



**Cambios en los contenidos de carbono y nitrógeno orgánico del suelo luego del  
reemplazo de pastizales naturales por cultivos anuales sin laboreo.**

*Tesis de grado presentada para optar al título de  
Licenciado en Ciencias Ambientales*

*Carrera de Licenciatura en Ciencias Ambientales. Plan 2008*

**María Sol González Lanzillotta**

Nombre y apellido del Director: Gervasio Piñeiro

Nombre y apellido del Codirector: Sebastián Mazzilli

Nombre y apellido del consultor o Tutor: Priscila Pinto

Facultad de Agronomía  
Universidad de Buenos Aires

Fecha de entrega: (10/12/2018)

## **AGRADECIMIENTOS**

A Gerva, primero que nada, porque no hay gracias que pueda ser suficiente para expresar lo mucho que me hiciste crecer como persona. Siempre estás ahí con la puerta abierta de tu oficina para dar una mano, consejo o una sonrisa.

A Lola y Oggi, que junto con Gerva, hicieron del LART una segunda casa. Y junto a Mica, Lucas, Pau y Facu una familia.

A Bruno que dejó un poquito de su alma en el muestreo y a Pri que fue mi ángel guardián en cada proceso de esta tesis.

A Seba que me ayudó a conseguir los datos para esta tesis.

A Lu, Lucas, Lauti, Azu por ser los cuatro fantásticos. A Isa y Luly por ser un ejemplo para mi vida. A Lu Yanez, Lu Newkirk, Pau, Sara, Marian, Fiore, Fede, Palo y Dami por la hermosa compañía que me dieron estos años de carrera.

A Marian, por ser única.

A Chiara, porque es todo mi mundo.

A mi hermana, aunque no voy a decirle por qué le agradezco.

A mi mamá, por ser mi fuerza constante.

A mi papá, por ser mi guía en esta odisea.

## ÍNDICE

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	2
<b>RESUMEN</b> .....	4
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	5
<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	9
Sitio de estudio y diseño experimental .....	9
Muestreo de campo y análisis de laboratorio.....	13
Estimación de la productividad primaria neta.....	17
Análisis estadístico.....	17
<b>RESULTADOS</b> .....	19
Efecto de la agricultura sin laboreo sobre los contenidos de carbono y nitrógeno orgánico del suelo.....	19
Cambios en el COS y NOS a lo largo del tiempo.....	23
Factores que explican los cambios en los contenidos de C-POM y C-MAOM.....	30
<b>DISCUSIÓN</b> .....	31
<b>CONCLUSIÓN</b> .....	34
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	35
<b>APÉNDICE</b> .....	42

## **RESUMEN**

La actividad humana ha modificado los ecosistemas a una escala sin precedentes. Particularmente, la transformación de la vegetación nativa por sistemas agrícolas ha disminuido los contenidos de materia orgánica del suelo (MOS). Esto se debe a los efectos del laboreo sobre la oxidación de la MOS, pero también a la exportación de nutrientes y otras alteraciones biogeoquímicas realizadas por los cultivos anuales. El objetivo de esta tesis es analizar los cambios en los contenidos de carbono y nitrógeno orgánico del suelo (COS y NOS) ocurridos en sitios donde se reemplazó al pastizal natural por cultivos anuales sin realizarse ningún laboreo del suelo, es decir, en siembra directa continua. Se busca evaluar, en situaciones reales de producción, los cambios en los contenidos de COS y NOS provocados por los cultivos anuales, excluyendo los efectos del laboreo. Para ello, se re-muestraron los sitios evaluados por Mazzilli (2015) y se identificaron nuevos sitios de pares de lotes agrícolas en siembra directa (nunca laboreados) con pastizales naturales adyacentes. En todos los sitios se muestrearon a distintas profundidades los contenidos de COS y NOS en la fracción particulada (POM) y la fracción asociada a los minerales (MAOM) de la MOS. Los resultados sugieren que por más que se excluya el efecto del laboreo, existen otros procesos que provocan una disminución del COS y NOS, mayores al 20%, similares a las reportadas bajo laboreo en la región. La POM y la MAOM mostraron pérdidas similares y el aporte de residuos subterráneos fue la única variable que explicó la variación del COS en la fracción MAOM. Estos resultados sugieren que, para aumentar o mantener los contenidos de MOS sería necesario realizar otros manejos, además de la siembra directa, tendientes a aumentar la cantidad de residuos de los cultivos, principalmente vía raíces.

## **PALABRAS CLAVE**

Materia orgánica del suelo, materia orgánica particulada, materia orgánica asociada a los minerales, isotopos de carbono, servicios ecosistémicos, siembra directa, cambio de uso en el suelo, Pastizales del Río de la Plata, agricultura.

## INTRODUCCIÓN

Los cambios en el uso de la tierra representan un complejo problema ambiental, socioeconómico y tecnológico (Baldi et al., 2008). El aumento del área destinada a la agricultura es esencial para la subsistencia humana, pero como resultado, se alteran tanto los flujos de materia y de energía, así como el funcionamiento y la estructura de los ecosistemas. Una de las consecuencias más importantes, es que se afectan la cantidad y la calidad de la materia orgánica del suelo (MOS), una de las principales reservas de materia y energía de los ecosistemas (Guo & Glifford, 2002). Es necesario, por lo tanto, cuantificar los cambios producidos en la MOS, para así diseñar medidas que permitan conservarla y, de esta manera, lograr agroecosistemas sustentables en el largo plazo.

Cuando los ecosistemas naturales, como pastizales o bosques, son convertidos a sistemas agrícolas, la MOS disminuye entre un 20 a 70% (Crew & Rumsey, 2017). Las pérdidas de MOS observadas en suelos agrícolas pueden deberse a distintas causas como la erosión, el laboreo, la extracción de nutrientes, o cambios en la partición de biomasa de la vegetación (Blanco-Canqui & Lal, 2004, Sawchik et al., 2012; Bolinder et al., 2012). La producción primaria neta, la asignación de recursos entre los órganos aéreos y subterráneos y la distribución vertical de biomasa subterránea son determinantes principales de la formación de la MOS y su distribución en el perfil del suelo (Jobbagy & Jackson, 2000). La transformación de ecosistemas naturales como pastizales a sistemas agrícolas aumenta en gran medida la partición de biomasa aérea vs subterránea de la vegetación (Bolinder et al., 1997). Esto puede resultar en una disminución de los flujos de entrada de carbono y nitrógeno al suelo por parte de los cultivos (Mazzilli et al., 2015). A su vez, al extraer parte de la biomasa resultante por la cosecha y al provocar cambios en la productividad primaria también se podría afectar la MOS. Por otro lado, el laboreo de los suelos agrícolas aumenta los egresos de carbono del sistema al generar la rotura de los agregados del suelo, causando así un aumento en la respiración y en la actividad de los microorganismos del suelo (Angers et al., 1997; Alvarez et al., 2001b; Caride et al., 2012).

Las pérdidas de MOS ocasionadas por la agricultura han sido atribuidas principalmente al laboreo del suelo y, por tanto, se generaron expectativas respecto a que los contenidos de MOS aumentarían sustancialmente luego de la introducción de la siembra directa. Diversos trabajos muestran que la siembra directa no ha logrado aumentar sustancialmente los contenidos de MOS (Angers & Eriksen-Hamel, 2008; Blanco-Canqui & Lal, 2008), aunque favorece la acumulación de C en los primeros centímetros del suelo tanto por la disminución de la erosión, como por la conservación de los agregados del suelo (Paustian et al., 1997; West & Post, 2002). Por lo tanto, estas evidencias cuestionan la importancia del laboreo en la pérdida de COS.

Debido a que la conversión de la vegetación natural al uso agrícola comenzó históricamente con la labranza, son escasos los trabajos que han evaluado la conversión de sistemas naturales a agricultura, sin laboreo desde sus inicios (Dupont et al., 2010). En la literatura, sólo dos trabajos evalúan los efectos sobre la MOS de la conversión de pastizales a sistemas de cultivos anuales en estas circunstancias (en siembra directa). Por un lado, Dupont et al. (2010), analizó los cambios en el balance de MOS y la biota del suelo en pastizales de EE.UU., y sus resultados sugieren que la disminución en la calidad del suelo y en sus funciones biológicas no son causadas solamente por el laboreo, sino también por cambios en las entradas de energía y nutrientes al suelo. Por otro lado, Mazzilli (2015) en su tesis doctoral evaluó ocho sitios de estudio pareados de pastizal y agricultura en siembra directa en establecimientos comerciales (donde nunca se había realizado laboreo), en la región de los Pastizales del Río de la Plata. Sus resultados, contrariamente a lo esperado, muestran caídas de la MOS en las distintas fracciones evaluadas (POM y MAOM) durante los primeros 3 años, pero incrementos paulatinos en los contenidos de MOS en años posteriores (entre los 4 y 6 años) en algunos de los sitios estudiados. Esta disminución inicial puede deberse a un aumento en la descomposición de la MOS, efecto “priming”, provocado por la gran cantidad de raíces dejadas en el suelo como sustrato para los microorganismos luego de la eliminación del pastizal (Mazzilli et al., 2012; Kuzyakov et al., 2000; Fontaine et al., 2003), pero no está claro por qué podrían darse aumentos posteriores de la MOS en los sistemas agrícolas.

Debido a que la MOS es compleja y heterogénea es necesario separarla en distintos componentes o fracciones para lograr un mejor entendimiento de los procesos de humificación y mineralización de la MOS. Un método muy usado es el fraccionamiento físico por tamaño, por el cual se separa la materia orgánica particulada (POM), con un tamaño de partícula mayor a 50  $\mu\text{m}$ , y la materia orgánica asociada a los minerales (MAOM), con un tamaño de partícula menor a 50  $\mu\text{m}$  (Cambardella & Elliot, 1992; Christensen, 2001). La POM está compuesta por restos vegetales menores a 2 mm y su contenido de carbono depende principalmente de la magnitud de los aportes vegetales y de la velocidad de su descomposición por los microorganismos siendo limitada principalmente por la presencia de compuestos recalcitrantes y de una alta relación C:N. La fracción MAOM, por otra parte, está compuesta por productos derivados de microorganismos que presentan bajo peso molecular y baja relación C:N. Estos compuestos se encuentran adsorbidos a las arcillas y limos, ocluidos dentro de los agregados o asociados a metales del suelo, adquiriendo así una protección física contra la descomposición (Pinto, 2018; Fontaine et al., 2003). En esta fracción, a diferencia de la POM, es la textura del suelo la que condiciona principalmente su almacenamiento. La importancia de analizar por separado ambas fracciones recae en que estas tienen diferentes tasas de degradación y formación, así como diferente accesibilidad e interacción con las superficies minerales (Tan et al., 2007).

Cuando los cambios de vegetación involucran el reemplazo de especies  $C_3$  por  $C_4$  o vice versa, la proporción de MOS que deriva del tipo de vegetación vieja y nueva puede ser determinado usando isótopos (Eclesia et al., 2015). El uso del análisis de abundancia relativa de  $^{13}\text{C}$  ( $\delta^{13}\text{C}$ ) es posible debido a la discriminación diferencial de isótopos de las plantas  $C_3$  (ciclo de Calvin,  $\delta^{13}\text{C}$  que varía de -35 a -20) y plantas  $C_4$  (ciclo de sombreado (Hatch–Slack cycle),  $\delta^{13}\text{C}$  que van desde -19 hasta -9) siempre que los dos tipos de vegetación tengan vías fotosintéticas contrastantes (O'Leary, 1981). De esta forma, determinar los cambios de la relación isotópica de  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  permite evaluar las especies preponderantes de la comunidad vegetal que dieron origen al carbono acumulado en el suelo.

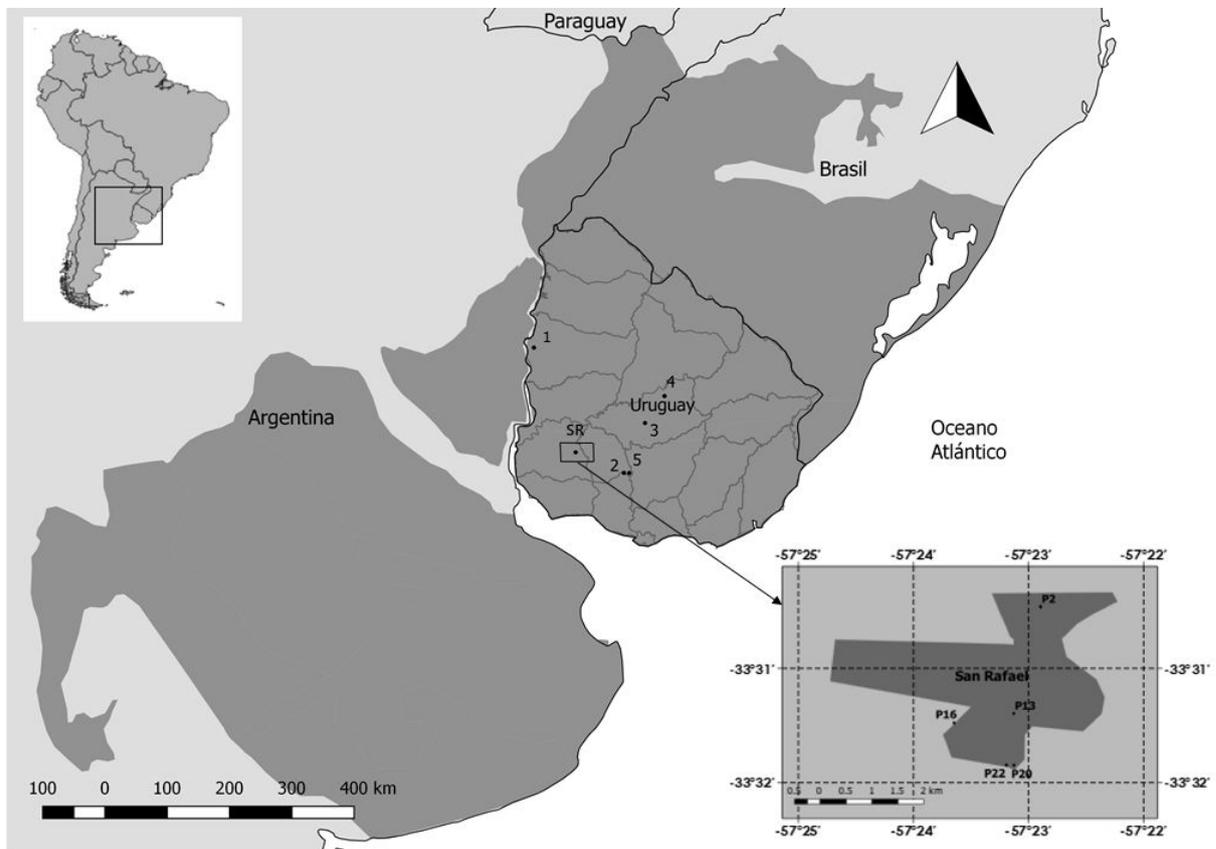
La expansión de la agricultura, recientemente sufrida en la región de los Pastizales del Río de la Plata, ha generado una oportunidad única para estudiar el remplazo de pastizales naturales por sistemas agrícolas, pero sin la realización de laboreos. El trabajo de Mazzilli (2015) mencionado anteriormente, identificó sitios en la región en donde pastizales naturales habían sido eliminados mediante herbicidas y los cultivos posteriores implantados con técnicas de siembra directa, por lo que, el suelo permanecía intacto sin disturbar (sin roturación por efecto del laboreo). Todos los sitios seleccionados poseían escasa o nula pendiente por lo que no es esperable pérdidas de MOS por erosión. El experimento evaluó sitios donde la conversión se había realizado a lo largo de un gradiente desde 1 año atrás hasta 6 años considerando la fecha de muestreo (entre el 2009 y 2010). Sería interesante poder volver a muestrear los sitios identificados por Mazzilli para analizar, varios años después, cual ha sido la evolución de los cambios en la MOS.

El objetivo de esta tesis es evaluar si existen disminuciones en los contenidos de C y N en las distintas fracciones de la MOS (POM y MAOM) en sistemas agrícolas realizados sin laboreo previo, en comparación a los pastizales naturales. Específicamente, se buscó comparar los cambios ocurridos a distintas profundidades y a lo largo del tiempo desde la conversión a la agricultura. La hipótesis de trabajo es que la conversión de pastizales naturales a sistemas agrícolas en siembra directa, (sin laboreo) disminuye los niveles de MOS en ambas fracciones, debido a la menor partición de biomasa a raíces y a la extracción de nutrientes por las cosechas. Por lo tanto, esperamos encontrar pérdidas de MOS similares o levemente menores a las reportadas para sitios en la región en donde se evaluó el remplazo pastizales naturales por cultivos anuales realizando laboreos (pérdidas del 8 al 30% de la MOS total) (Alvarez, 2001a).

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Sitio de estudio y diseño experimental**

El trabajo se realizó en distintos sitios agrícolas de Uruguay, dentro de la región de pastizales del Río de la Plata (Figura 1). Los pastizales naturales de esta área están compuestos por especies tanto anuales como perennes, con síndrome fotosintético C<sub>3</sub> y C<sub>4</sub> (Vega et al., 2009; Soriano, 1991; Burkart et al., 1998; Paruelo et al., 2007). Las temperaturas medias para todo el Uruguay son de 17,5°C, con una temperatura media máxima de 19,0°C sobre Artigas y una media mínima de 16,0°C sobre la costa atlántica en Rocha. La precipitación media anual varía de norte a sur de 1100 mm en el sur a 1500 mm en el norte. La actividad principal de la región es la ganadería y agricultura extensiva, esta última realizada en siembra directa. El principal cultivo agrícola es la soja, seguido por el maíz, el trigo y el girasol (FAO, 2014). En la región agrícola predominan los suelos ricos en arcilla (Vertisoles) con alto riesgo de erosión hídrica y bajo drenaje (Pinto et al., 2017; Panigatti, 2010). Para este trabajo se escogieron solo sitios en zonas de baja o nula pendiente, con poco riesgo de pérdida de suelo por erosión.



**Figura 1.** Mapa de ubicación de sitios de muestreo en la República Oriental del Uruguay, América del Sur, dentro de la región de Pastizales del Río de la Plata. Cada punto corresponde a un par analizado (AG-PZ). Los establecimientos re-muestreados de la investigación de Mazzilli (2015) se identifican con números: Quebracho (1), Chamicera (2), La Pecuaria (3), San Jorge (4) y Cerro Colorado (5). El rectángulo en el mapa central representa el establecimiento San Rafael (SR) donde se muestrearon los pares de agricultura y pastizal de los puntos: P2, P13, P16, P20 y P22, como se muestra en el mapa de mayor escala abajo a la izquierda.

El diseño de muestreo se basó en diez sitios pareados de agricultura y pastizal en donde nunca se laboreó el suelo, y en los cuales los cultivos agrícolas se siembran con siembra directa desde la conversión del pastizal (sin nunca haber laboreado el suelo). Se re-muestrearon cinco sitios identificados y estudiados por Mazzilli (2015) de

un total ocho sitios muestreados en su trabajo de investigación, ya que los tres restantes habían sido convertidos a la ganadería o no se pudo ingresar para realizar el muestreo. Los sitios identificados por Mazzilli que se re-muestrearon fueron: Quebracho, Chamicera, La Pecuaria, San Jorge y Cerro Colorado (Cuadro 1). Se sumaron, a su vez, cinco nuevos sitios pareados identificados recientemente pertenecientes a un mismo establecimiento agrícola: "San Rafael". Cada sitio dentro de este campo cuenta con distinto historial de manejo y fueron identificados como: P2, P13, P16, P20 y P22 (Cuadro 1). Estos nuevos sitios se encuentran todos sobre suelos de similares características edáficas, siendo todos Brunosoles Subéutricos Háplicos Fr y pertenecen a un mismo grupo CONEAT de suelos, los 5.02b, con las mismas capacidades productivas. En este diseño experimental se parte del supuesto de que el pastizal representa a la agricultura adyacente, previa a su modificación. Es decir, el pastizal representa la situación original antes de la implementación del sistema agrícola. Por lo tanto, el área escogida del tratamiento de pastizal posee la misma textura y posición en la pendiente que su par agrícola, lo que permite su comparación.

**Cuadro 1: Caracterización de los sitios de estudio.**

	Latitud	Longitud	Pastizal	Clasificación de suelos Uruguay	Grupo Coneat	Fecha de primer herbicida	Fecha muestreo Mazzilli (2015)	Años de agricultura Mazzilli (2015)	Fecha de muestreo Gonzalez	Años de agricultura Gonzalez	
<b>Quebracho</b>	1	-31,97	-58,03	Clausurado	Brunosol Étrico Típico Fr	11.4	04/06/08	03/10/09	1,3	20/06/17	9
<b>Chamicera</b>	2	-33,84	-56,55	Clausurado	Brunosol Étrico Típico Fr	10.2	15/10/04	28/10/09	5	21/06/17	12,7
<b>La Pecuaria</b>	3	-33,12	-56,17	Pastoreado	Brunosol Étrico Típico Ar Ac	9.6	15/09/07	15/04/10	2,6	22/06/17	9,8
<b>San Jorge</b>	4	-32,73	-55,82	Pastoreado	Argisol Dístrico Ótrico Abrúptico Ar	8.6	01/10/05	12/08/10	4,9	23/06/17	11,8
<b>Cerro Colorado</b>	5	-33,74	-56,67	Pastoreado	Brunosol Subéutico Háplico Fr	5.02b	10/02/07	28/10/09	2,7	07/12/17	10,9
	<b>P2</b>	-33,51	-57,38	Pastoreado	Brunosol Subéutico	5.02b	01/04/13	-	-	07/12/17	4,8
	<b>P13</b>	-33,53	-57,38	Pastoreado	Brunosol Subéutico	5.02b	01/01/07	-	-	05/12/17	10,9
<b>San Rafael</b>	<b>P16</b>	-33,53	-57,39	Pastoreado	Brunosol Subéutico	5.02b	01/01/10	-	-	06/12/17	7,9
	<b>P20</b>	-33,54	-57,38	Pastoreado	Brunosol Subéutico	5.02b	01/01/16	-	-	06/12/17	1,9
	<b>P22</b>	-33,54	-57,38	Pastoreado	Brunosol Subéutico	5.02b	01/01/10	-	-	06/12/17	7,9

## Muestreo de campo y análisis de laboratorio.

Para el muestreo a campo se utilizó el mismo protocolo llevado a cabo por Mazzilli en 2009 y 2010, en el cual se muestrearon seis profundidades (0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-50, 50-70) con un barreno de 2 cm de diámetro. Debido a que, en el estudio de Mazzilli, no se detectaron diferencias significativas entre los tratamientos en las profundidades de 30-50 y 50-70, en esta tesis se reportan solamente los resultados de 0-30. Se tomaron 12 piques de barreno agrupados en 3 muestras compuestas por sitio y se llevaron al laboratorio para estimar el contenido de humedad, densidad aparente y masa del suelo, secando cinco gramos de suelo a una temperatura de 105 °C y luego pesando la masa de suelo restante. El suelo restante se tamizó en una malla de 2 mm para separar las raíces y piedras que pueda contener la muestra y se aplicó el método de Camardella y Elliott (1992) para determinar las distintas fracciones de la MOS, la fracción particulada (POM) y la fracción asociada a los minerales de arcilla y limo (MAOM). Para ello, se tomaron 20 gramos de suelo y se colocaron en 30 ml de una solución dispersante de hexametáfosfato de sodio al 5% y se agitó durante 18 horas. Luego se pasó la solución por un tamiz de 53 micrones, con la ayuda de agua destilada. El material que atravesó el tamiz corresponde a la MAOM y el que queda, a la POM. Cada uno se colocó en vasos de precipitados y se llevó a una estufa a 60 °C durante 15 días para evaporar el agua. Una vez secas, se molieron a polvo en un molinillo y se analizaron los contenidos de C, N y la relación isotópica  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  con un analizador elemental C-N y un espectrómetro de masas en la universidad de Davis, en EE.UU. Se determinaron así, los contenidos de C y N en la fracción POM (C-POM y N-POM) y en la fracción MAOM (C-MAOM y N-MAOM) Las relaciones isotópicas se expresaron como valores de  $\delta^{13}\text{C}$  (Ecuación 1).

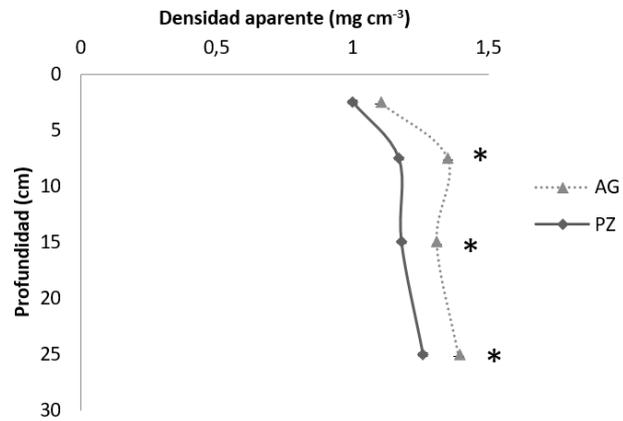
$$\delta^{13}\text{C} = \left[ \frac{\left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}}\right)_{\text{muestra}}}{\left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}}\right)_{\text{estandar}}} - 1 \right] * 1000 \text{‰} \quad [1]$$

El estándar usado para reportar la información de  $^{13}\text{C}$  ( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}=0.0112372$ ) es la caliza Vienna-Pee De Belemnite (V-PDB) (Solomon et al., 2002).

Los valores obtenidos de COS y NOS de cada fracción y profundidad tuvieron que ser corregidos por su contenido de hexametáfosfato de sodio presente en las muestras de MAOM. También, para que las muestras de agricultura y pastizal natural puedan ser comparables, el contenido de carbono y nitrógeno se expresó en base a un valor de masa constante equivalente para evitar la incidencia de compactación o expansión del suelo (Davidson et al., 1993, Eclesia et al., 2012). Debido a que los sitios pareados, difirieron en su densidad aparente (Figura 2) fue necesario realizar una corrección a masa contante de suelo. Para ello, se utilizó la fórmula de Solomon (2002) (Ecuación 2) para cada profundidad, tomando como referencia en todos los casos a la situación original, el pastizal natural.

$$Z_{corrected} = \left( \frac{\rho_{pastizal}}{\rho_{agricultura}} \right) * Z \quad [2]$$

Donde Z corresponde a la profundidad en cm del perfil evaluado y  $\rho_{pastizal}$  y  $\rho_{agricultura}$  son la densidad del pastizal y agricultura promedio obtenida para esa profundidad del perfil. Los valores obtenidos fueron contrastados con los del trabajo de Mazzilli (2015), logrando entonces tener datos de COS y NOS par un mismo sitio en dos fechas de muestreo. No se detectaron diferencias estadísticamente significativas entre la textura de los sitios agrícolas y los pastizales. Cada sitio muestreado presentó distintas edades de conversión a la agricultura sin laboreo entre 1,9 a 12,7 años. Se registraron los rendimientos y los cultivos que se sembraron desde el remplazo del pastizal natural. Si bien algunos cultivos fueron especies C<sub>4</sub> tales como Sorgo y Maíz, en su gran mayoría se cultivaron especies C<sub>3</sub> (Cuadro 2).



**Figura 2.** Densidad aparente promedio (mg cm<sup>-3</sup>) de los sitios de los tratamientos Agricultura (AG) y Pastizal natural (PZ) en función de las profundidades (cm). Las diferencias significativas se expresan con \* para  $p < 0.05$  para los distintos tratamientos.

**Cuadro 2. Secuencia de cultivos para cada sitio desde el inicio del sistema agrícola. Las letras “A”, “B”, “C” y “D” representan una duración de tres meses cada uno.**

		Establecimientos										
		San Rafael					Quebracho	Chamicera	La Pecuaria	San Jorge	Cerro Colorado	
		P2	P13	P16	P20	P22	1	2	3	4	5	
Secuencia de cultivos (años)	1	A	BQ	BQ	BQ	BQ	BQ	BQ	BQ	BQ	BQ	
		B	RG	RG	Av	Av	Av	Sj	Sj	Gr	Mz	Tr
		C	BQ	Sg	BQ	Sg	BQ	Tr	BQ	Tr	BQ	Sj
		D	RG	Av	Av	Av	Av	Sj	Sj	Sj	Sj	BQ
	2	A	Sj	PP1	Sj	AN	Sj	Sj	Sj	Sj	BQ	
		B	Sj	PP1	Sj	AN	Sj	Sj	Sj	Sj	BQ	
		C	Sj	PP1	Sj	AN	Sj	Sj	Sj	Sj	BQ	
		D	Sj	PP1	Sj	AN	Sj	Sj	Sj	Sj	BQ	
	3	A	TVSF	PP2	Av		Av	Sj	Sj	Sj	Sj	Cb
		B	TVSF	PP2	Av		Av	Sj	Sj	Sj	Sj	Cb
		C	BQ	BQ	Sg		Sg	Tr	Cb	BQ	BQ	Sj
		D	Av	Sg	BQ		BQ	Sj	Sj	Sj	Sj	Tr
	4	A	Sj	Av	Sj		Sj	Cb	Tr	BQ	BQ	Mz
B		Sj	Av	Sj		Sj	Cb	Tr	BQ	BQ	Mz	
C		BQ	BQ	TVFS		TVFS	Sj	BQ	Sg	Sj	Sj	
D		AVENA	Av	TVFS		TVFS	Sj	BQ	Sg	Sj	Sj	
5	A		BQ	BQ		BQ	Tr	Tr	BQ		Tr	
	B		BQ	Av		Av	Sj	Sj	Sj		Sj	
	C		RG+TB	Sj		Sj	Sj	Sj	Sj		Sj	
	D		BQ	BQ		BQ	COB	Cb	BQ		Cb	
6	A		RG+TB	AVENA		AVENA	Sj	Sg	Sg	BQ	Sj	
	B		Sg	Sj		Sj	Cz	BQ	Av	Sj	Tr	
	C		AN	AN		AN	Sj	Sj	Sj		Sj	
	D		Sj	Sj		Sj	Sj	Sj	Sj		Sj	
7	A							Tr	TP		BQ	
	B		TVSF					Sj	Sj	BQ	Sj	
	C		BQ					COB	Av	Sj	Colza	
	D		Av					Sj		BQ	Sj	
8	A		Sj					Av		Sj	Tr	
	B		Sj					Sg		BQ		
	C		BQ					AN		BQ		
	D		AVENA							Av		
9	A							Sj				
	B											
	C							COB				
	D											
10	A											
	B											
	C											
	D											
11	A											
	B											
	C											
	D											
12	A											
	B											
	C											
	D											
13	A											
	B											
	C											
	D											

BQ: Barbecho químico, Sj: Soja, Tr: Trigo, Cb: Cebada, Sg: Sorgo, COB: Cultivo de cobertura, Cz: Colza, Gr: Girasol, Mz: Maíz, TP: Cobertura de Trébol Persa, RG: Raygrass, RG+TB: Raygrass con Trébol Blanco, AN: Avena negra, TVSF: Trébol Vesiculoso, PP1 y PP2: Pradera de Cebadilla con Trébol Rojo.

### **Estimación de la productividad primaria neta**

A partir de los datos de rendimientos de los cultivos de cada lote donde se tomaron las muestras, se estimó la biomasa aérea total (BAT) a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{BAT} = Y / C \quad [3]$$

En la cual Y es el rendimiento en Kg ha<sup>-1</sup> y el IC es el índice de cosecha de biomasa de los cultivos. Los valores de IC fueron obtenidos de Mazzilli (2015) y Unkovich et al. (2010). La biomasa aérea remanente se estimó como la diferencia entre la biomasa aérea total y el rendimiento, es decir, lo cosechado. Esta será la biomasa aérea que efectivamente pueda ser incorporada al suelo. Para los valores de concentración de C en la biomasa aérea (pCa) se utilizaron los resultados de Mazzilli (2015) y al multiplicarlo por la biomasa aérea remanente, se obtiene el carbono en los residuos de biomasa aérea (CRa):

$$\text{CRa} = (\text{BAT} - Y) * \text{pCa}. \quad [4]$$

Para obtener el carbono de los residuos de biomasa subterránea (CRs), se utilizó la relación entre biomasa aérea y subterránea (Ras) de los cultivos reportados en los diferentes lotes. Los valores de compilaron de la revisión realizada por Bolinder et al. (2007) y una serie de ensayos locales (Pinto, 2018). La concentración de C en la biomasa subterránea (pCs) también se obtuvo de Mazzilli (2015).

$$\text{CRs} = \text{Ras} * \text{BAT} * \text{pCa} \quad [5]$$

Se calculó el CRa y el CRs y se promedió para obtener un valor de incorporación anual de carbono al suelo.

### **Análisis estadístico**

Para el análisis estadístico de los cinco sitios Quebracho, Chamicera, La Pecuaria, San Jorge y Cerro Colorado, se llevó a cabo un análisis de varianza, utilizando un diseño en bloques completos con una repetición por bloque, para evaluar si había diferencias significativas entre los tratamientos de pastizal natural de Mazzilli

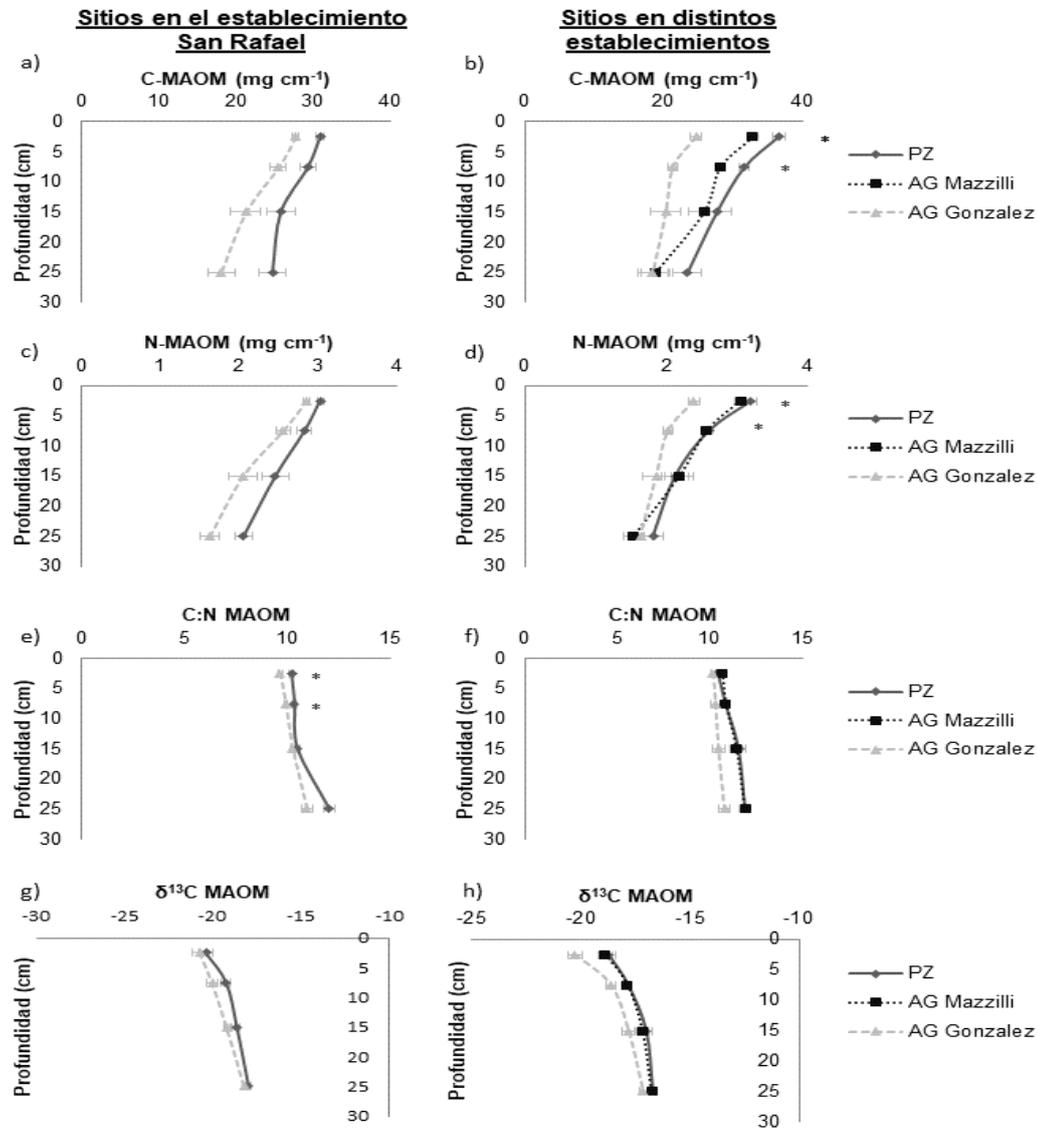
(2015) y los nuevos valores de pastizal natural tomado para este trabajo. Se evaluaron las variaciones en el contenido de carbono orgánico, nitrógeno total,  $\delta^{13}\text{C}$ , C:N a cada profundidad 0-5, 5-10, 10-20 y 20-30 cm para las dos fracciones, tanto POM como MAOM. Se utilizó un análisis de la varianza similar al anterior para evaluar los nuevos sitios ubicados en el establecimiento San Rafael. Para ambos sets de datos, se realizó un gráfico de tendencias en el tiempo para cada sitio. Se evaluó los contenidos de COS acumulados en todo el perfil 0-30 para cada fracción a través de los años, siendo los datos obtenidos para el pastizal natural los valores al tiempo cero antes de la conversión a agricultura y los valores del trabajo de Mazzilli (2015) y los nuevos valores según los años transcurridos para cada muestreo. Finalmente, se llevó a cabo un análisis de correlación entre las variables de cada sitio tales como los años de agricultura, el carbono aéreo o subterráneo incorporados al perfil, el porcentaje de soja, sorgo, trigo, cultivo de cobertura, barbecho, leguminosas, gramíneas,  $\text{C}_3$ ,  $\text{C}_4$  para evaluar si había alguna variable que explicara los cambios en el COS y NOS de ambas fracciones. Con las variables que presentaron un valor alto de correlación de Pearson y un  $p < 0,05$ , se realizó un análisis de regresión.

## RESULTADOS

### **Efecto de la agricultura sin laboreo sobre los contenidos de carbono y nitrógeno orgánico del suelo.**

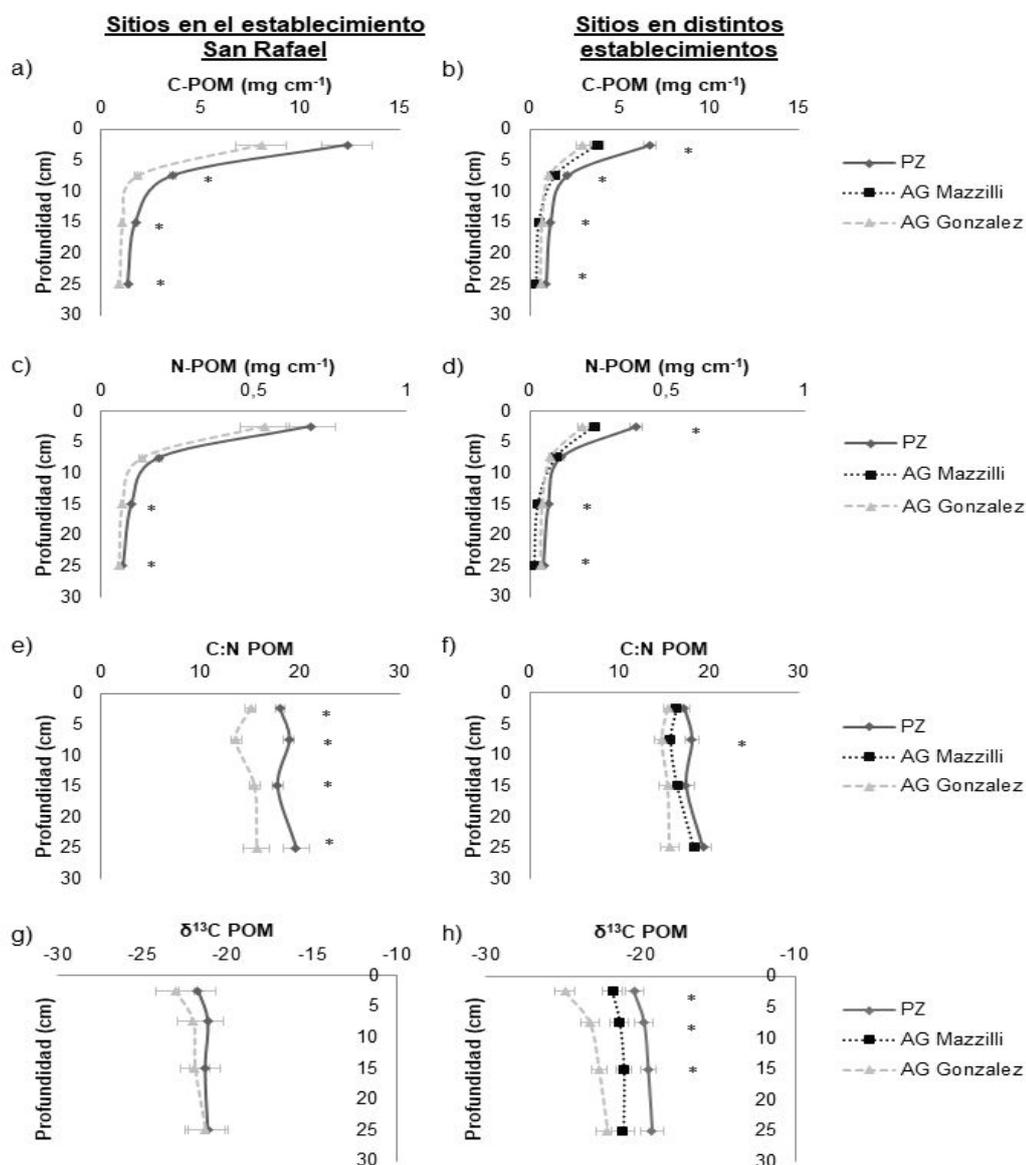
Los lotes con agricultura continua sin laboreo relevados por Mazzilli (2015) (AG Mazzilli) y los relevados en esta tesis (AG Gonzalez) tuvieron menores contenidos de COS y NOS para las dos fracciones en todo el perfil, comparado a los lotes adyacentes de pastizal natural (Figura 3 y 4). Sin embargo, las diferencias de C-MAOM fueron estadísticamente significativas ( $p < 0,05$ ) solamente para las profundidades de 0-5 y 5-10 cm. Las pérdidas de C-MAOM bajo agricultura fueron de -12% y -27%, para Mazzilli y Gonzalez respectivamente (Figura 3.b). Para la fracción POM, las diferencias fueron significativas entre el pastizal natural y ambos tratamientos de agricultura presentando una disminución de la C-POM del -46% y -49% con respecto al pastizal, para la situación de agricultura de Mazzilli y Gonzalez respectivamente (Figura 4.b). Entre los sitios del Establecimiento San Rafael, la tendencia fue la misma, la C-MAOM disminuyó un -18 % y la C-POM -38 % con respecto al pastizal.

Por otro lado, los contenidos de COS y NOS, fueron similares entre las zonas de pastizal natural relevadas por Mazzilli (2015) y las muestras relevadas en esta tesis en los mismos lugares, pero 9 años después. Para ninguna de las dos fracciones, tanto MAOM como POM a distintas profundidades se encontraron diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ). En función de estos resultados, en esta tesis se muestran los valores promedio de C y N reportados por Mazzilli y los medidos en esta tesis (ver apéndice por contenidos promedio de C y N en los pastizales).



**Figura 3.** Contenidos de carbono, nitrógeno, relación C:N y  $\delta^{13}\text{C}$  en la fracción de la materia orgánica del suelo asociada a los minerales (MAOM) a distintas profundidades para los tratamientos de pastizal natural (línea continua) y agricultura continua bajo siembra directa (líneas punteadas). Los gráficos de la izquierda (a;c;e;g) muestran las distintas variables para los sitios ubicados en el establecimiento San Rafael y los de la derecha (b;d;f;h) muestran el promedio para el resto de los sitios medidos en esta tesis (AG González) y se comparan con los valores medidos por Mazzilli (2015)(AG Mazzilli).

Los valores de pastizal natural (PZ) en los gráficos de la derecha corresponden al promedio de las mediciones realizadas por Mazzilli (2015) y las realizadas en esta tesis. Las diferencias significativas se expresan con \* para  $p < 0.05$  para los distintos tratamientos.



**Figura 4.** Contenidos de carbono, nitrógeno, relación C:N y  $\delta^{13}\text{C}$  en la fracción de la materia orgánica del suelo particulada (POM) a distintas profundidades para los

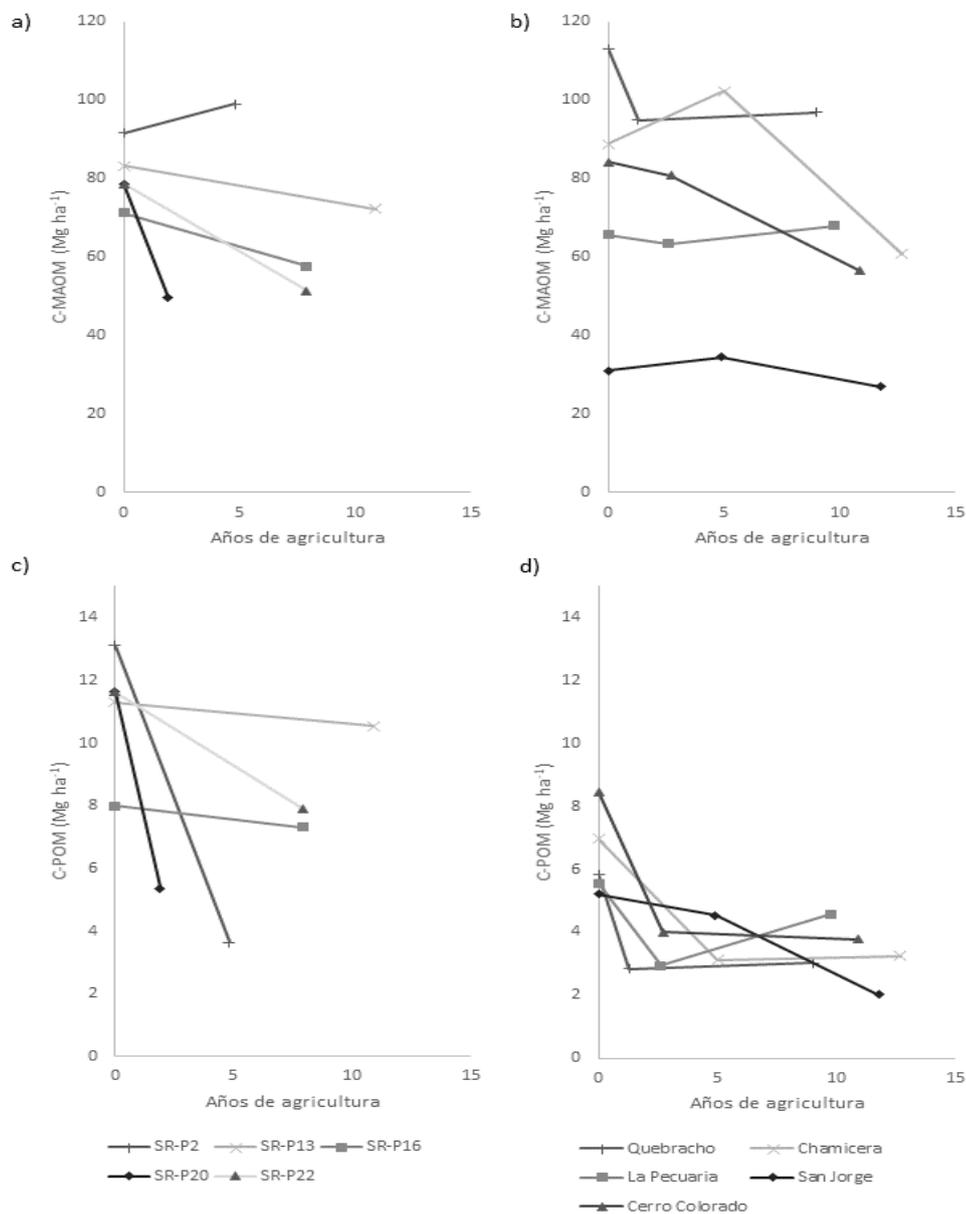
*tratamientos de pastizal natural (línea continua) y agricultura continua bajo siembra directa (líneas punteadas). Los gráficos de la izquierda (a;c;e;g) muestran las distintas variables para los sitios ubicados en el establecimiento San Rafael y los de la derecha (b;d;f;h) muestran el promedio para el resto de los sitios medidos en esta tesis (AG González) y se comparan con los valores medidos por Mazzilli (2015) (AG Mazzilli). Los valores de pastizal natural (PZ) en los gráficos de la derecha corresponden al promedio de las mediciones realizadas por Mazzilli (2015) y las realizadas en esta tesis. Las diferencias significativas se expresan con \* para  $p < 0.05$  para los distintos tratamientos.*

Las pérdidas de NOS provocadas por la agricultura fueron menores que las pérdidas de COS, lo cual llevó a disminuciones en la relación C:N en los lotes agrícolas (Figura 3 y 4). Las pérdidas de N-MAOM fueron importantes en las mediciones de esta tesis (-16%) pero fueron menores en las mediciones realizadas por Mazzilli (-4%) nueve años antes. Las disminuciones del N-MAOM fueron importantes en los sitios de San Rafael y se observaron en todo el perfil del suelo estudiado (-14%). En la fracción POM, los sitios de Mazzilli (2015) muestreados para este trabajo mostraron una disminución significativa con respecto a la situación de pastizal natural (-46% de N-POM) como también los muestreados en esta tesis nueve años después (-44%) (Figura 4.d). En los lotes de San Rafael, si bien se observó una pérdida de N-POM significativa en las profundidades 10-20 cm y 20-30 cm, el porcentaje de pérdida fue menor (-24% con respecto a la situación de pastizal natural) (Figura 4.c).

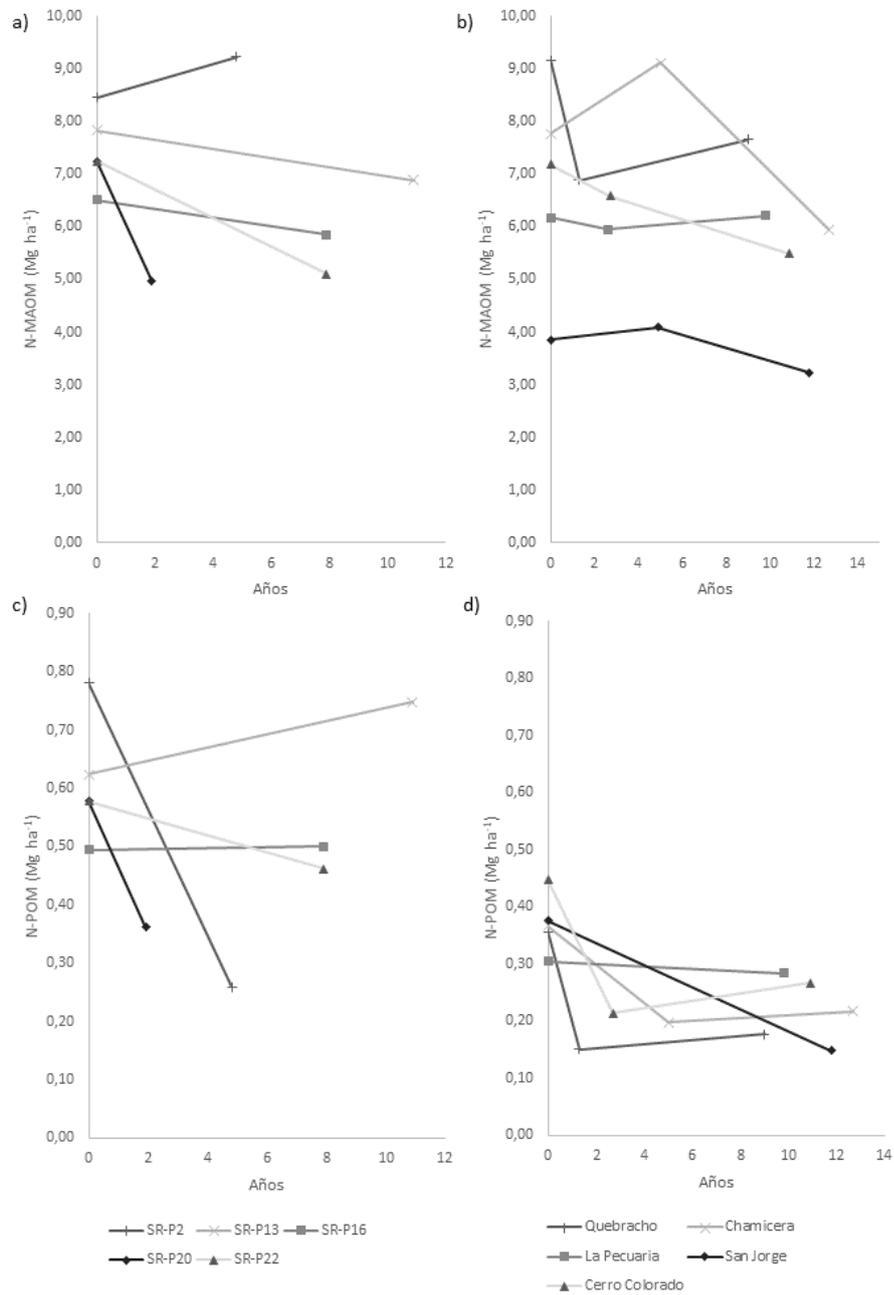
Todos los sitios mostraron disminuciones en los valores de  $\delta^{13}\text{C}$  para las fracciones MAOM y POM, pero estas fueron estadísticamente significativas solo en algunas profundidades y principalmente en la POM. Esto sugiere una entrada de C proveniente de cultivos  $\text{C}_3$  que con los años de agricultura se volvió más marcada, a pesar de que en algunos sitios existieron algunos cultivos  $\text{C}_4$  (como maíz o sorgo, ver Cuadro 2). Como era esperable, las disminuciones en el  $\delta^{13}\text{C}$  fueron más pronunciadas en la fracción POM. Los valores de la agricultura tomados por Mazzilli son intermedios entre los valores tomados para esta tesis y el pastizal, relevando una continua incorporación de residuos por parte del sistema agrícola.

### **Cambios en el COS y NOS a lo largo del tiempo**

Las pérdidas de COS y NOS fueron, en general, mayores en los sitios con más años de agricultura, aunque algunos sitios jóvenes perdieron grandes cantidades de COS y NOS (Figura 6 y 7). Los valores medidos por Mazzilli (2015) fueron, en general, intermedios entre los del pastizal natural y los de agricultura medidos en esta tesis, lo cual sugiere una tendencia de pérdida de C a largo plazo, especialmente en la MAOM. En la POM las pérdidas de COS y NOS fueron grandes en los primeros años de la agricultura, llegando luego a valores relativamente constantes, de entre 2 y 4,5 Mg ha<sup>-1</sup> (Figura 5). Para la fracción MAOM, se observaron pérdidas en casi todos los sitios, siendo más acentuadas en aquellos sitios con mayores valores iniciales de COS y NOS, como Quebracho, Chamicera y Cerro Colorado (con pérdidas de -16,2 Mg ha<sup>-1</sup>, -28 Mg ha<sup>-1</sup> y -27,8 Mg ha<sup>-1</sup> con respecto a la situación inicial, respectivamente). Aquellos sitios que mostraron valores iniciales bajos de C-MAOM, entre los que se encontraban La Pecuaria y San Jorge, presentaron valores de pérdidas menores, incluso llegando a ganar carbono con el paso de los años (+2,4 Mg ha<sup>-1</sup> de C y -4 Mg ha<sup>-1</sup> de C de diferencia con la situación inicial, respectivamente). En los lotes de San Rafael, que tienen la particularidad de presentar valores iniciales similares entre sí al comienzo de la agricultura (91 Mg ha<sup>-1</sup> a 71 Mg ha<sup>-1</sup> de C), todos perdieron C-POM y C-MAOM a lo largo de los años, a excepción del lote P2 que aumentó sus contenidos de C-MAOM en un intervalo de 4,8 años (+7,4 Mg ha<sup>-1</sup> de C).

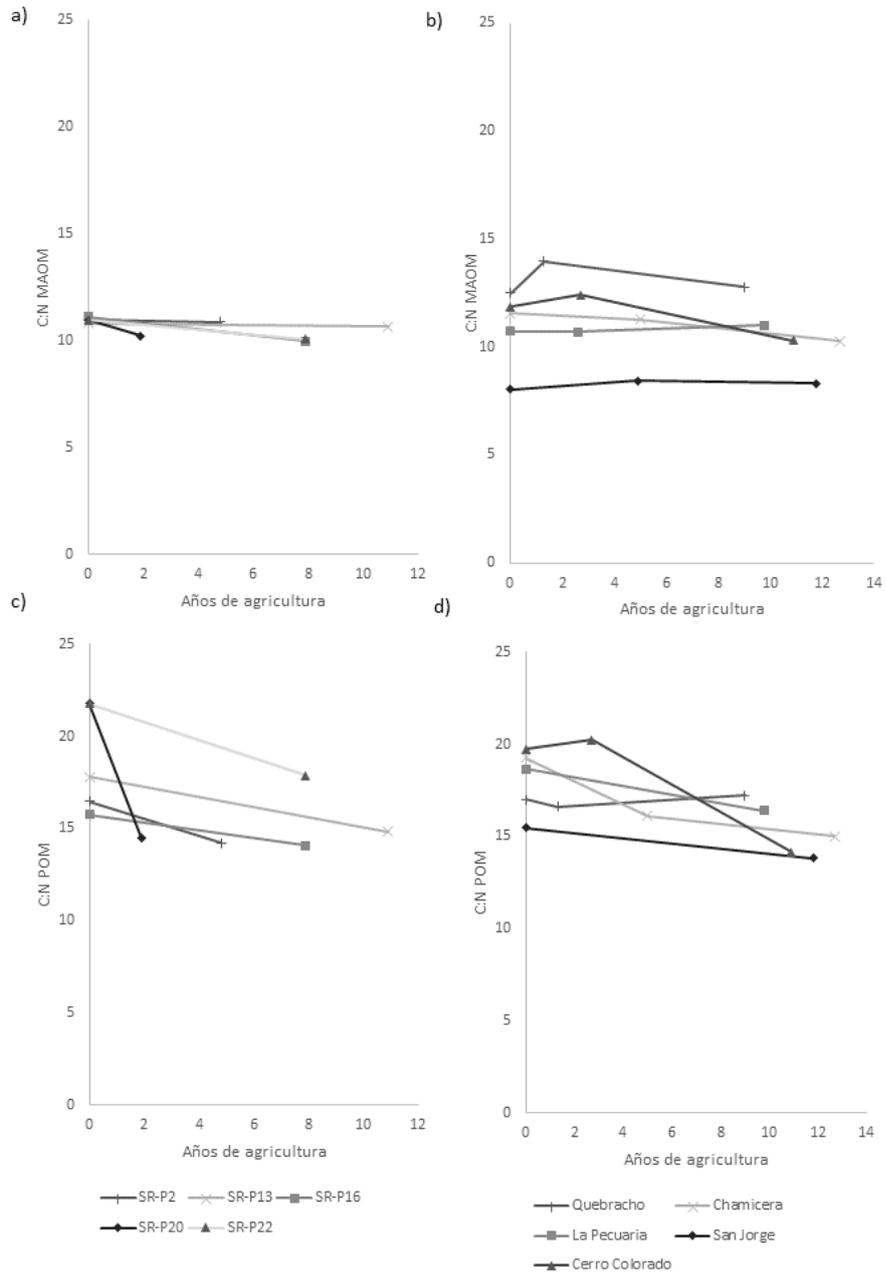


**Figura 5.** Relación entre años de agricultura y contenidos de COS (Mg ha<sup>-1</sup>) para ambas fracciones (POM y MAOM) para cada sitio. Los datos corresponden a la sumatoria de C de 0-30 cm. Los puntos que se ubican en el año cero de agricultura corresponden a los valores de pastizal, situación original al inicio de la agricultura.



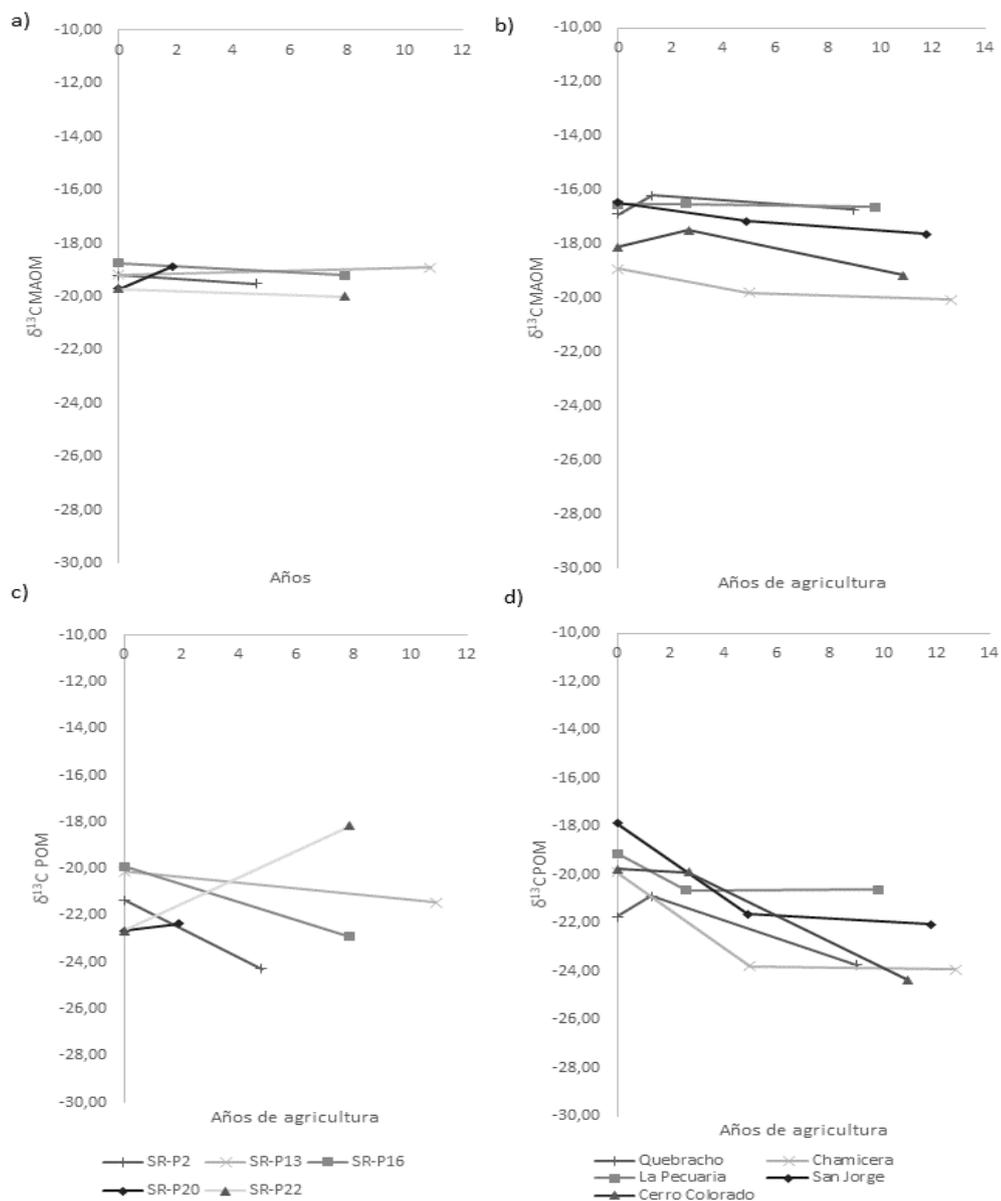
**Figura 6.** Relación entre años de agricultura y contenidos de NOS (Mg ha<sup>-1</sup>) para ambas fracciones (POM y MAOM) para cada sitio. Los datos corresponden a la sumatoria de N de 0-30 cm. Los puntos que se ubican en el año cero de agricultura corresponden a los valores de pastizal, situación original al inicio de la agricultura.

Las pérdidas de N-POM y N-MAOM tuvieron un patrón similar a las pérdidas de C en el tiempo (Figura 6), pero fueron menores en lotes con mayor tiempo de agricultura y por eso la C:N disminuyó paulatinamente con el tiempo de agricultura, sugiriendo una entrada de residuos provenientes de la agricultura con una C:N más baja que la del pastizal (Figura 7). Como era esperable, los cambios de C:N fueron más pronunciados en la POM y menores en la MAOM (Figura 7). Tanto los sitios de San Rafael, como los estudiados por Mazzilli presentaron una tendencia hacia un valor similar de C:N para la fracción POM (desde un valor promedio de C:N-POM cercano a 18 hasta valores cercanos a 15). Las disminuciones de la C:N en la MAOM fueron de menor magnitud e incluso algunos sitios mostraron aumentos leves en sus valores de C:N.



**Figura 7.** Relación entre años de agricultura y contenidos de C:N para ambas fracciones (POM y MAOM) para cada sitio. Los datos corresponden al promedio de C:N de 0-30 cm. Los puntos que se ubican en el año cero de agricultura corresponden a los valores de pastizal, situación original al inicio de la agricultura.

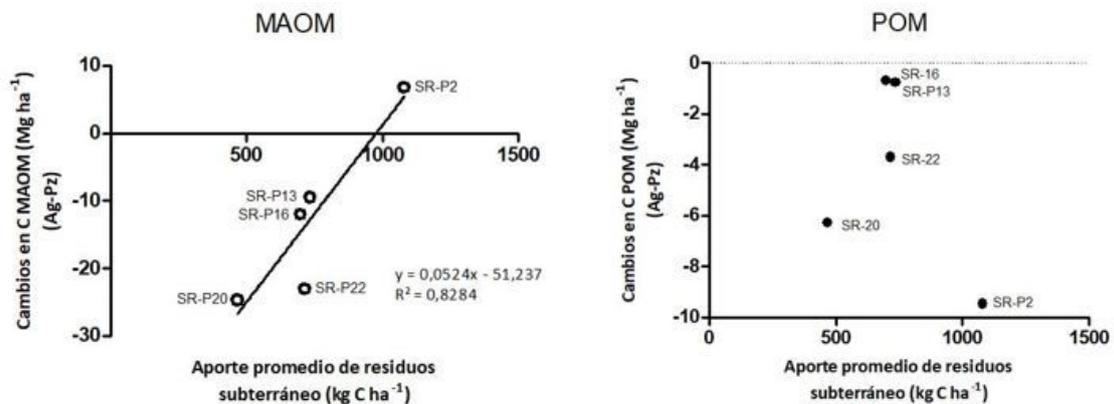
Los valores de  $\delta^{13}\text{C}$  también disminuyeron con el tiempo de agricultura en la mayoría de los sitios, lo cual refleja una entrada al suelo de residuos de agricultura con una señal isotópica correspondiente, principalmente, a cultivos  $\text{C}_3$  (Figura 8). Si bien los valores de MAOM para cada sitio presentaron una ligera tendencia hacia valores menores de  $\delta^{13}\text{C}$ , la disminución marcada se registró para la fracción POM tanto en los sitios de San Rafael como en el resto de los sitios. Por el contrario, algunos lotes presentaron aumentos en su  $\delta^{13}\text{C}$  (Sitios P13 y P20 de San Rafael), lo cual muestra una incorporación de biomasa de plantas  $\text{C}_4$ , probablemente sorgo, como se detalla en el historial de cultivos (Cuadro 2).



**Figura 8.** Relación entre años de agricultura y las diferencias isotópicas  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  para ambas fracciones (POM y MAOM) para cada sitio. Los datos corresponden al promedio de  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  de 0-30 cm. Los puntos que se ubican en el año cero de agricultura corresponden a los valores de pastizal, situación original al inicio de la agricultura.

### Factores que explican los cambios en los contenidos de C-POM y C-MAOM.

Las pérdidas de C-MAOM estuvieron asociadas con disminuciones en la cantidad de residuos subterráneos aportados al suelo por los cultivos ( $y = 0.0524x - 51.237$ ,  $R^2 = 0.83$ ,  $p < 0.05$ ), solo para los sitios de San Rafael (Figura 9). Las diferencias entre el C-MAOM del pastizal natural y la agricultura disminuyeron con el mayor ingreso de carbono por parte de las raíces de los cultivos, siendo incluso mayor el C-MAOM en aquellos lotes agrícolas con aportes de residuos subterráneos mayores a  $1000 \text{ kg C ha}^{-1}$  anuales. Por el contrario, no se observó correlación significativa entre los cambios de C-POM y el aporte anual promedio de C de residuos subterráneos ( $R^2 = 0,1808$ ). Tampoco se encontraron otras asociaciones significativas en el resto de los sitios, para ninguna de las variables evaluadas: años de agricultura, índice de intensificación, porcentaje de soja, porcentaje de trigo, porcentaje de especies  $C_3$  y  $C_4$ , porcentaje de barbecho, porcentaje de cultivo de cobertura, porcentaje de leguminosas, porcentaje de gramíneas y los aportes de carbono aéreo, subterráneo y total.



**Figura 9.** Relación entre aporte promedio de residuos subterráneos ( $\text{Kg C ha}^{-1}$ ) y los cambios de COS (AG-PZ) para la fracción MAOM (Izquierda) y la fracción POM (derecha). Cada punto representa un lote de muestreo de la estancia San Rafael.

## DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en esta tesis sugieren una pérdida de carbono orgánico y nitrógeno total del suelo (de entre un -39% y -2% de COS) ante el reemplazo de pastizales naturales perennes por cultivos anuales en siembra directa, sin la utilización de laboreo, similares a las obtenidas en experimentos con laboreo (entre 28% y 8% en los primeros 15 años, (Mazzilli, 2015; Studdert & Echeverria, 2000; Andruilo et al., 1999; Quincke et al., 2009). Estos resultados apuntan a que las pérdidas de COS y NOS reportadas tradicionalmente para la agricultura con laboreo, podrían no ser provocadas por el laboreo sino por otros cambios generados por los cultivos anuales. DuPont et al. (2010) obtuvo resultados similares, reportando una reducción en la calidad del suelo, ante el reemplazo de pastizales por cultivos agrícolas, que no es atribuible al laboreo. Podemos, entonces, apoyar la hipótesis inicial planteada en esta tesis, que sugiere que el reemplazo de pastizales por cultivos anuales produce pérdidas de COS que no son atribuibles solamente al laboreo del suelo (Balesdent et al., 2000; Fu et al., 2006). Cobran importancia las salidas de carbono de los sistemas agrícolas producto de una baja cobertura del suelo durante los períodos de barbecho (Sawchik et al., 2012) y la disminución en las entradas de carbono, tanto por extracción de biomasa para la cosecha, como por una menor producción de biomasa subterránea, las cuales poseen altas tasas de humificación (Bolinder et al., 2012; Jackson et al., 2017; Rasse et al., 2005; Pinto, 2018).

Al igual que en otros trabajos, los cambios más rápidos ocurrieron en la fracción POM, pero las mayores pérdidas de COS y NOS ocurrieron en la MAOM, debido a su mayor tamaño. Esto se debe a que la MAOM está compuesta por productos derivados de microorganismos (moléculas simples, enzimas y proteínas fáciles de descomponer) protegidas físicamente en arcillas y limo, lo que requiere una gran cantidad de energía por parte de los microorganismos para descomponerlos y, por lo tanto, los suelos, en general, almacenan la mayoría de la MOS en esta fracción (Kuzyakov et al., 2000; Cotrufo et al., 2015). Por más que en algunos de los sitios medidos por Mazzilli (2015) la C-MAOM aumentó con los años de agricultura, los resultados de esta tesis sugieren

una pérdida de C-MAOM en la mayoría de los sitios en el largo plazo. La relación C:N presente en la MAOM, así como el análisis de dilución isotópica de  $\delta^{13}\text{C}$  mostraron una tendencia de la MAOM a disminuir su C:N e incorporar C de los cultivos, que son mayormente  $\text{C}_3$ . Estas últimas tendencias fueron más rápidas en la fracción POM, que varió su C:N con una magnitud mayor, al igual que lo reportado por Ecclesia et al., (2015).

Al igual que en otros trabajos recientes, la producción de raíces parece ser uno de los factores más importantes en explicar las pérdidas o aumentos de COS y NOS (Rasse et al., 2005; Mazzilli et al., 2015, Crew & Rumsey, 2017; Pinto, 2018). El reemplazo de pastizales con especies perennes por cultivos anuales resulta en una disminución de la asignación de la productividad subterránea de entre 13% a 30% (Crew & Rumsey, 2017). Esta disminución en la producción de raíces parece explicar una parte importante de las variaciones en COS, sugiriendo que las rotaciones agrícolas que logren producir grandes cantidades de raíces podrían mantener los niveles de COS y NOS similares a los del pastizal natural (Figura 9). La mayor humificación de las raíces puede deberse a su rizodeposición, al contacto íntimo de las raíces con el suelo o a la calidad de las mismas (Rasse et al., 2005) como también dependerá de los sitios de retención disponibles de las arcillas y limos (Six et al., 2002; Stewart et al., 2009). Contrariamente a lo esperado, la variación en la cantidad de residuos totales, tanto aéreos como subterráneos, no explicó la variación en C-POM. Futuros trabajos que exploren la importancia de la producción de raíces en la formación de C-POM y C-MAOM podrán establecer la importancia relativa de los procesos mencionados anteriormente en la estabilización del carbono de las distintas fracciones.

La inclusión de pasturas cortas y verdeo anuales destinados a la alimentación del ganado en las rotaciones agrícolas parece ser un elemento clave para aumentar la producción de raíces y la formación de COS y NOS. La producción de raíces, pero también el aporte de residuos aéreos en general es mayor en pasturas y verdeos que en cultivos de granos, así como el retorno de nutrientes al suelo (McNaughton et al., 1998; Conant et al., 2003; Piñeiro et al., 2006; Piñeiro et al., 2009). Algunos de los lotes agrícolas evaluados en esta tesis presentaron pasturas cortas y verdeos, y fueron estos

los que mejor conservaron los contenidos de COS y NOS. Diversos trabajos en la región muestran como la inclusión de pasturas largas (4 años) en las rotaciones mantiene los contenidos de MOS (Diaz Rosello, 1992; Moron et al., 1994; Moron & Sawchik, 2004; Quincke et al., 2009). Los resultados de esta tesis sugieren que pasturas cortas (de 6 meses) y verdes anuales lograrían objetivos similares.

La siembra directa tiene múltiples beneficios productivos y ambientales, pero los resultados de esta tesis sugieren que la siembra directa es condición necesaria pero no suficiente para incrementar los contenidos de COS y NOS en sistemas agrícolas. Numerosos trabajos estudiaron las diferencias en la MOS causadas por la práctica del laboreo y la siembra directa y las implicancias de la siembra directa como mecanismo para aumentar el carbono orgánico del suelo (Angers et al., 1997; Blanco-Canqui et al., 2008; West & Post, 2002; Angers & Eriksen-Hamel, 2008). Varias revisiones internacionales han sugerido que la siembra directa solo logra aumentar los contenidos de MOS en algunas situaciones particulares y que, por el contrario, su efecto principal es cambiar la distribución vertical del carbono en el perfil del suelo (Jobbagy & Jackson, 2000; West & Post, 2002; Dominguez et al., 2009). Esta tesis apoya estos trabajos y sugieren que el aporte de residuos (las entradas de C al suelo) y principalmente las raíces, serían los factores determinantes para aumentar la materia orgánica del suelo en cultivos agrícolas en siembra directa.

## **CONCLUSIÓN**

Los resultados obtenidos en los sitios utilizados por Mazzilli (2015) y los lotes del establecimiento San Rafael en sistemas agrícolas basados en la siembra directa, sugieren que, por más que se excluya el efecto del laboreo, existen otros procesos que provocan una disminución del COS y NOS, con un valor promedio del 20%, similares a las reportadas en investigaciones de sistemas agrícolas bajo laboreo en la región. La POM y la MAOM mostraron pérdidas similares a lo largo de los años, siendo los cambios más rápidos en la fracción POM mientras que la MAOM perdió mayor cantidad de MOS. El aporte de residuos subterráneos fue la única variable que explicó la variación del COS en la fracción MAOM. Estos resultados sugieren que, para aumentar o mantener los contenidos de MOS sería necesario realizar otros manejos, además de la siembra directa, tendientes a aumentar la cantidad de residuos de los cultivos, principalmente vía raíces.

## BIBLIOGRAFÍA

- Andriulo, A., Guerif, J., & Mary, B. 1999. **Evolution of soil carbon with various cropping sequences on the rolling pampas. Determination of carbon origin using variations in natural <sup>13</sup>C abundances.** *Agronomie* 19: 349-364.
- Alvarez, R. 2001. **Estimation of carbon losses by cultivation from soils of the Argentine Pampa using the Century model.** *Soil Use and Management*. 17: 62-66.
- Alvarez, R., Alvarez, C.R. & Lorenzo, G., 2001. **Carbon dioxide fluxes following tillage from a mollisol in the Argentine Rolling Pampa.** *European Journal of Soil Biology*, 37(3), pp.161–166
- Angers, D. A., Bolinder, M. A., Carter, M. R., Gregorich, E. G., Drury, C. F., Liang, B. C., Voroney, R.P., Simard, R.R., Donald, R.G., Beyaert, R.P. & Martel, J. 1997. **Impact of tillage practices on organic carbon and nitrogen storage in cool, humid soils of eastern Canada.** *Soil and Tillage Research*, 41(3-4):191-201.
- Angers, D.A. & Eriksen-Hamel N.S. 2008. **Full-inversion tillage and organic carbon distribution in soil profiles: A Meta-Analysis.** *Soil Science Society of America Journal*, 72: 1370-1374.
- Baldi, G., & Paruelo, J. M. 2008. **Land-use and land cover dynamics in South American temperate grasslands.** *Ecology and Society*, 13(2).
- Balesdent, J., Chenu, C., Balabane, M., 2000. **Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage.** *Soil and Tillage Research* 53, 215–230.
- Blanco-Canqui, H. & Lal, R., 2004. **Mechanisms of carbon sequestration in soil aggregates.** *Critical Reviews in Plant Sciences*. 23 (6):481-504.
- Blanco-Canqui, H., & R. Lal, R. 2008. **No-Tillage and soil-profile carbon sequestration: An on-farm assessment.** *Soil Science Society of America Journal* 72: 693-701.
- Bolinder, M.A., Angers, D.A. & Dubuc, J.P., 1997. **Estimating shoot to root ratios and**

- annual carbon inputs in soils for cereal crops.** *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 63(1), pp.61–66.
- Bolinder, M.A., H.H. Janzen, E.G. Gregorich, D.A Angers, y A.J. VandenBygaart. 2007. **An approach for estimating net primary productivity and annual carbon inputs to soil for common agricultural crops in Canada.** *Agriculture, Ecosystems & Environment* 118: 29-42.
- Bolinder, M. A., Kätterer, T., Andrén, O., & Parent, L. E. 2012. **Estimating carbon inputs to soil in forage-based crop rotations and modeling the effects on soil carbon dynamics in a Swedish long-term field experiment.** *Canadian Journal of Soil Science*, 92(6): 821-833.
- Burkart, S.E; León, R.J.C.; Perelman, S.B. & Agnusdei, M. 1998. **The grasslands of the flooding Pampa (Argentina): floristic heterogeneity of natural communities of the southern rio Salado basin** *Coenoses* 13: 17-27.
- Cambardella, C. A., and E. T. Elliott. 1992. **Particulate Soil Organic-Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence.** *Soil Science Society of America. J.* 56:777-783.
- Caride, C., Pineiro, G., & Paruelo, J. M. 2012. **How does agricultural management modify ecosystem services in the argentine Pampas? The effects on soil C dynamics.** *Agriculture, ecosystems & environment*, 154: 23-33.
- Christensen, B.T., 2001. **Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover.** *European Journal of Soil Science*, 52, pp.345–353.
- Conant, R. T., Six, J., & Paustian, K. 2003. **Land use effects on soil carbon fractions in the southeastern United States. Management-intensive versus extensive grazing.** *Biology and Fertility of Soils*, 38(6):386-392.
- Cotrufo, M. F., Soong, J. L., Horton, A. J., Campbell, E. E., Haddix, M. L., Wall, D. H., & Parton, W. J. 2015. **Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss.** *Nature Geoscience*, 8(10), ngeo2520.
- Crews, T. & Rumsey, B. 2017. **What Agriculture Can Learn from Native Ecosystems in Building Soil Organic Matter: A Review.** *Sustainability*, 9:578–596.

- Davidson, E.A. & Ackerman, I. L. 1993. **Changes in soil carbon inventories following cultivation of previously untilled soils.** *Biochemistry.* 20 (3) 161–193.
- Díaz Rosselló, R.M. 1992. **Evolución de la materia orgánica en rotaciones de cultivos con pastures.** In: Morón, A. & Baethgen, W. (eds). Simposio: **Sustentabilidad de las rotaciones cultivo-pasturas en el Cono Sur.** *Revista INIA de Investigaciones Agronómicas* 1:103-110.
- Domínguez, G. F., Diovisalvi, N. V., Studdert, G. A., & Monterubbianesi, M. G. (2009). **Soil organic C and N fractions under continuous cropping with contrasting tillage systems on mollisols of the southeastern Pampas.** *Soil and Tillage Research*, 102(1), 93-100.
- DuPont ST, Culman SW, Ferris H, Buckley DH, Glover JD. 2010. **No-tillage conversion of harvested perennial grassland to annual cropland reduces root biomass, decreases active carbon stocks, and impacts soil biota.** *Agriculture Ecosystem Environment.* 137:25- 32.
- DuPont, S. T., J. Beniston, J. D. Glover, A. Hodson, S. W. Culman, R. Lal & H. Ferris. 2014. **Root traits and soil properties in harvested perennial grassland, annual wheat, and never-tilled annual wheat.** *Plant and Soil.*
- Eclesia, R.P., Jobbagy, E.G., Jackson, E.G., Biganzoli, F. & Piñeiro, G. 2012. **Shifts in soil organic carbon for plantation and pasture establishment in native forests and grassland in South America.** *Global Change Biology.* 18, 3237-3251.
- Eclesia, R.P., Jobbagy, E.G., Jackson, R.B, Rizzotto, M., & Piñeiro, G. 2015. **Stabilization of new carbon inputs rather than old carbon decomposition determines soil organic carbon shifts following woody or herbaceous vegetation transitions.** *Plant and Soil.* 409(1-2): 99-116.
- Faostat, 2014 FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) [www Document].
- Fontaine, S., Mariotti, A. & Abbadie, L. 2003. **The priming effect of organic matter: a question of microbial competition?** *Soil Biol. Biochem.* 35, 837–843.

- Fu, G., Chena, S., McCool, D.K., 2006. **Modeling the impacts of no-till practice on soil erosion and sediment yield with RUSLE, SEDD, and ArcView GIS.** *Soil and Tillage Research*.
- Guo, L. B. y Gifford, R. M. 2002. **Soil carbon stocks and land use change: a meta-analysis.** *Global Change Biology*. 8 (4), 345-360.
- Mazzilli, S.R; Piñeiro, G; Kemanian, A.R. 2012. **Priming effects on soil organic carbon decomposition induced by high C:N crop inputs.** *Agrociencia Special Issue – ISTRO 2012*: 191-193.
- Mazzilli, S.R. Kemanian, A.R., Ernst, O.R., Jackson R.B. & Piñeiro, G. 2015. **Greater humification of belowground than aboveground biomass carbon into particulate soil organic matter in no-till corn and soybean crops.** *Soil Biology and Biochemistry*. 85, 22-3
- Mazzilli, Sebastián. 2015. **Dinámica del carbono en sistemas agrícolas bajo siembra directa: nuevas evidencias obtenidas mediante el uso de <sup>13</sup>C sobre la importancia de las raíces, la calidad de los residuos y el laboreo.** Tesis doctoral. Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía.
- McNaughton, S. J., Banyikwa, F. F., & McNaughton, M. M. 1998. **Root biomass and productivity in a grazing ecosystem: the Serengeti.** *Ecology*, 79(2), 587-592.
- Morón, A., Baethgen, W. E., & Díaz Rossello, R. (1994). **Materia orgánica en la rotación cultivo-pastura.** *Técnica*, (41).
- Morón, A., & Sawchik, J. 2003. **Soil quality indicators in a long-term crop-pasture rotation experiment in Uruguay.** *Agrícolas-ganaderas*.
- Jackson, R.B., Lajtha, K., Crow, S. E., Hugelius, G., Kramer, M. G., Piñeiro, G., 2017. **The Ecology of Soil Carbon: Pools, Vulnerabilities, and Biotic and Abiotic Controls.** *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics*, 48: 419–445.
- Jobbágy EG y RB Jackson. 2000. **The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation.** *Ecological Applications*, 10(2):423–436.

- Kuzyakov, Y., Friedel, J.K. & Stahr, K., 2000. **Review of mechanisms and quantification of priming effects.** *Soil Biology and Biochemistry*, 32: 1485–1498.
- O'Leary, M. H. 1981. **Carbon isotope fractionation in plants.** *Phytochemistry*, 20(4), 553-567.
- Panigatti, J., 2010. **Argentina 200 años, 200 suelos.** Ilustraciones y cuadros, Buenos Aires.
- Paruelo J.M., Jobbagy, E.G, Oesterheld M., Golluscio R.A. & Aguiar M.R. 2007. **The grasslands and steppes of Patagonia and the Rio de la Plata plains.** *Oxford University Press: Oxford, England.*
- Paustian, K., Andrén, O., Janzen, H. H., Lal, R., Smith, P., Tian, G., Tiessen, H., Van Noordwijk, M. & Woomer, P. L. 1997. **Agricultural soils as a sink to mitigate CO<sup>2</sup> emissions.** *Soil use and management*, 13, 230-244.
- Pinto, P., Fernandez Long, M. E. & Piñeiro, G. 2017. **Including cover crops during fallow periods for increasing ecosystem services: Is it possible in croplands of Southern South America?** *Agriculture, Ecosystems and Environment* 248 : 48–57.
- Pinto, P. (2018). **Evaluación de la fijación biológica de nitrógeno y la producción de raíces en distintos cultivos de servicios y sus efectos sobre las reservas de C y N orgánico del suelo.** Escuela para graduados “Alberto Soriano” Universidad de Buenos Aires.
- Piñeiro, G., Paruelo, J.M., Oesterheld, M. & Jobbágy, E.G. 2009. **Pathways of Grazing Effects on Soil Organic Carbon and Nitrogen.** *Rangeland Ecology and Management* 63:109–119.
- Piñeiro, G., Paruelo, J. M. & Oesterheld, M. 2006. **Long-term impacts of livestock introduction on carbon and nitrogen cycling in grasslands of Southern South American.** *Global Change Biology* 12: 1267-1284.
- Quincke, A., Morón, A., Sawchik, J., García, A. & Díaz, R. 2009. **Dinámica del C orgánico en sistemas agrícolas de Uruguay.** *Serie de actividades de difusión INIA* 587: 1-6.

- Rasse, D.P., Rumpel, C. & Dignac, M.F. 2005. **Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilization.** *Plant and Soil*, 269: 341–356.
- Sawchik, J., Pérez-bidegain, M. & García, C. 2012. **Impact of Winter Cover Crops on Soil Properties Under Soybean Cropping Systems.** *Agrociencia Uruguay*, 16: 288–293.
- Six, J., Conant, R. T., Paul, E. A. & Paustian, K. 2002. **Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils.** *Plant and Soil*, 241: 155–176.
- Solomon, D., Fritzsche, F., Lehmann, J., Tekalign, M. & Zech, W. 2002. **Soil Organic Matter Dynamics in the Subhumid Agroecosystems of the Ethiopian Highlands: Evidence from natural <sup>13</sup>C abundance and particle-size fractionation.** *Soil Science Soc. Am. J.* 66:969–978
- Soriano, A. 1991. **Río de la Plata Grasslands.** In: R. T. Coupland [ED.]. **Natural grasslands: introduction and Western Hemisphere.** Amsterdam, the Netherlands. *Elsevier*. 367–407.
- Stewart, C.E., Paustian, K., Conant, R. T., Plante, A. F. & Six, J., 2009. **Soil carbon saturation: Implications for measurable carbon pool dynamics in long-term incubations.** *Soil Biology and Biochemistry*, 41: 357–366.
- Studdert, G.A., & Echeverría, H.E. 2000. **Crop rotations and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics.** *Soil Science Society of America Journal* 64: 1496-1503.
- Tan Z., Lal R., Owens L. & Izaurralde, R.C. 2007. **Distribution of light and heavy fractions of soil organic carbon as related to land use and tillage practice.** *Soil & Tillage Research*. 92: 53–59
- Unkovich, M., Baldock, J. & Forbes, M. 2010. **Variability in Harvest Index of Grain Crops and Potential Significance for Carbon Accounting: Examples from Australian Agriculture.** *Advances in Agronomy*. 105: 173-219
- Vega, E., Baldi, G., Jobbagy, E.G. & Paruelo, J.M. 2009. **Land use change patterns in the Río de la Plata grasslands: The influence of phytogeographic and political boundaries.** *Agriculture, Ecosystems and Environment* 134: 287–292.

West, T. & Post, W.M. 2002. **Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: a global data analysis.** *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 1930–1946.

## APÉNDICE

**Cuadro A1.** Valores promedio de COS, NOS, C:N y D13C para cada fracción y para cada profundidad entre los sitios de agricultura (AG) y pastizal (PZ) para los lotes de la estancia San Rafael y entre el pastizal (PZ), agricultura tomado por Mazzilli (2015) (AG Mazzilli) y agricultura de esos mismos sitios tomados para esta investigación (AG Gonzalez). Las diferencias significativas se muestran con letras distintas para cada tratamiento de una misma profundidad.

Variable	Profundidad	Sitios en el establecimiento San Rafael		Sitios en otros establecimientos			
		PZ	AG	PZ	AG Mazzilli	AG Gonzalez	
COS MAOM (mg cm <sup>-1</sup> )	0-5	30,86	a 27,69	a 36,61	a 32,84	a 24,70	b
	5-10	29,31	a 25,49	a 31,67	a 28,16	a 21,36	b
	10-20	25,83	a 21,25	a 27,65	a 25,80	a 20,33	a
	20-30	24,77	a 18,08	a 23,41	a 18,85	a 18,45	a
COS POM (mg cm <sup>-1</sup> )	0-5	12,34	a 8,05	a 6,72	a 3,78	b 2,98	b
	5-10	3,61	a 1,86	b 2,19	a 1,44	b 1,10	b
	10-20	1,77	a 1,08	b 1,17	a 0,53	b 0,68	b
	20-30	1,38	a 0,93	b 0,85	a 0,38	b 0,61	b
Nt MAOM (mg cm <sup>-1</sup> )	0-5	3,03	a 2,86	a 3,180	a 3,040	a 2,380	b
	5-10	2,83	a 2,56	a 2,600	a 2,600	a 2,020	b
	10-20	2,46	a 2,06	a 2,120	a 2,200	a 1,860	a
	20-30	2,06	a 1,64	a 1,810	a 1,540	a 1,640	a
Nt POM (mg cm <sup>-1</sup> )	0-5	0,69	a 0,54	a 0,400	a 0,240	ab 0,200	b
	5-10	0,19	a 0,14	a 0,120	a 0,100	a 0,080	a
	10-20	0,10	a 0,07	b 0,070	a 0,030	b 0,050	b
	20-30	0,07	a 0,06	b 0,080	a 0,020	b 0,040	a
Relación C:N MAOM	0-5	10,19	a 9,63	b 10,42	a 10,67	a 10,18	a
	5-10	10,34	a 9,91	b 10,83	a 10,85	a 10,31	a
	10-20	10,48	a 10,25	a 11,56	a 11,44	a 10,47	a
	20-30	12,02	a 10,95	a 11,93	a 11,92	a 10,80	a
Relación C:N POM	0-5	17,99	a 15,02	b 17,26	a 16,36	a 15,46	a
	5-10	18,86	a 13,53	b 18,10	a 15,70	ab 14,73	b
	10-20	17,74	a 15,40	b 17,43	a 16,42	a 15,45	a
	20-30	19,54	a 15,63	b 19,36	a 19,32	a 15,64	a
δ13 MAOM	0-5	-20,37	a -20,72	a -18,75	a -18,89	a -20,26	b
	5-10	-19,24	a -20,01	a -17,85	a -17,85	a -18,61	a
	10-20	-18,64	a -19,17	a -17,02	a -17,15	a -17,81	a
	20-30	-17,98	a -18,17	a -16,71	a -16,73	a -17,13	a
δ13 POM	0-5	-21,74	a -23,05	a -20,67	a -21,81	a -24,88	b
	5-10	-21,15	a -22,01	a -19,95	a -21,38	ab -23,30	b
	10-20	-21,32	a -21,89	a -19,60	a -21,13	ab -22,72	b
	20-30	-21,15	a -21,28	a -19,22	a -2,15	a -22,16	a

**Cuadro A2.** Valores totales promedios de carbono y nitrógeno ( $Mg\ ha^{-1}$ ) para cada fracción y profundidad. entre los sitios de agricultura (AG) y pastizal (PZ) para los lotes de la estancia San Rafael y entre el pastizal (PZ), agricultura tomado por Mazzilli (2015) (AG Mazzilli) y agricultura de esos mismos sitios tomados para esta investigación (AG Gonzalez). Las diferencias significativas se muestran con letras distintas para cada tratamiento de una misma profundidad.

Variable	Profundidad	Sitios en el establecimiento San Rafael				Sitios en otros establecimientos					
		PZ		AG		PZ		AG Mazzilli		AG Gonzalez	
COS MAOM ( $Mg\ ha^{-1}$ )	0-5	15,43	a	13,84	a	18,30	a	16,42	a	12,35	b
	5-10	14,65	a	12,75	a	15,84	a	14,08	a	10,68	b
	10-20	25,83	a	21,25	a	27,65	a	25,80	a	20,33	a
	20-30	24,77	a	18,08	a	23,41	a	18,85	a	18,45	a
COS POM ( $Mg\ ha^{-1}$ )	0-5	6,17	a	4,02	a	3,36	a	1,89	b	1,49	b
	5-10	1,81	a	0,93	b	1,10	a	0,72	b	0,55	b
	10-20	1,77	a	1,08	b	1,17	a	0,53	b	0,68	b
	20-30	1,38	a	0,93	b	0,85	a	0,38	b	0,61	b
NOS MAOM ( $Mg\ ha^{-1}$ )	0-5	1,51	a	1,43	a	1,590	a	1,520	a	1,190	b
	5-10	1,42	a	1,28	a	1,300	a	1,300	a	1,010	b
	10-20	2,46	a	2,06	a	2,120	a	2,200	a	1,860	a
	20-30	2,06	a	1,64	a	1,810	a	1,540	a	1,640	a
NOS POM ( $Mg\ ha^{-1}$ )	0-5	0,34	a	0,27	a	0,200	a	0,120	a b	0,100	b
	5-10	0,10	a	0,07	a	0,060	a	0,050	a	0,040	a
	10-20	0,10	a	0,07	b	0,070	a	0,030	b	0,050	b
	20-30	0,07	a	0,06	b	0,080	a	0,020	b	0,040	a

**Cuadro A3.** Valores totales para cada sitio en la profundidad 0-30 cm para cada tratamiento: Pastizal (PZ), Agricultura tomado de los datos de Mazzilli (2015) (AG Mazzilli) y agricultura para esta tesis (AG Gonzalez).

Sitios	COS (Mg ha <sup>-1</sup> )			NOS (Mg ha <sup>-1</sup> )		
	PZ	AG Mazzilli	AG Gonzalez	PZ	AG Mazzilli	AG Gonzalez
Quebracho	118,9	97,7	99,8	9,5	7,0	7,8
Chamicera	95,8	105,4	64,1	8,1	9,3	7,8
La Pecuaria	71,2	66,3	72,5	6,5	6,3	6,5
San Jorge	36,3	39,1	29,1	4,2	4,1	3,4
Cerro Colorado	92,7	84,7	60,2	7,6	6,8	5,8
P2	104,7	-	102,6	9,2	-	9,5
P13	94,6	-	82,8	8,5	-	7,6
San Rafael	79,3	-	64,9	7,0	-	6,4
P20	90,3	-	54,9	7,8	-	5,3
P22	90,3	-	59,2	7,8	-	5,6