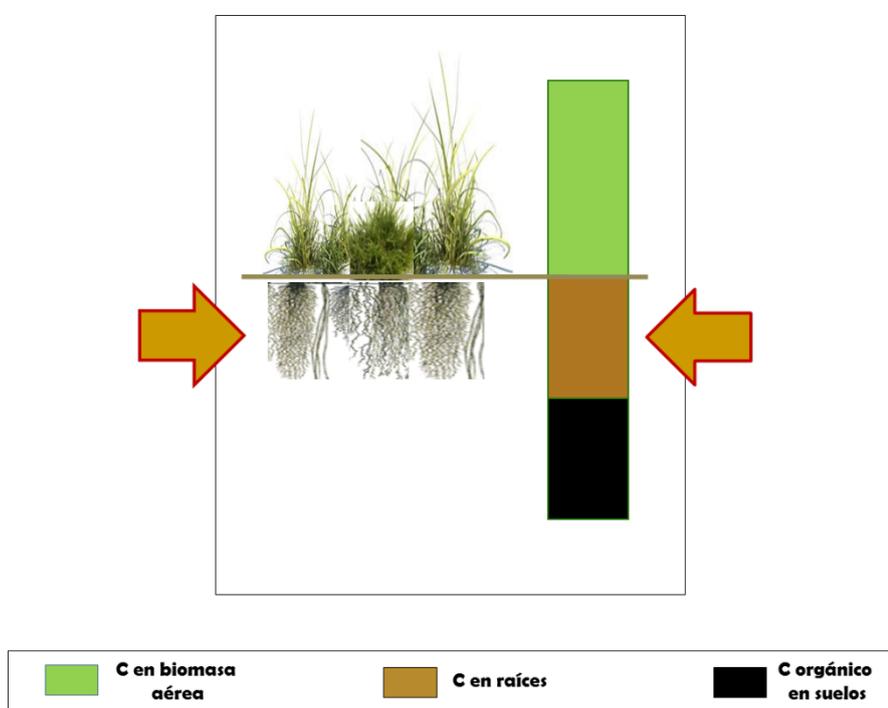


Figura 3. El análisis para estimar secuestro de carbono en este estudio en el componente de carbono en las raíces para cada uno de los biomas considerados

Para acceder a mayores detalles acerca de la metodología aplicada en este estudio, se recomienda consultar el *Anexo Metodológico* inserto al final de este informe.

Resultados

Los balances de carbono en esta investigación se presentan en tres componentes que corresponden (i) a la ganadería, (ii) a la agricultura granaria (oleaginosas y cereales) y (iii) a los cambios en el uso de la tierra. Los tres componentes están representados en

los datos de los cuatro países que integran la región (Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay) y la región del MERCOSUR en su conjunto.

En la [Figura 4](#) se presenta el balance anual de carbono de la ganadería en los cuatro países y la región en su conjunto. A través de las barras verticales se presentan las estimaciones de (i) secuestro de carbono en raíces (color verde), (ii) las emisiones de la ganadería (color naranja) y (iii) del balance que surge de restar las emisiones de los respectivos secuestros (color gris claro). Las diferencias absolutas entre países son muy notables, y claramente son los dos países de mayor extensión territorial (Brasil y Argentina) quienes definen el balance final de carbono para la región del MERCOSUR. Pero asimismo se percibe con claridad que las diferencias relativas entre los países son muy significativas. En términos relativos, Argentina es el país que presentaría en sus tierras de pastoreo (de acuerdo a nuestro enfoque) la mayor tasa de secuestro de carbono en relación a sus emisiones ganaderas. En consecuencia, es el país que mostraría el balance de carbono con mayores excedentes en toda la región. La magnitud de estos excedentes adquiere especial relevancia si tenemos en cuenta que más del 70 % de las tierras rurales de Argentina están afectadas a la producción ganadera extensiva.

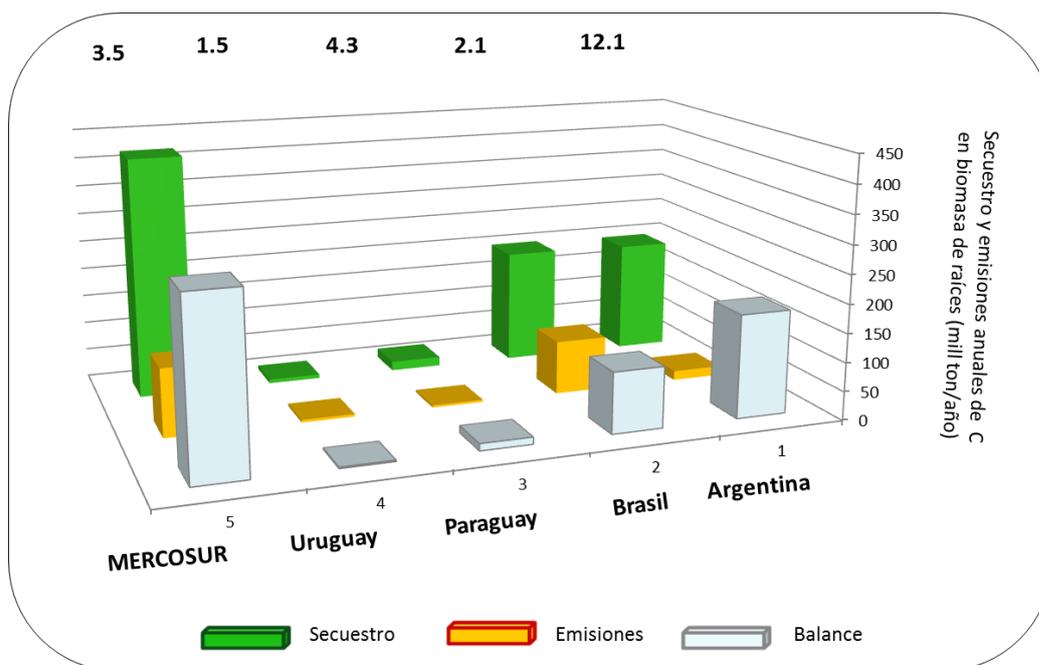


Figura 4. Estimaciones del secuestro, emisiones y balances de carbono en el sector ganadero en los cuatro países y la región del MERCOSUR

La [Figura 5](#) muestra los balances de carbono correspondientes a la agricultura anual de cultivos de cosecha. Digamos, en primer lugar, que los secuestros, emisiones y balances de las actividades granarias son de escasa significación en sus valores absolutos si los comparamos con los que corresponden a la ganadería. Aclarado esto, se puede apreciar que los cuatro países y la propia región MERCOSUR presentan balances negativos de carbono en esta actividad agropecuaria. Sin duda, el sistema

radicular (raíces) de las principales especies explotadas en la agricultura de cosecha no juega un rol decisivo en el secuestro de carbono de las áreas agrícolas, como sí ocurre

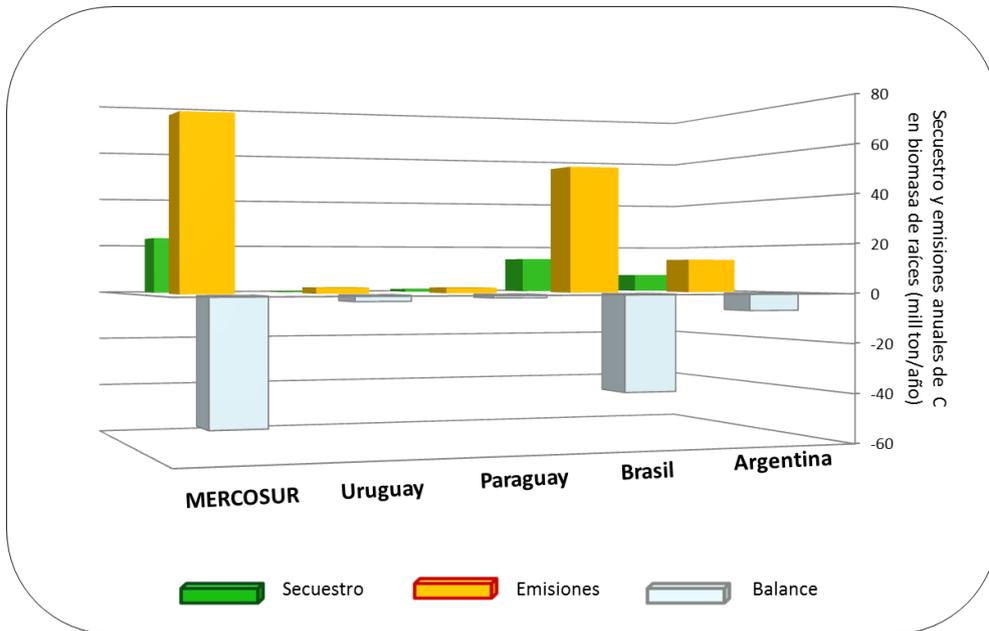


Figura 5. Estimaciones del secuestro, emisiones y balances de carbono en el sector de agricultura de granos en los cuatro países y la región del MERCOSUR

en cambio en las áreas ganaderas y forestales. Aunque hay un secuestro de carbono en raíces, éste es desbalanceado por las emisiones que generan los cultivos.

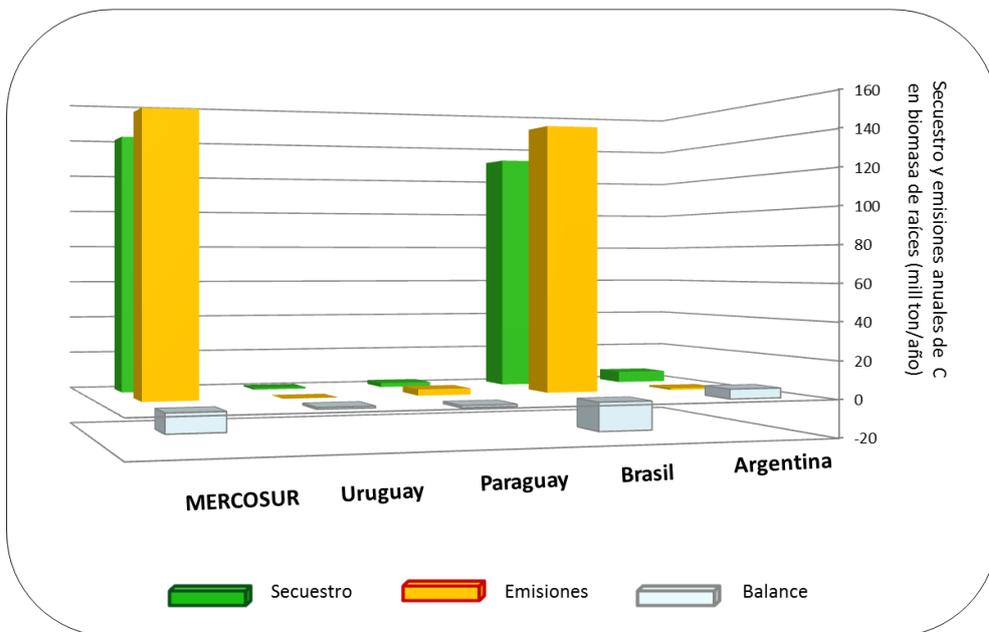


Figura 6. Estimaciones del secuestro, emisiones y balances de carbono debidas a cambios en el uso de la tierra en los cuatro países y la región del MERCOSUR

La **Figura 6** demuestra que los cambios anuales en el uso de la tierra (principalmente por deforestación) juegan un papel decisivo al generar un balance anual negativo de carbono en el Brasil, país que muestra tasas absolutas de deforestación que rebasan claramente las medias de los otros tres países. Este desbalance entre secuestro y emisión se refleja, por su magnitud, en las cifras generales que presenta la región su conjunto, que es arrastrado hacia un balance de carbono negativo. En una magnitud mucho menor, Paraguay presenta un comportamiento similar al del Brasil. Argentina y Uruguay, en cambio, muestran un comportamiento opuesto, ya que emisiones por deforestación son menores a los respectivos secuestros de carbono. Pero en estos dos países, las superficies boscosas son casi insignificantes cuando se las compara con las del Brasil.

La **Figura 7** resume los balances generales de todo el sector rural (ganadería + agricultura + cambios en el uso de la tierra) para los cuatro países y la propia región en su conjunto. Los balances reflejan esencialmente lo que se mostró en las Figuras anteriores. Los países y la región muestran un balance positivo, pero ese balance aparece maximizado en el caso de la Argentina, cuyas tierras de pastoreo han ejercido una tracción muy fuerte al momento de generar un crédito de carbono que se destaca claramente respecto a al crédito que presentan los otros tres países y la región. Mientras Argentina tendría una relación secuestro : emisión de 6.7, los restantes países no generan una relación de igual magnitud: mientras Paraguay tiene una relación de 2.1, Brasil y Uruguay oscilan entre 1.1 y 1.2.

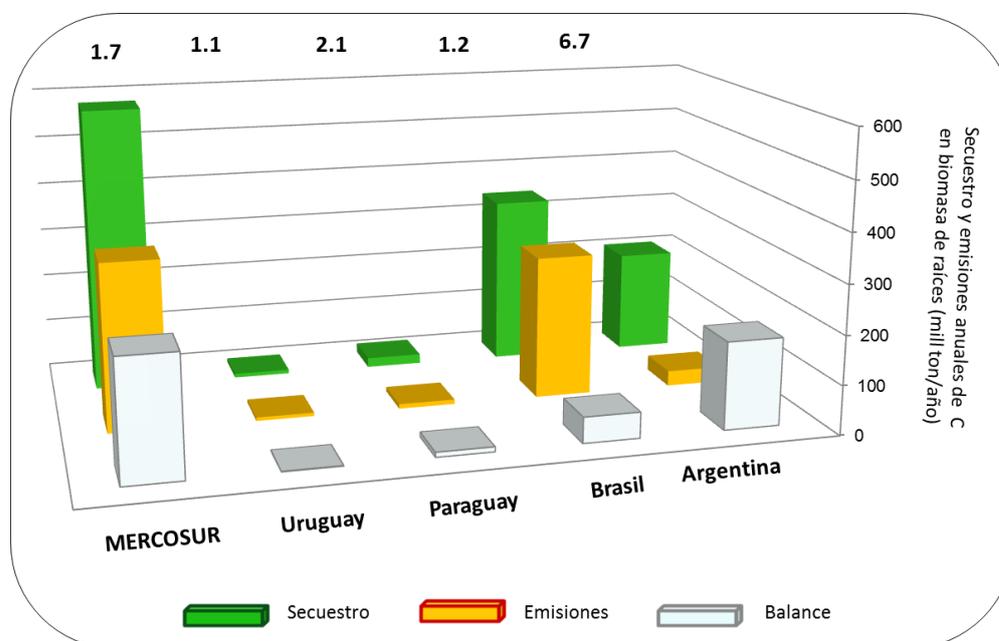


Figura 7. Estimaciones agregadas del secuestro, emisiones y balances de carbono del sector rural en su conjunto en los cuatro países y la región del MERCOSUR

A pesar de las diferencias, es necesario destacar que en los cuatro países y en la región el balance general del sector rural sería positivo de acuerdo al método aplicado; es decir, el secuestro parece ser mayor que la emisión de carbono, lo cual contradiría las estimaciones que muestran a este sector como un emisor neto de carbono. Este es un hallazgo novedoso que puede ser explicado enteramente por las diferencias entre el método aplicado en este estudio y el aplicado en los inventarios que han seguido los protocolos recomendados por el IPCC (1996, 2006). Sin duda, estos resultados tan contrastantes requieren una validación que los confirme o ignore.

¿Qué implicancias prácticas tendrían estas estimaciones si el método fuera validado? La implicancia más inmediata es que el sector rural de los cuatro países en particular, y de la región en general, estarían demostrando un crédito a favor de carbono, es decir que es el sector rural es capaz de secuestrar la totalidad del carbono que emite a través de la ganadería, la agricultura de cosecha y los cambios producidos en el uso de la tierra. Pero, como se muestra el Cuadro 1, una implicancia extra sería que el sector rural de los países y de la región, con su crédito debido al carbono excedente, podría subsidiar a los otros sectores emisores de la economía, como el energético, el industrial, el de gestión de residuos. Con sus excedentes de carbono, Brasil, Paraguay y Uruguay podrían compensar en casi un 7 %, 74 % y 9 %, respectivamente, las emisiones de los restantes sectores de la economía. Un caso muy particular es el de la Argentina, cuyo sector rural está fuertemente traccionado por sus tierras de pastoreo. Su crédito de carbono podría compensar holgadamente las emisiones de los sectores no rurales. Si estas cifras fueran debidamente validadas, Argentina podría potencialmente ser calificado como “país carbono neutro” debido a los créditos de carbono que genera su sector agropecuario.

	Crédito de C sector rural (balance de C)	Emisión C sectores no rurales	Cobertura C rural/no rural
Argentina	178,44	99,56	179,23
Brasil	52,68	792,31	6,65
Paraguay	10,05	13,66	73,60
Uruguay	0,82	9,09	9,02
MERCOSUR	241,99	914,62	26,46

Cuadro 1. Debido al crédito de carbono que surge de estimar los balances de carbono, el sector rural tendría la capacidad de subsidiar a los otros sectores emisores de la economía (el energético, el industrial, el de residuos) en los países del MERCOSUR

Conclusiones

Estas evidencias de la literatura científica demuestran que el debate acerca del secuestro de carbono en los ecosistemas terrestres dista de estar cerrado, y que los resultados de este estudio añaden una perspectiva metodológica diferente para evaluar el mismo problema. Por lo tanto, son necesarias más evidencias para validar los balances de carbono del sector rural que hemos estimado.

No obstante, aunque sea prematuro llegar a aseveraciones más firmes, provisoriamente podemos ensayar al menos tres conclusiones: 1) El planteo de este estudio se basa en aplicar un método novedoso para estimar el secuestro de carbono en la biomasa de las raíces de los biomas que integran las tierras rurales de los países del MERCOSUR. Se ofrece como alternativa a explorar frente a los protocolos recomendados por el IPCC; 2) Los resultados de aplicar este método sugieren que las tierras rurales en los cuatro países estudiados (Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay), con marcadas diferencias entre ellos, estarían neutralizando las emisiones del propio sector debidas a la explotación ganadera, a los cambios en el uso de la tierra y al cultivo anual de cereales y oleaginosas), y 3) Dentro de los cuatro países, Argentina sería quien presenta el mayor crédito de carbono a favor del sector rural, y tendría la capacidad de subsidiar con este excedente a los otros sectores de la economía. Si estos resultados se confirmaran, a partir de la contribución del sector rural en general, y del sector ganadero en particular, la Argentina podría auto-gestionar una calificación de país “carbono neutro”.

Referencias

Asner, G.P., Keller, M., Pereira, R., Zweede, J.C., Silva, J.N.M. (2004). Canopy damage and recovery after selective logging in Amazonia: Field and satellite studies. *Ecological Applications* 14 (Suppl 4):S280–S298.

Bolinder, M. A., Angers, D. A., Bélanger, G., Michaud, R. et Laverdière, M. R. (2002). Root biomass and shoot to root ratios of perennial forage crops in eastern Canada. *Can. J. Plant Sci.* 82: 731–737.

Bradford, M.A. (2017). A leaky sink. *Nature Climate Change* 7: 475-476.

Bradford et al. (2016). Managing uncertainty in soil carbon feedbacks to climate change. *Nature Climate Change* 6: 751-758.

Brienen, R.J.W., Phillips, O.L., Feldpausch, T.R. et al. (2015) Long-term decline of the Amazon carbon sink. *Nature*: 519: 344–534.

Conant, R.T. (2010). Challenges and opportunities for carbon sequestration in grassland systems. A technical report on grassland management and climate change

mitigation, Integrated Crop Management. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. doi:10.3329/jard.v7i1.4430.

Conant, R.T. and Paustian, K. (2002). Potential soil carbon sequestration in overgrazed grassland ecosystems. *Global Biogeochem. Cycles*, 16, pp. 1-9.
doi:10.1029/2001GB001661

Davidson, E.A., de Araújo, A.C., Artaxo, P., Balch, J.K. et al. (2012). The Amazon basin in transition: Review. *Nature* 481: 321-328.

Dawson, L.A., Grayston, S.J., Paterson, E. (2000). Effects of Grazing on the Roots and Rhizosphere of Grasses (Chapter 4). *Grassland Ecophysiology and Grazing Ecology* (G. Lemaire, J. Hodgson, A. de Moraes, C. Nabinger, P.C. de F. Carvalho. Eds.). CAB International 2000, 61-84.

Fearnside, P.M., Imbrozio, B.R. (1998). Soil carbon changes from conversion of forest to pasture in Brazilian Amazonia. *Forest Ecology and Management*, 108(1–2), pp. 147–166.

Fidelis, A., Apezato-da-Glória, B., Pillar, V.D., Pfadenhauer, J. (2014). Does disturbance affect bud bank size and belowground structures diversity in Brazilian subtropical grasslands? *Flora* 209: 110-116.

Follett, R.F., Debbie A. Reed, D.A. (2010). Soil Carbon Sequestration in Grazing Lands: Societal Benefits and Policy Implications. *Rangeland Ecology and Management* 63: 4-15, DOI: 10.2111/08-225.1

Galford, G.L., Soares-Filho, B., Cerri, C.E.P. (2013) Prospects for land-use sustainability on the agricultural frontier of the Brazilian Amazon. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 368: 20120171.

Garnett, T., Godde, C., Muller, A., Röös, E., Smith, P., de Boer, I.J.M., zu Ermgassen, E., Herrero, M., van Middelaar, C., Schader, C., van Zanten, H. (2017). *Grazed and Confused? Ruminating on cattle, grazing systems, methane, nitrous oxide, the soil carbon sequestration question and what it all means for greenhouse gas emissions.* FCN, University of Oxford, 127 pp.

Gill, R.A., Jackson, R.B. (2000). Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems. *New Phytology* 147: 13-31.

Goldewijk, K., Beusen, A., van Drecht, G., de Vos, M. (2011). The HYDE 3.1 spatially explicit database of human induced global land use change over the past 12 000 years. *Global Ecology and Biogeography* 20: 73-86.

Guo, L.B., Gifford, R.M. (2002). Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biology* 8(4), pp. 345–360.

Henderson, B.B., Gerber, P.J., Hilinski, T.E., Falcucci, A., Ojima D.S., Salvatore, and M., and Connant, R.T.(2015). Greenhouse gas mitigation potential of the world's grazing lands: Modeling soil carbon and nitrogen fluxes of mitigation practices. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 207, pp. 91–100.

IPCC (1996). Revised 1996 Guidelines for National Greenhouse Inventories. J.T., Houghton, L.G., Meira Filho, B., Lim, K., Tréanton, I., Mamaty, Y., Bonduky, D.J., Griggs, B.A., Callander (Eds.). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), IPCC/IGES, Paris, France.

IPCC (2003). Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. J. Penman, M. Gytarsky, T. Hiraishi, T. Krug, D. Kruger, R. Pipatti, L. Buendia, K. Miwa, Ngara, T. Tanabe, K. Wagner, F. (Eds). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), IPCC/IGES, Hayama, Japan.

IPCC (2006). IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. H.S., Eggleston, L., Buendia, K., Miwa K, T., Ngara , K., Tanabe, Eds.) Inter-governmental Panel on Climate Change (IPCC), IPCC/IGES, , Vol. 4, Chapters 2–7, IGES, Japan. Available at <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/>

IPCC (2014). Cambio climático 2014 Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Editado en Mayo del 2014 por el IPCC. En internet: (www.ipcc-wg2.gov/AR5) y en el sitio web del IPCC (www.ipcc.ch).

Janssens-Maenhout, G., Pagliari, V., Guizzardi, D., Muntean, M. (2012). Global emission inventories in the Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR): Manual I: Gridding EDGAR emissions distribution in global gridmaps. Joint Research Center (JRC) Technical Reports of the European Commission, Luxembourg, 33pp.

Jobbágy, E.G., Jackson, R.B. (2000) The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Application* 10: 423–436.

Johnson, A.E., Poulton, P.R., Coleman, K. (2009). Soil organic matter: its importance in sustainable agriculture and carbon dioxide fluxes. *Advances in Agronomy*, 101,pp. 1-57.

Kämpf, I., Hoelzel, N., Stoerrle, M., Broll, G., Kiehl, K. (2016a) Potential of temperate agricultural soils for carbon sequestration: a meta-analysis of land-use effects. *Science of the Total Environment* 566: 428–435.

Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 304: 1623-1627.

Lal R (2008). Carbon sequestration. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*, 363: 815–830.

Le Quéré, C. et al. (2016). Global Carbon Budget 2016. *Earth System Science Data*: 8, 605–649, En: www.earth-syst-sci-data.net/8/605/2016/ doi:10.5194/essd-8-605-2016

Lehmann J, Kleber M (2015) The contentious nature of soil organic matter. *Nature*: 528: 60–68.

Mokany, K., Raison, R.J., Prokushkin, A. (2005). Critical analysis of root: Shoot ratios in terrestrial biomes. *Global Change Biology* 12:84 – 96.

Olivera Silva, R., Barioni, L.G., Hall, A.J., Folegatti-Matsuura, M., Zanett-Albertini, T., Fernandes, F.A., Moran, D. (2016). Increasing beef production could lower greenhouse gas emissions in Brazil if decoupled from deforestation. *Nature Climate Change* 6: 493-498.

Papendiek, S., Idígoras, G. (2017). The link between agricultural trade, climate change and food safety: Tariff elimination for environmentally efficient agricultural goods. Draft paper, Buenos Aires, August 2017.

Regúnaga, M., Elverdín, P. (2017). Southern Cone Contributions to Food Security and Global Environmental Sustainability. En: *Food security, water scarcity, the G-20 agenda and the strategic role soythern cone countries: Argentina, Brazil, Paraguay and Uruguay*, pp. 7-124. Editado por GPPS (Grupo de Países Productores del SR), Buenos Aires, Argentina.

Smith, P. (2014). Do grasslands act as a perpetual sink for carbon? *Global Change Biology*, 20(9), pp. 2708-2711.

Smith, P., House, J.I., Bustamante, M. et al. (2016) Global change pressures on soils from land use and management. *Global Change Biology*, 22, 1008–1028.

Stahl, C., Fontain, S., Picon, K., Mascarenhas-Grise, C., Dezecache, M., Ponchant, L., Freycont, V., Blanc, L., Bonal, D., Blurban, B., Soussana, J-F and Blacfort. V. (2017). Continuous soil carbon storage of old permanent pastures in Amazonia. *Global Change Biology* 23: 3382-3392, doi: 10.1111/gcb.13573.

Sterling, Sh.M., Ducharne, A., Polcher, J. (2012). The impact of global land-cover change on the terrestrial water cycle. *Nature Climate Change* 3: 385–390.

Van Groenigen, K.J., Osenberg, C.W., Terrer, C., Carrillo, Y., Dijkstra, F.A., Heath, J., Nie, M., Pendall, E., Phillips, R.P., Hungate, B.A. (2017). Faster turnover of new soil carbon inputs under increased atmospheric CO₂. *Global Change Biology*, DOI: 10.1111/gcb.13752.

Viglizzo, E.F. (2015). Cambio Climático en la Región ABPU (Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay): Amenazas y Oportunidades. Publicación GPS, Buenos Aires, 15 pp.

- Viglizzo, E.F., Nosoetto, M.D., Jobbágy, E.G. Ricard, F.M., Frank, F.C. (2014). The ecohydrology of ecosystem transitions: a meta-analysis. *Ecohydrology* DOI: 10.1002/eco. 1540.
- Wang, L., Li, L., Chen, X., Tian, X., Wang, X., et al. (2014) Biomass Allocation Patterns across China's Terrestrial Biomes. *PLoS ONE* 9: e93566,doi:10.1371/journal.pone.0093566
- Wertebach, T-M., Hölzel, N., Kämpf, I., Yurtaev, A., Tupitsin, S., Kiehl, K., Kamp, J., Kleinebecker, T. (2017). Soil carbon sequestration due to post-Soviet cropland abandonment: estimates from a large-scale soil organic carbon field inventory. *Global Change Biology* 23: 3729–3741, doi: 10.1111/gcb.13650
- Wiesmeier, M., von Luetzow, M., Spoerlein, P. et al. (2015) Land use effects on organic carbon storage in soils of Bavaria: the importance of soil types. *Soil & Tillage Research* 146: 296–302.
- Zhou, G., Zhou, X., He, Y., Shao, J., Hu, Z., Liu, R., Zhou, H., Hosseinibai, S. (2017). Grazing intensity significantly affects belowground carbon and nitrogen cycling in grassland ecosystems: a meta-analysis. *Global Change Biology* 23: 1167-1179.

Anexo Metodológico

1. Estimación de las emisiones GEI en la región MERCOSUR

Dos instancias iniciales son las que permitieron obtener una estimación de las emisiones GEI en la región: la primera consistió en determinar los usos y coberturas de la tierra a partir de una base global de datos (HYDE 3.1) descrita por Goldewijk et al. (2011). La segunda consistió en determinar las emisiones específicas para cada uso/cobertura de la tierra, las cuales fueron estimadas a partir de otra base global de emisiones (EDGAR 4.2) descrita por Janssens-Maenhout (2012). Luego realizar una validación cruzada con las bases estadísticas de la FAO y el Banco Mundial, los datos aportados por estas dos bases globales fueron adoptados sin modificaciones. HYDE 3.1 aportó a la región un total de 116 452 datos sobre usos y cobertura de la tierra para el año 2010. EDGAR 4.2, por su parte, hizo lo propio con las emisiones (medidas en ton de equivalentes CO₂/año) para el mismo año con un total de 1 248 312 datos. HYDE 3.1 permitió realizar mapas de uso/cobertura de la tierra con una resolución espacial de 0.5°x 0.5°, generando celdas que cubrieron una superficie de 3090,25 km². EDGAR 4.2 tuvo mayor grado de resolución: 0.1° x 0.1°, con una celda básica de 123,61 km².

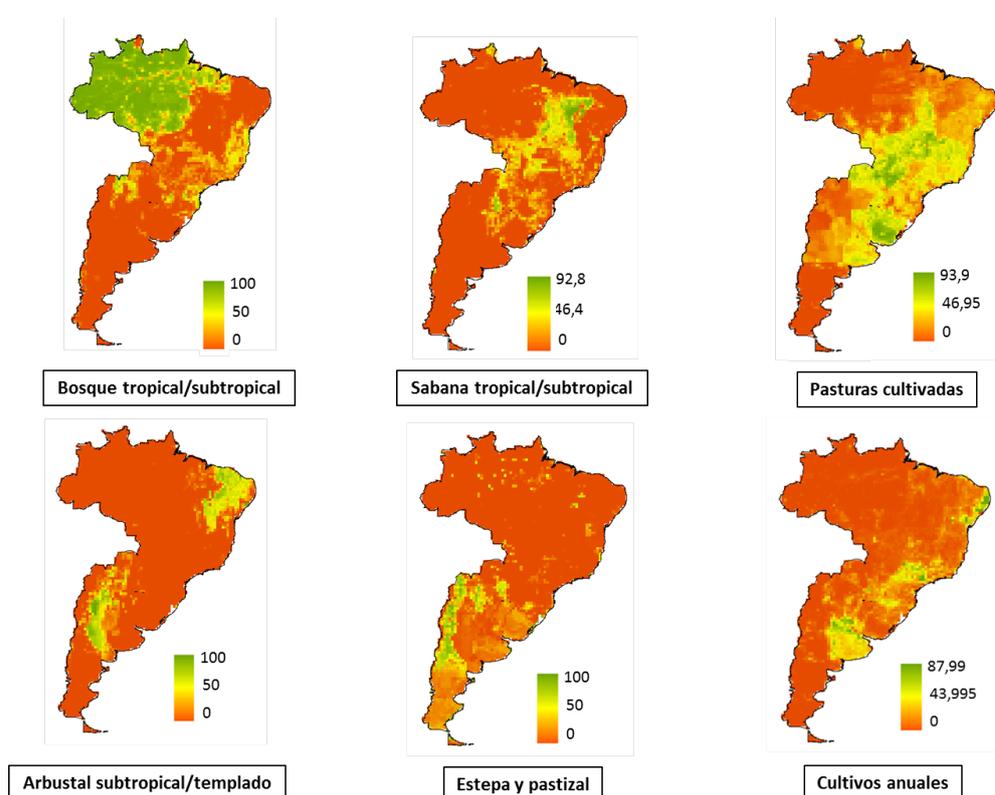


Figura 1M. Ubicación geográfica de los principales biomas analizados en este estudio para estimar los balances nacionales y regionales de carbono. Los mapas fueron elaborados por Ricard F.a partir del modelo HYDE (Klein Goldewijk et al. 2011).

Las Figuras 1M y 2M nos muestran, respectivamente, la ubicación geográfica de los principales biomas analizados en este estudio cuando se aplicó la base HYDE 3.1, y las

áreas con distintos niveles de emisión GEI para el sector rural cuando se aplicó la base EDGAR 4.2. Los cálculos nos permitieron cuantificar las emisiones correspondientes a la fermentación entérica proveniente del ganado, a los cambios en el uso de la tierra (deforestación, desvegetación, reforestación, etc) y a la producción de cultivos anuales, que fueron de 23%, 16% y 12% respectivamente. Para unificar y facilitar la expresión de los cálculos, las emisiones de equivalentes CO₂ fueron convertidas en carbono en base al peso de sus componentes moleculares. De esta manera, un kg de equivalente CO₂ contiene 27.3% de carbono.

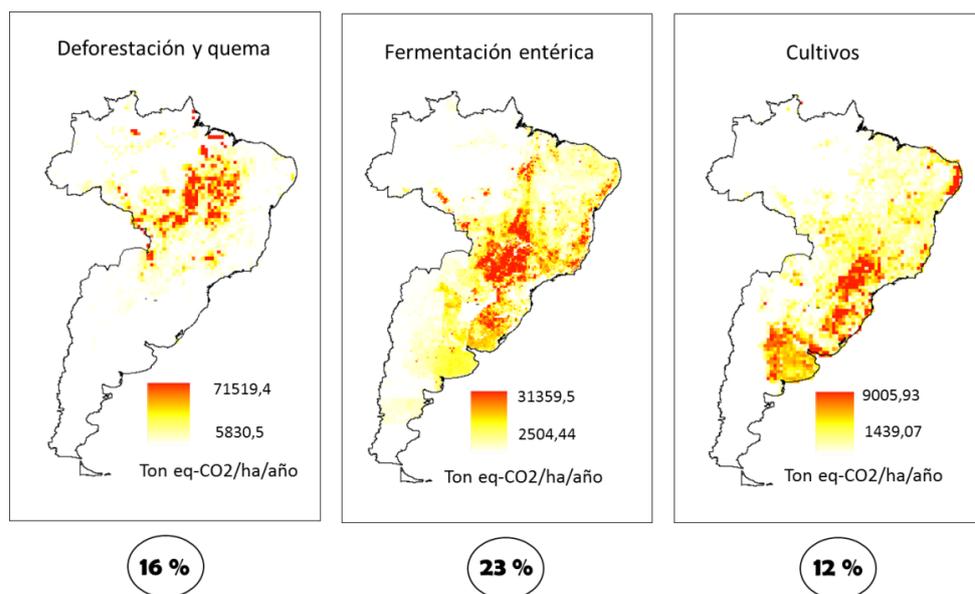


Figura 2M. Estimación de las emisiones de carbono en la región del MERCOSUR debidas a deforestación y quema, fermentación entérica y cultivos anuales. Los mapas fueron elaborados por Ricard F. a partir del modelos EDGAR 4.2.

2. Estimación de la captura y secuestro de carbono en la región MERCOSUR

Como se señaló más arriba, el método aplicado en este estudio consistió en hacer una “disección” detallada de la biomasa en raíces de cada bioma, computando la ganancia bruta anual de carbono, y corrigiendo esos valores por coeficientes de pérdida o fuga de carbono debidos a (i) la respiración del material orgánico en distintos biomas (bosques y plantaciones, arbustales, sabanas, pastizales, pasturas y cultivos anuales de cosecha), (ii) al patrón térmico del ambiente estudiado (tropical, subtropical, templado o frío), y (iii) a la transferencia de carbono desde las raíces para alimentar el rebrote de la biomasa aérea en los sistemas pastoriles más intensivos. Luego se juntaron todas esas piezas analizadas por separado y se armó el patrón general de emisión para un área, una región o un país (Figura 3M).

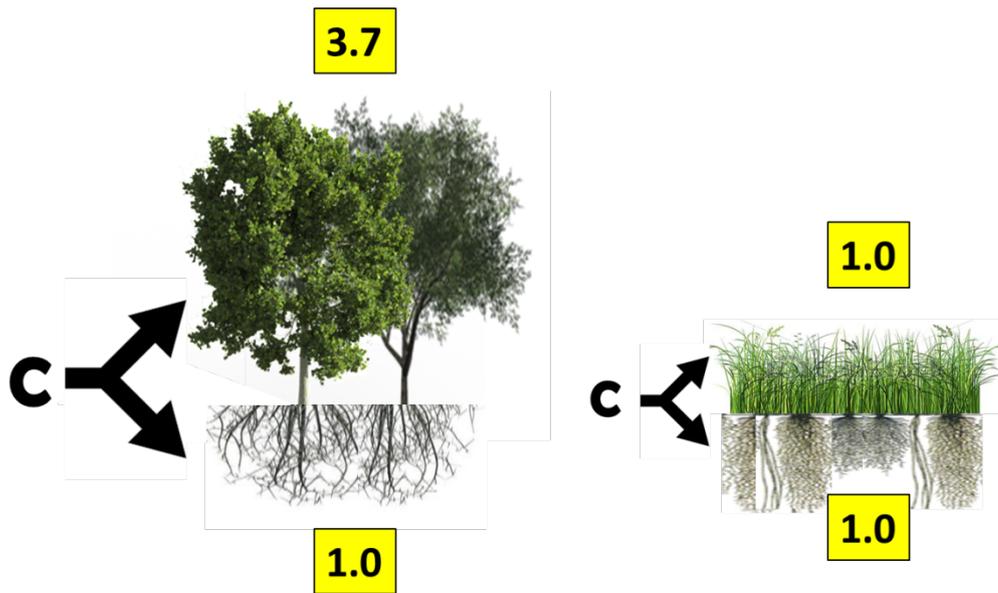


Figura 3M. La base metodológica del estudio consistió en estimar la partición del carbono secuestrado en la biomasa aérea y en la biomasa de las raíces

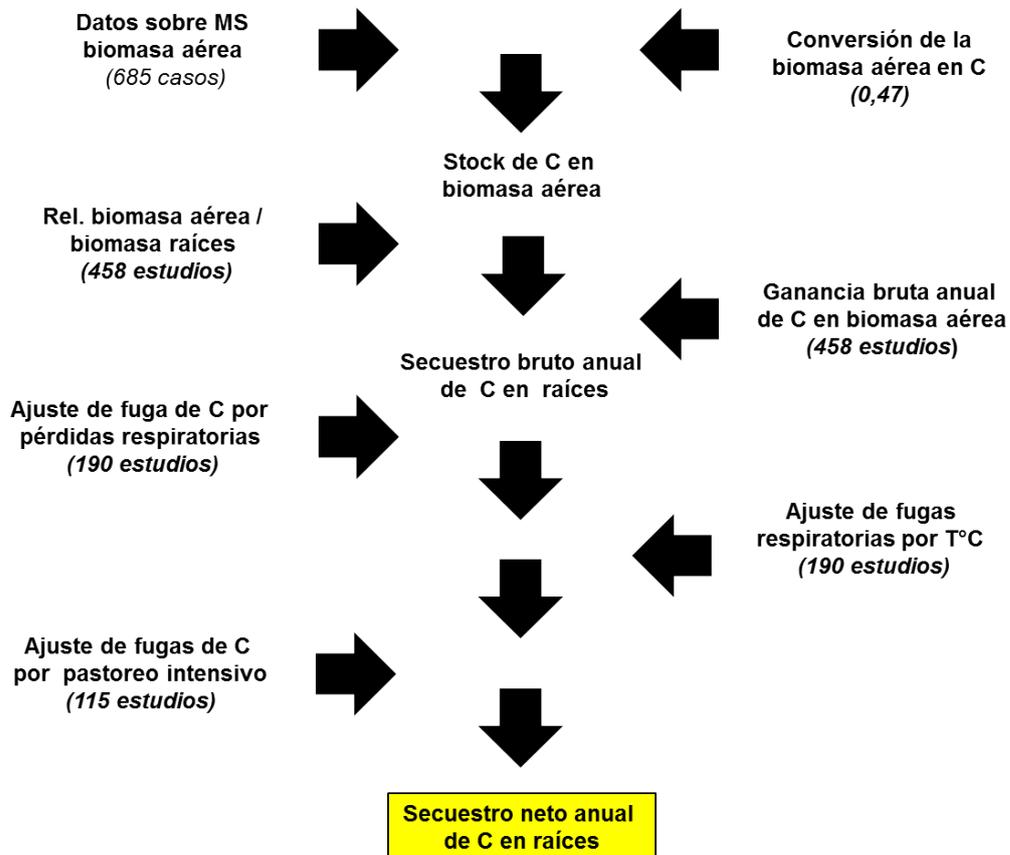


Figura 4M. Pasos metodológicos seguidos en este estudio para estimar el secuestro neto anual de carbono en raíces de los biomas analizados

El desarrollo metodológico está integralmente basado en la combinación de grandes bases de datos y trabajos de meta-análisis y revisión de literatura científica publicada en revistas sometidas a revisión de pares y con factor de impacto conocido. Por ejemplo, se partió de una base global inicial de más de 1500 estudios (Sterling et al., 2012) sobre evapotranspiración real en distintos biomas (bosques, plantaciones, arbustales, sabanas, pastizales y pasturas) distribuidos en Norte América (45 %), Europa (16 %), Asia (13 %) y Sud América (10 %). Esa colección inicial de estudios permitió posteriormente a Viglizzo et al. (2014) reconstruir una base de 685 sitios geográficos con datos de stock y productividad de biomasa aérea en distintas regiones térmicas (tropicales, subtropicales, templadas y frías) y pluviométricas (húmedas, subhúmedas, semiáridas y áridas). Esta información sirvió de base para cubrir todos los biomas y regiones climáticas de los países del MERCOSUR. El diagrama de flujo que describe los pasos metodológicos seguidos este estudio para estimar la captura y el secuestro de carbono en raíces se presentan en la [Figura 4M](#).

2.1 Determinación del secuestro bruto de carbono en raíces

El primer paso consistió en determinar, para cada bioma de la región, el stock de biomasa aérea expresado en ton de materia seca (MS) por hectárea. Esa estimación realizó para cada región climática mediante la base de 685 datos descripta arriba. Utilizando un factor de conversión recomendado por el IPCC (2006), se convirtieron los valores del stock MS en valores del stock de carbono.

Posteriormente, utilizando la base del IPCC (2003) para biomas leñosos, se estimaron los valores de ganancia anual de carbono (secuestro) por crecimiento de la biomasa aérea. Dos ecuaciones permitieron estimar este componente anual: (i) para leñosas nativas, la ecuación utilizada a partir de 45 estudios fue $Y = 0.06 X + 0.7357$, y (ii) para plantaciones forestales ese algoritmo fue $Y = 0.0606 X + 4.1772$, y fue el resultado de correlacionar 51 estudios. En ambos casos, el valor X corresponde al stock de carbono expresado en ton C/ha, y el valor Y representa la ganancia anual de C expresada en ton C/ha/año. Los respectivos coeficientes de correlación fueron 0.64 y 0.39 para leñosas nativas y plantaciones forestales. La ganancia anual de carbono en sabanas, pastizales, pasturas y cultivos anuales surgió directamente de promediar las bases de datos de 362 estudios que resumieron valores para esos cuatro biomas.

Utilizando datos provenientes de 132 estudios de distintas fuentes (Bolinder et al., 2002; IPCC, 2003; Mokany et al., 2005; Fidelis et al., 2014; Wang et al., 2014), se valoraron las relaciones entre biomasa aérea y biomasa en raíces (*shoot/root relations*) de distintos biomas. Esos estudios permitieron obtener un valor medio de ganancia de carbono en raíces por simple aplicación de esa relación (biomasa aérea/biomasa en raíces) a los valores de ganancia de carbono en la biomasa aérea. Las relaciones de carbono almacenado entre biomasa aérea y biomasa en raíces variaron con distintos biomas y en las diferentes regiones. Por ejemplo, tomando valores medios en el caso de algunos bosques dominantes esa relación fue 4.2:1.0, 3.7:1.0, 2.8:1.0 y 1.4:1.0 cuando estos se localizaron, respectivamente, en áreas tropicales, subtropicales, templadas y frías. Como se puede apreciar, la relación tiende a declinar desde los ambientes cálidos a los fríos, y el carbono almacenado en raíces tiende a tener mayor

peso relativo en los climas de menor temperatura media. Esa relación se amplía aún más en el caso de las sabanas, pastizales y pasturas. Los valores medios fueron 1.2:1.0, 1.0:1.0, 1.0:1.2 y 1.0:4.0 cuando estos estos biomas se evaluaron, respectivamente, en áreas tropicales, subtropicales, templadas y frías. Mucho menos clara y sin tendencias geográficas son esas relaciones en el caso de los cultivos anuales. Para estimar esta relación en ellos se recurrió a la base de datos de la National Grain Database de Estados Unidos construida a partir de 300 estudios entre 1940 y 2000 (Johnson et al., 2006). Sus valores resultaron 1.0:1.3, 1.0:1.1, 1.0:1.1, 1.0:1.2 y 1.0:2.0, respectivamente, para maíz, sorgo, trigo, soja y girasol. No obstante, la ganancia media de carbono en biomasa del subsuelo (ton/ha/año) fue muy variable entre un cultivo y otro: 3.8, 2.0, 1.5, 1.0 y 0.4 respectivamente para la misma secuencia de especies.

En este último componente (carbono acumulado anualmente en las raíces) está la clave utilizada en este estudio para estimar los secuestros de carbono.

2.2 Determinación del secuestro neto de carbono en raíces

Para estimar el secuestro neto de carbono en raíces (objetivo central de esta investigación) fue necesario estimar las pérdidas de carbono por fugas respiratorias en (i) biomas forestales, arbustales, sabanas/pastizales/pasturas y cultivos anuales, y (ii) en condiciones de pastoreo intensivo en tierras ganaderas. Esto requirió generar coeficientes de ajuste y corrección para producir los débitos anuales de carbono correspondientes a esas fugas.

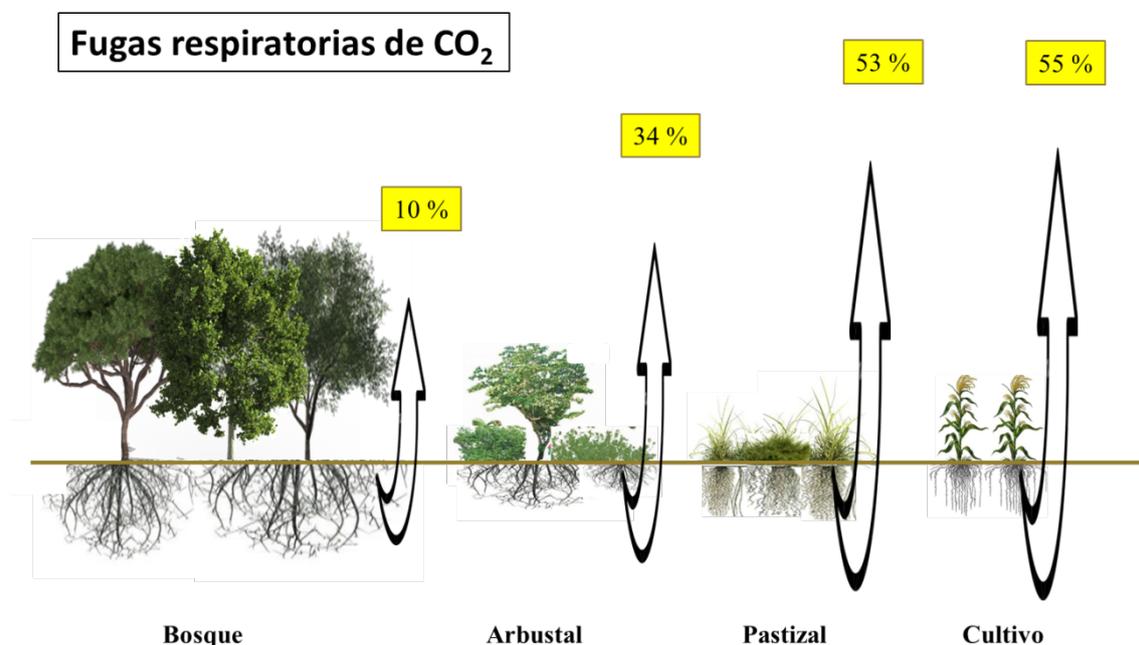


Figura 5M. Estimación de las fugas o pérdidas de carbono por respiración de plantas y microorganismos en cuatro biomas analizados.

Los coeficientes de ajuste por pérdidas respiratorias fueron establecidos a partir de un trabajo de meta-análisis de Gill y Jackson (2000) que incluyó 190 estudios publicados previamente. Estos autores determinaron que las pérdidas respiratorias de carbono en raíces (*carbon turnover*) varían de un bioma a otro, y crecen exponencialmente con la temperatura media anual de las regiones climáticas analizadas. Paradójicamente, las precipitaciones no tuvieron un efecto significativo sobre esas pérdidas. De esta manera, tomando los valores medios de Gill y Jackson (2000), se estimaron factores de fuga de 10%, 34%, 53% y 55% para forestales, arbustales, sabanas/pastizales/pasturas y cultivos anuales respectivamente (Figura 5M).

En base a los datos aportados por ese mismo trabajo (Gill y Jackson, 2000) se elaboró un algoritmo que describe una función exponencial que permite corregir esas fugas por un coeficiente de temperatura media anual, de manera que las máximas pérdidas relativas (coeficiente 1.0) ocurren en las regiones más cálidas del trópico, y las mínimas en las regiones más frías de clima boreal (coeficiente 0.1). Ver Figura 6M.

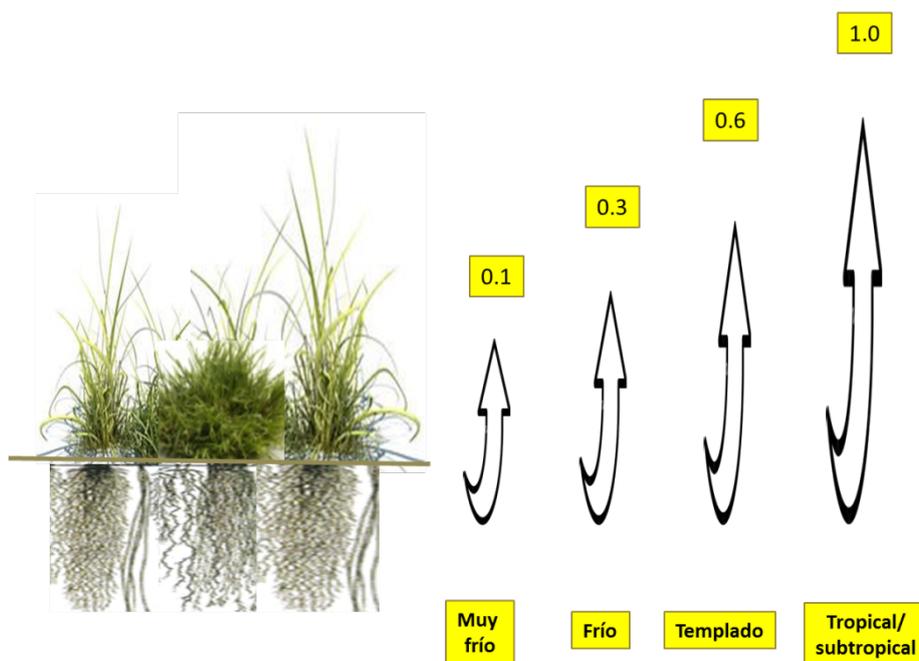


Figura 6M. Ajuste de las fugas de carbono por un factor de que valora la influencia de la temperatura media en cada región analizada

Finalmente, se asumió que las tierras de pastoreo más intensivo en la región del MERCOSUR corresponden a los sitios donde se han implantado pasturas cultivadas, y esas regiones se localizan principalmente en el Cerrado y el Sur del Brasil y en el Centro y el Norte del Uruguay. Para estimar las fugas de carbono en raíces por pastoreo intensivo se utilizó un trabajo de meta-análisis (Zhou et al., 2017) que incluyó 115 casos estudiados. El valor medio anual de pérdida de carbono en raíces fue estimado por estos autores en 21.5%, y ese valor fue utilizado como coeficiente de ajuste. En

este caso, esas pérdidas en pasturas cultivadas se sumaron a las fugas respiratorias y térmicas calculadas previamente.

Una vez estimado el secuestro bruto anual de carbono, y las fugas anuales por respiración, temperatura y pastoreo, se genera un valor final de secuestro neto de carbono en las raíces de cada bioma estudiado. En base esos valores finales correspondientes a cada país y a la región del MERCOSUR, se estimaron los balances correspondientes de carbono para el año 2010, año tomado como referencia para este estudio.