



Trabajo final de carrera para acceder al grado de
Licenciado en Ciencias del Ambiente

**VARIACIÓN EN EL CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO EN DISTINTOS SISTEMAS
PRODUCTIVOS: CONSECUENCIAS AMBIENTALES Y PRODUCTIVAS PARA EL SO
BONAERENSE**

Alumno: Digüero, Nicolás.

Contacto: nicodcai10@gmail.com

Director: Lic. Luna, Martín Alejandro.

Contacto: mluna@unrn.edu.ar

Sede Atlántica - Universidad Nacional de Río Negro

AÑO 2022

RESUMEN

El incremento exponencial de la población mundial de los últimos años trae como consecuencia mayor demanda de alimentos, fibras y combustibles. Para abastecer tal demanda, es necesario intensificar los sistemas productivos y/o incrementar la superficie cultivada, avanzando sobre zonas de menor aptitud productiva y menos resilientes a los impactos erosivos. En general, la transformación de los ecosistemas naturales en agroecosistemas está asociada a una descarbonización de los suelos. Los usos y manejos intensivos hacen variar el carbono orgánico del suelo (COS) y su liberación en forma de dióxido de carbono (CO₂) hacia la atmósfera, lo que contribuye a un aumento progresivo en los gases de efecto invernadero (GEI). El objetivo de este estudio fue analizar cambios generados por cuatro usos y manejos productivos diferentes sobre las ganancias y/o pérdidas del COS al sudoeste (SO) de la provincia de Buenos Aires, y evaluar su impacto en el ambiente y en los sistemas productivos. Para ello se compararon cuatro modelos productivos, todos con pastoreo rotativo, representativos de la región: 1) pastizal natural (Pastizal N.+PR), 2) Monte arbustivo-graminoso (Monte+PR), 3) agropiro alargado (*Thinopyrum ponticum*) (Agrop.+PR), y 4) rastrojos de cereales de invierno (Agric.+PR). En cada sistema se tomaron muestras de suelo a: 0-10, 10-20 y 0-20 cm de profundidad. Se determinó en cada muestra: composición granulométrica (arena "A", limo "L" y arcilla "a"), densidad aparente (DA), carbono orgánico total (COT) y formas oxidables de CO (CO lábil y CO humificado). Se encontró una relación directa entre la fracción L+a y el contenido de COT. En suelos con usos y manejos de menor intervención (Pastizal N.+PR y Monte+PR) se halló mayor concentración y cantidad de COT, CO lábil y CO humificado. Considerando el Pastizal N.+PR situación de referencia, se encontró 16,2% menos cantidad de CO lábil en los suelos con Monte+PR y 35,3% en aquellos con Agrop.+PR y Agric.+PR. Respecto a la cantidad de CO humificado, los suelos con Agric.+PR presentaron la mayor diferencia (32,0% menos CO), seguido por el Agrop.+PR (20,8%), mientras que por el contrario en suelos con Monte+PR se encontró 6,5% más que en la situación de referencia. Estos resultados apoyan la necesidad de planificar alternativas de uso y manejo conservacionistas y sustentables que permitan mejorar la capacidad de retención y acumulación de COS y, de esta manera, evitar agravar futuros procesos erosivos.

AGRADECIMIENTOS

En principio, y de manera muy especial quiero agradecer a mi familia, tanto a mi madre Milagros como a mi padre Sergio, que de forma muy sacrificada me acompañaron en este camino transcurrido, inculcándome el valor del sacrificio, la voluntad y empatía necesaria para cumplir con cualquier objetivo que me proponga.

A mi director de tesina, profesor y colega: Martín Luna, que ha sabido acompañarme en esta experiencia, materializando un sinfín de ideas y proyectos.

Al señor Guillermo González, por ayudarnos tanto a mi como a mi director de tesina para acceder a cada uno de los productores. A los mismos productores del “Grupo Monte” por brindarnos un espacio para la recolección de información del presente trabajo. Y a mis compañeros de laboratorio y salidas a campo: Héctor y Perla quienes me ayudaron con la recolección de información y la toma de muestras.

Y finalmente, a todos los profesores de la carrera Licenciatura en Ciencias del Ambiente de la Universidad Nacional de Río Negro, que con sus conocimientos participaron en mi formación profesional y personal.

ÍNDICE DEL CONTENIDO

| | |
|---|----|
| RESUMEN | 2 |
| INTRODUCCIÓN | 7 |
| OBJETIVOS | 8 |
| <i>Objetivo general</i> | 8 |
| <i>Objetivos específicos</i> | 8 |
| MARCO TEÓRICO | 8 |
| HIPÓTESIS DE TRABAJO | 12 |
| MATERIALES Y MÉTODOS | 12 |
| <i>Área de estudio</i> | 12 |
| <i>Selección de sitios y trabajo de campo</i> | 14 |
| <i>Análisis del suelo: determinaciones físicas y químicas</i> | 16 |
| Tratamiento de las muestras compuestas | 16 |
| Tratamiento de las muestras tomadas con cilindro | 17 |
| <i>Análisis estadístico de los datos</i> | 18 |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 19 |
| <i>Caracterización general de los ambientes y de los suelos del área en estudio</i> | 19 |
| <i>Variación en concentración y cantidad de COS en cada uso y manejo</i> | 21 |
| <i>Variación en la cantidad de COS en cada uso y manejo</i> | 25 |
| <i>Consecuencias ambientales y productivas en las variaciones del COS</i> | 28 |
| CONSIDERACIONES FINALES | 32 |
| BIBLIOGRAFÍA | 33 |

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Usos y manejos productivos en los establecimientos de estudio..... | 15 |
| Tabla 2. Contenido arena, limo y arcilla, densidad aparente (DA) y concentración de carbono orgánico (CO). Profundidad 0-20 cm..... | 21 |
| Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio..... | 14 |
| Figura 2. Ambientes estudiados: 1) Pastizal natural, 2) Monte arbustivo-graminoso, 3) Pasturas perennes con agropiro alargado y 4) Rastrojos de cereales de invierno..... | 16 |
| Figura 3. Trabajo de campo: 1) Caracterización del sitio y 2) Muestreo de suelos... | 17 |
| Figura 4. Probetas con suelo para cuantificar la composición granulométrica..... | 18 |
| Figura 5. Tubos de ensayo con diferentes dosis de H ₂ SO ₄ utilizados para determinar las fracciones de CO _{ox} | 19 |
| Figura 6. Relación entre el CO y la fracción fina del suelo (L+a) en cada uso y manejo..... | 22 |
| Figura 7. Fracciones de carbono orgánico (CO) oxidables (F) y total (COT). Profundidad edáfica (cm): a) 0-10, b) 10-20 y c) 0-20..... | 25 |
| Figura 8. Cantidad de CO en función de los diferentes usos y manejos. Profundidad edáfica 0-20 cm..... | 26 |
| Figura 9: Variación de ganancias-pérdidas en la cantidad de CO para cada uso y manejo: a) Por profundidad, y b) Perfil completo..... | 28 |
| Figura 10: Cantidad de CO para cada uso y manejo del suelo: a) CO lábil (F1+F2), y b) CO humificado (F3)..... | 29 |
| Figura 11: Variación de las cantidades de CO por fracción para cada uso y manejo del suelo..... | 29 |

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Densidad aparente.....18

Ecuación 2: Cálculo de cantidad de carbono.....19

INTRODUCCIÓN

El incremento exponencial de la población mundial que se viene desarrollando en los últimos años, trae como consecuencia una mayor demanda de alimentos, fibras y combustibles (Giuffré et al., 2013). Una de las alternativas para abastecer esa mayor demanda es intensificar los sistemas productivos y/o incrementar la superficie cultivada, abarcando zonas de menor aptitud productiva y menos resilientes a los impactos erosivos. La habilitación de tierras para la producción agrícola, con la posterior pérdida de productividad y el consiguiente abandono, es un fenómeno registrado a nivel global que cobra destacada importancia en las regiones áridas y semiáridas de todo el mundo (Abraham et al., 2016). Esta dinámica configura un escenario de creciente degradación de los recursos naturales, que se ve acentuado por el cambio climático global, con el aumento en la variabilidad inter e intra-anual de las precipitaciones y el incremento de los períodos de sequía (Lal, 2007). Frente a esta situación, se observa una necesidad creciente de asistir en la recuperación de las tierras secas, ya sean áridas, semiáridas o subhúmedas secas. La restauración de los atributos ecosistémicos perdidos se basa en recobrar aspectos estructurales y funcionales de los ecosistemas, para que sean nuevamente productivos (Abraham et al., 2009; Van Andel et al., 2012).

En los paisajes semiáridos al sur de la provincia de Buenos Aires, Argentina, la alteración de la biodiversidad por el uso antrópico suele estar asociada a la pérdida de cobertura del suelo y al incremento de la erosión (Pezzola & Winschel, 2004). Estos cambios de uso y manejo del suelo pueden repercutir de forma negativa sobre su funcionamiento, afectando así a la provisión de servicios ecosistémicos de productividad y sustentabilidad ambiental (Giuffré, 2008). En los últimos años, ha surgido la necesidad de encontrar indicadores tempranos de cambios en la calidad del suelo (Galantini & Suñer, 2008). En este sentido, en las últimas décadas se produjo un crecimiento exponencial en el número de experimentos que estudian el carbono orgánico del suelo (COS). Una búsqueda bibliográfica realizada en Scopus en 2020 por Tadiello et al. (2022), reveló 5586 artículos utilizando como palabra clave "carbono orgánico del suelo" y 100 artículos con "meta-análisis del carbono orgánico del suelo". La atención significativa en torno a este tema se debe principalmente a la necesidad de definir prácticas eficaces para mejorar la captura de carbono (C) en los agroecosistemas (Tadiello et al., 2022).

Con el presente trabajo se pretende estudiar el impacto que han tenido los cambios en el uso y manejo de los suelos sobre el balance del COS en ambientes semiáridos del SO de la provincia de Buenos Aires, a modo de concientizar a los productores en la ejecución de prácticas más conservacionistas. Esto contribuiría a un mejor entendimiento en el manejo de estos ecosistemas a nivel productivo y ambiental y, en el caso de ser necesario, a tomar medidas correctivas y conservacionistas a los efectos de evitar la posible degradación que una pérdida de COS podría ocasionar.

OBJETIVOS

Objetivo general

Analizar los cambios generados por cuatro usos y manejos productivos diferentes sobre las ganancias y/o pérdidas de COS del sudoeste (SO) de la provincia de Buenos Aires, y evaluar su impacto en el ambiente y en los sistemas productivos.

Objetivos específicos

- Descripción y caracterización de los cuatro sistemas de uso y manejo evaluados en el estudio, mediante visitas a campo.
- Evaluar el efecto de los distintos sistemas de uso y manejo agropecuario en la composición granulométrica, la densidad aparente, el CO total y las formas oxidables de CO.
- Evaluar posibles consecuencias ambientales y productivas de los cambios detectados en el suelo.

MARCO TEÓRICO

Entre los principales intereses mundiales, hoy se tiene mayor conciencia del resguardo y la recuperación de nuestros principales recursos naturales, entre los cuales es fundamental el sistema edáfico (Cotler et al., 2007). Puede considerarse que esto ha ocurrido a causa de que el hombre ha considerado a la cultura y la naturaleza por separado, y es sumamente importante que a nivel cultural se conduzca a las personas hacia formas más amigables de manejo de los suelos, de sus componentes y la vida que habita en él. Justamente, el mayor peligro de la degradación de los suelos reside en la manera en que el “hombre moderno” se

relaciona con el planeta tierra, siendo así como surgen los diversos cambios que ocurren en el ambiente (Tate & Theng, 2014).

Entre los cambios globales más importantes se encuentra el aumento en la concentración de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) (IPCC, 2019). El C forma parte de los mismos, manifestándose en diversas formas moleculares como el CO₂ y el metano (CH₄). Con la modificación en las concentraciones normales del C atmosférico, se alteran los equilibrios presentes en el flujo de materia y energía del ecosistema, lo que contribuye al cambio climático (Benavides Ballesteros & León Aristizábal, 2007; IPCC, 2021). El cambio climático es un problema ambiental al que debe hacer frente la sociedad mundial; sin embargo, hay alternativas para mitigar dicho fenómeno y en ese contexto, el suelo puede jugar un papel importante (Burbano Orjuela, 2018), dado que contiene más del doble de C que la atmósfera (Cueva-Rodríguez et al., 2012).

El suelo es el reservorio terrestre de C más importante, pero se ve muy afectado por el cambio de uso de la tierra. Los análisis previos de los impactos en el C del suelo se han centrado en variables biofísicas, dejando de lado la influencia de la socioeconomía (Duarte-Guardia et al., 2020). Sin embargo, los reservorios de COS no se encuentran bien representados en las estrategias de mitigación del cambio climático debido a que la base de datos de ecosistemas donde los impactos humanos son mínimos aún es fragmentaria (Duarte-Guardia et al., 2019). El COS se ha identificado previamente como una herramienta de predicción potencialmente poderosa, pudiendo ayudar a priorizar sitios en la planificación de la conservación (Peri et al., 2019).

El corrimiento de la frontera agrícola hacia el noreste de la Patagonia es un claro ejemplo de cambio en el uso de la tierra, impactando de forma negativa sobre los recursos naturales de esos ecosistemas (Arturi, 2006), modificando la dinámica natural del ciclo biogeoquímico del C (Lal, 2007). El Monte-Espinal es un ecotono que abarca una amplia variedad de provincias de la Argentina, entre ellas una porción sur de Buenos Aires, más precisamente los Partidos de Villarino y Carmen de Patagones. Fisonómicamente la vegetación se caracteriza por la presencia de un matorral más o menos denso con arbustos, entre los cuales se desarrolla una estepa herbácea de escasa cobertura con predominio de gramíneas bajas (Pezzola & Winschel, 2004; Torres Robles et al. 2015). En establecimientos donde se practica la ganadería es común encontrar especies cultivadas, tanto granos como forrajes, para complementar

la alimentación del ganado, para ello a menudo se realizan desmontes (Zeberio, 2018; Ashckar, 2022). Con la expansión de la frontera agrícola y el asentamiento del ganado doméstico, comenzaron a modificarse características naturales de la cobertura (Viglizzo & Jobbágy, 2010). En consecuencia, se produjeron diversos cambios en los suelos, ya que quedaron expuestos tanto a la acción de las lluvias y escorrentías como a los fuertes vientos que caracterizan la región (Manuel-Navarrete et al., 2005). Los desmontes realizados con el fin de expandir el territorio que será utilizado para la actividad agrícola, implican el reemplazo de las especies nativas del ecosistema por otras de carácter exótico (implantadas con fines alimentarios y de producción) (Feller et al., 2015). Todo esto produjo como consecuencia directa una disminución en el contenido de materia orgánica (MO) y cambios en condiciones del suelo tales como: capacidad de infiltración, humedad relativa, capacidad de intercambio de cationes, relación ácido-base. (Manuel-Navarrete et al., 2005).

Feller et al. (2015) afirman que el cambio de uso y manejo en los suelos modifica la concentración de su CO, ya que las nuevas especies cultivadas van a absorber otro tipo de nutrientes y en concentraciones variadas. El cambio de uso y manejo conlleva a una variación diferencial en la cantidad de COS, ya que hay una modificación en la calidad del residuo, de la forma en que los microorganismos oxidan esos residuos y, por lo tanto, del tiempo de residencia del COS (Vázquez, 2008). Los sistemas más conservacionistas mantienen o mejoran los niveles de CO, mientras que los de uso más intensivo lo liberan al ambiente con sus consecuentes efectos (Duval et al., 2014).

La captura de C en los suelos produce efectos ambientales positivos, con una relación directa entre el C del suelo y la biodiversidad (Peri et al., 2019). Asimismo, su incorporación al suelo contribuye a mitigar los efectos del cambio climático (Xu et al., 2019). Por esta razón, el proceso de “re-carbonización” de los suelos es una posible solución para reducir la emisión de GEI y controlar el cambio climático aumentando, a la vez, la resiliencia de los suelos (FAO, 2020). La re-carbonización tiene por objetivos: impedir pérdidas de COS, aumentar las reservas en zonas donde existe potencialidad (suelos agrícolas y degradados), mejorar ingresos agrícolas a medida que se aumenta la productividad del suelo, contribuir a mejorar la seguridad alimentaria y la nutrición, mitigar los efectos del cambio climático y aumentar la responsabilidad social de las distintas empresas en cada uno de los sectores económicos (FAO, 2020).

El potencial de secuestro de CO puede variar según el tipo de suelo, el espesor del perfil y los manejos que se realicen sobre el mismo (Berhongaray & Álvarez, 2019). El tipo de vegetación, la textura de los suelos y el manejo antrópico influyen de manera directa en dicho potencial (Jobbágy & Jackson, 2000; Chan et al., 2001; Galantini et al., 2008; Duval et al., 2016; Schiavi et al., 2019). El C edáfico está contenido en su mayor proporción en la MO, constituyendo entre el 40 - 50% de su masa (Roldán, 2012). El COS se encuentra asociado tanto a la MO como a las partículas texturales del suelo que lo conforman, pudiendo combinarse y generar coloides con alta capacidad de intercambio catiónico. El efecto del CO en las propiedades físicas se manifiesta mediante la modificación de la estructura y la distribución del espacio poroso del suelo. La concentración del COS no solo depende de las condiciones ambientales locales, sino que es afectada fuertemente por el uso y manejo del suelo (Martínez et al., 2008). Su balance en el suelo dependerá de la cantidad y calidad de residuos ricos en CO que reciba, la humedad y temperatura del suelo que está dada por el factor climático, la actividad biótica y la presencia de vegetación que ayuda a mantenerlo retenido por más tiempo y, otros factores como el contenido de MO inicial o de partículas finas (limos y arcilla) del suelo, pudiendo aumentarlo o disminuirlo según su concentración dentro de la matriz del suelo (Crespo et al., 2021). Esto refleja la importancia de tener un balance positivo de CO (Wilson, 2017).

La expresión “carbono orgánico del suelo” (COS) se refiere a la cantidad de C que contiene el suelo, y se expresa como el peso de C por unidad de peso de suelo (g C kg suelo^{-1}). Los cambios climáticos que afectan a las temperaturas y las precipitaciones influyen poderosamente sobre la descomposición y la cantidad de COS que se almacena en un ecosistema y que se libera a la atmósfera (FAO, 2009). Parte de los compuestos orgánicos no vivos que se encuentran en el primer metro de suelo son importantes para la calidad del recurso y la nutrición de las plantas, que son generados gracias a la descomposición de los materiales vegetales (residuos) (USDA, 2013).

El COS puede encontrarse en distintos grados de descomposición: CO lábil (formas más simplificadas de CO dentro de la cual se encuentran los hidratos de C, ligninas, proteínas, taninos y ácidos grasos, todas ellas moléculas fácilmente degradables por acción microbiana) y CO humificado (incluye a las formas complejas de CO que se degradan lentamente, como los ácidos húmicos, ácidos fúlvicos y huminas) (Aguilera, 2000; Galantini, 2002; Taboada, 2021). Los compuestos pertenecientes al C lábil

serán indicadores tempranos de cambios dentro de la cantidad de CO del suelo. Además, éstos influyen en la conformación estructural de los compuestos orgánicos humificados (Galantini & Suñer, 2008). Los estudios sobre el CO lábil del suelo y la aplicación de índices de calidad, basados en el CO, son útiles para evaluar el impacto del uso y manejo del suelo. Chan et al. (2001) y Schiavi (2019) sostienen que las fracciones fácilmente oxidables son más sensibles a los cambios ante diferentes prácticas de manejo que el COT, por lo que sugieren el monitoreo de las fracciones de CO como un indicador de variaciones en la calidad del suelo y de sustentabilidad sobre los ecosistemas naturales y cultivados.

HIPÓTESIS DE TRABAJO

La presión de uso antrópica sobre los ecosistemas condiciona el balance de las fracciones del COS.

PREDICCIÓN

En base a los antecedentes recabados, la predicción a la hipótesis planteada es que aquellos sistemas con más biodiversidad, mayor aporte de residuos y menor intervención antrópica tienden a acumular y estabilizar mayor concentración de COT y CO_{ox} en suelos, contribuyendo así a mitigar la liberación de CO₂ a la atmósfera.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio se encuentra ubicada al SO de la Provincia de Buenos Aires, en el Partido de Carmen de Patagones (Figura 1), en una porción del ecotono Monte-Espinal (Cabrera, 1976). El clima es subtemplado seco de transición, ventoso, con veranos cálidos e inviernos moderados, sin ningún exceso estacional de agua. La temperatura media ronda los 15 °C y la precipitación es de 350 mm en promedio, presentando una alta variabilidad interanual. Predominan los suelos aridisoles y entisoles, areno-limosos, moderadamente alcalinos y de escaso contenido de MO (Godagnone & Bran, 2009). El tipo fisonómico de la vegetación es un matorral o estepa arbustiva xerófila caracterizada por la dominancia de especies arbustivas del género *Larrea* (Cabrera, 1976). La comunidad clímax está formada por la asociación

de: *Larrea divaricata* (jarilla), *Geoffroea decorticans* (chañar), *Condalia microphylla* (piquillín), *Neltuma alpataco* (alpataco), *Chuquiraga erinacea* (chilladora), entre otras. Además, es frecuente encontrar: *Bromus brevis* (cebadilla pampeana), *Nassella tenuis* (flechilla fina), *Stipa ambigua* (paja vizcachera), entre otras, como así también algunas dicotiledóneas entre ellas: *Medicago minima* (Trébol carretilla), *Erodium cicutarium*, (alfilerillo) y *Braccharis ulicina* (yerba de la oveja) (Pezzola & Winschel, 2004; Torres Robles et al., 2015). La ganadería extensiva y la agricultura son actividades económicas importantes, generadoras de renta en la región, y que ejercen una gran presión sobre los ecosistemas provocando su degradación (Pezzola & Winschel, 2004; Krölpf et al., 2007).

Distintas especies vegetales son introducidas dentro del sistema para el uso forrajero, entre ellas: *Thinopyrum ponticum* (agropiro alargado), *Eragrostis curvula* (pasto llorón), *Lolium perenne* (raigrás) y *vicia villosa* (vicia), siendo la primera de ellas la más utilizada dentro del Partido de Patagones, debido a su poder de adaptación a diferentes condiciones edafoclimáticas (Kent et al., 2019; González et al., 2022).



Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio.

Selección de sitios y trabajo de campo

Los sitios en donde se realizaron los estudios pertenecen a un grupo de productores de cambio rural del Partido de Carmen de Patagones: "Grupo Monte" (Tabla 1).

Tabla 1. Usos y manejos productivos en los establecimientos de estudio.

| NOMBRE ESTABLECIMIENTO | USOS Y MANEJOS | |
|---------------------------|--|---|
| | USO GANADERO | MANEJO DE AMBIENTES |
| Don Pablo | Cereales de invierno. Pastoreo con bovinos. | Agrícola con pastoreo de rastrojos. |
| El Tata | Pastoreo con bovinos y ovinos. | Monte arbustivo-graminoso con pastoreo. |
| El Chalo | Pastoreo con bovinos y ovinos. | Pastizal natural con pastoreo. |
| La Mascota | Pastoreo con bovinos. | Agropiro con pastoreo. |
| Los Tres Hermanos | Cereales de invierno. Pastoreo con bovinos. | Agrícola con pastoreo de rastrojos. |
| Monte Redondo | Pastoreo con bovinos. | Monte arbustivo-graminoso con pastoreo. |
| Santa Rosa | Pastoreo con bovinos. | Agropiro con pastoreo. |
| Hipólito B | Cereales de invierno. Pastoreo con bovinos y ovinos. | Agrícola con pastoreo de rastrojos. Monte arbustivo-graminoso y agropiro con pastoreo. |
| Lomas Blancas | Pastoreo con bovinos y ovinos. | Pastizal natural y monte arbustivo- graminoso con pastoreo. |
| San Pedro | Pastoreo con bovinos. | Monte arbustivo-graminoso con pastoreo. |
| Don Scheffeld | Pastoreo con bovinos. | Pastizal natural con pastoreo. |
| Rancho Alegre | Pastoreo con bovinos. | Monte arbustivo-graminoso y agropiro con pastoreo. |
| La Cancha | Cereales de invierno. Pastoreo con bovinos. | Pastizal natural, monte arbustivo- graminoso y agropiro con pastoreo. Agrícola con pastoreo de rastrojos. |

Para este estudio se consideraron los usos y manejos más representativos que llevan adelante los productores (Figura 2), entre ellos:

1-Pastoreo rotativo sobre pastizal natural (Pastizal N.+PR): conformado por especies herbáceas tales como: *Nassella clarazii* (Flechilla rubia), *Nassella tenuis* (flechilla fina), *Stipa papposa* (Flechilla mansa), *Stipa ambigua* (Paja vizcachera), *Stipa speciosa* (Coirón duro), *Poa ligularis* (Coirón poa), *Pappophorum vaginatus*, *Lolium multiflorum* (Raigrás anual), y *Medicago minima* (trébol de carretilla).

2- Pastoreo rotativo sobre monte arbustivo-graminoso (Monte+PR): compuesto por arbustos tales como: *Condalia microphylla* (Piquillín), *Geoffroea decorticans* (Chañar), *Prosopis alpataco* (Alpataco), *Larrea divaricata* (Jarilla), *Chuquiraga erinacea* (chilladora), *Monttea aphylla* (Matasebo o mata de sebo), *Lycium chilense* (Yaoyín o yauyín); y algunas especies herbáceas en común con el Pastizal N.+PR.

3- Pastoreo rotativo sobre agropiro (Agrop.+PR): conformado exclusivamente por la especie *Thinopyrum ponticum* (Agropiro alargado).

4- Pastoreo rotativo sobre rastrojos de cereales de invierno (Agric.+PR) tales como: *Triticum spp.* (Trigo), *Avena sativa* (Avena), *Hordeum vulgare* (Cebada), *Secale cereale* (Centeno) y *Triticum aestivum* (Triticale).



Figura 2. Ambientes estudiados: 1) Pastizal natural, 2) Monte arbustivo-graminoso, 3) Pasturas perennes con agropiro alargado y 4) Rastrojos de cereales de invierno.

En cada sitio se asignaron tres puntos de caracterización (n=3) y muestreo de suelos para cada uso y manejo (Figuras 3.1 y 3.2) mediante una distribución sistemática a lo

largo de una transecta con intervalos fijos de 100 m lineales entre ellos (Matteucci & Colma, 1982).



Figura 3. Trabajo de campo: 1) Caracterización del sitio y 2) Muestreo de suelos.

En cada punto se tomaron dos tipos de muestras: una compuesta con ayuda de una pala a 0-20 cm de profundidad (tres submuestras por cada punto de muestreo), y otra sin disturbar, utilizando cilindros de volumen conocido ($98,2 \text{ cm}^3$), a dos profundidades: 0-10 y 10-20 cm. Las muestras fueron llevadas al laboratorio para su posterior análisis.

Análisis del suelo: determinaciones físicas y químicas

Tratamiento de las muestras compuestas

Estas muestras se secaron al aire y luego fueron tamizadas por malla de 2 mm. Posteriormente, se determinó la composición granulométrica del suelo por medio del método del hidrómetro (Bouyoucos, 1962) (Figura 4) para cuantificar la cantidad de arena, limo y arcilla.



Figura 4. Probetas con suelo para cuantificar la composición granulométrica.

Tratamiento de las muestras tomadas con cilindro

Para las dos profundidades muestreadas, el suelo que se encontraba dentro de los cilindros fue separado en dos partes: una de ellas se secó en estufa a 105°C hasta alcanzar un peso constante para determinar densidad aparente (DA) como el cociente entre el peso seco de la muestra y el volumen del cilindro (Blake & Hartge, 1986) (Ecuación 1). La otra parte fue secada al aire y tamizada por malla de 2 mm para determinar CO total (COT) y fracciones de CO oxidable (CO_{ox}).

$$\text{Ecuación 1: } DA = pss/vol$$

Donde: *pss*= peso suelo seco de la muestra (g).

vol= volumen del cilindro (cm³).

La determinación del COT fue realizada por medio del método de combustión húmeda a microescala de Walkley & Black (1934) (SAGPyA, 2007), y las fracciones de CO_{ox} a partir de una modificación del método propuesta por Chan et al. (2001). Para ello, la determinación de CO_{ox} se repitió utilizando 0,75 y 1,5 mL de H₂SO₄ en lugar de los 3 mL especificados por Walkley & Black (1934). Las proporciones de tres soluciones acuosas y ácidas resultantes de 0,5:1, 1:1 y 2:1 (que corresponden respectivamente a 12 N, 18 N y 24 N de H₂SO₄) permitieron comparar el CO_{ox} extraído en condiciones crecientes oxidantes (Figura 5):

- Fracción 1 (F1), CO_{ox} bajo 12 N (CO fácilmente oxidable/CO lábil).

- Fracción 2 (F2), diferencia en el CO_{ox} extraído entre 18 N y 12 N (Transición CO lábil-CO humificado/CO semi-humificado).
- Fracción 3 (F3), diferencia en el CO_{ox} extraído entre 24 N y 18 N (CO humificado).

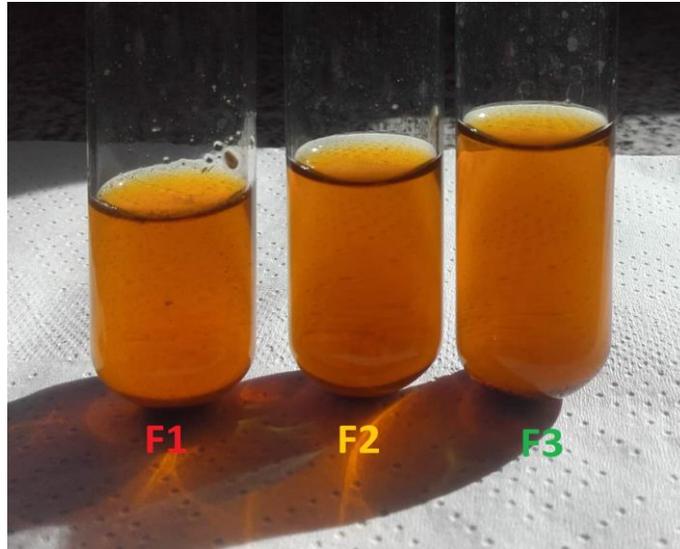


Figura 5. Tubos de ensayo con diferentes dosis de H₂SO₄ utilizados para determinar las fracciones de CO_{ox}. Fracción 1 (F1= 12 N, 0,75 mL H₂SO₄), Fracción 2 (F2= 18 N, 1,5 mL H₂SO₄) y Fracción 3 (F3= 24 N, 3 mL H₂SO₄).

En todos los casos los análisis de las muestras se realizaron por duplicado.

Se calculó la cantidad de COT y de sus fracciones oxidables (Mg ha⁻¹) a partir de la ecuación de Ussiri et al. (2006) (Ecuación 2):

$$\text{Ecuación 2: } C \text{ (Mg ha}^{-1}\text{)} = \left(\frac{X}{100}\right) * DA * p * 10^4 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$$

Donde: X= contenido de COT o de sus fracciones en porcentaje (%CO).

DA= densidad aparente (Mg m⁻³).

p= espesor del suelo muestreado en metros (m).

Se estimó la pérdida o ganancia del COS y de sus fracciones, como la diferencia entre lo cuantificado en el sistema de menor intervención antrópica (situación de referencia: Pastizal N.+PR) y los otros usos y manejos productivos.

Análisis estadístico de los datos

Mediante análisis de varianza (ANOVA) se comparó la concentración de COT, de las distintas fracciones CO_{ox}. y de la cantidad de CO para cada condición de uso y manejo

estudiada; en los casos que en los que se detectaron diferencias se aplicó el test de comparación de medias LSD de Fisher al 5%. Además, se obtuvieron las variaciones de COS entre los distintos usos y manejos de los ambientes, utilizando el Pastizal N.+PR como situación de referencia. Los datos fueron procesados y analizados utilizando el software estadístico *Infostat versión 2011TM* (Di Rienzo et al. 2013).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización general de los ambientes y de los suelos del área en estudio

La Tabla 1 presenta el uso y manejo realizado por cada uno de los 13 productores incluidos en el presente estudio. En todos los casos, el pastoreo ganadero fue un factor de uso común.

Siguiendo un gradiente decreciente de diversidad de especies vegetales, los sistemas menos intervenidos (Pastizal N.+PR y Monte+PR) presentaron un mayor número de especies en su composición, manteniendo el suelo cubierto de forma continua en el tiempo; mientras que los sistemas que han sufrido un cambio en su cobertura vegetal nativa (Agrop.+PR y Agric.+PR), sometidos a prácticas de laboreo del suelo, presentaron una o pocas especies vegetales, en general de tipo exóticas. La cobertura vegetal cumple un rol fundamental en la protección superficial de los suelos ante los impactos erosivos, permitiendo además un mejor funcionamiento interno del suelo (Abril & Bucher, 2001). En este sentido, se puede inferir que los sistemas de Pastizal N.+PR y Monte+PR, con mayor diversidad y cobertura vegetal, protegerán de manera más eficiente al suelo y en forma continua.

La cantidad de arena varió aproximadamente en un 9% entre usos y manejos del suelo (78,7-85,7; $p < 0,006$), encontrando valores mayores en el Pastizal N.+PR respecto de los manejos con más intervención, excepto con el Monte+PR.

En suelos con Agric.+PR el porcentaje de limo fue 38,4% mayor respecto de aquellos menos intervenidos ($p < 0,002$), sin diferenciarse estadísticamente del Agrop.+PR. La cantidad de arcilla no difirió significativamente entre usos y manejos, siendo baja su presencia en todos los suelos (~7,3%). La fracción de limo+arcilla (L+a) fue mayor en los suelos de los ambientes más intervenidos (Agrop.+PR y Agric.+PR), diferenciándose del Pastizal N.+PR en un 33,4% ($p < 0,006$) (Tabla 2).

La DA en suelos con Agrop.+PR superó en 0,07 Mg m⁻³ a aquellos con Monte+PR y Agric.+PR (p<0,01). Por último, se encontró un 36,5% más CO en suelos de pastizal N+PR respecto del resto de los usos y manejos (p<0,03) (Tabla 2).

Tabla 2. Contenido arena, limo y arcilla, densidad aparente (DA) y concentración de carbono orgánico (CO). Profundidad 0-20 cm. Media ± (EE).

| Variable | Uso y manejo | | | | p-valor |
|--------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------|
| | Pastizal N.+PR | Monte+PR | Agrop.+PR | Agric.+PR | |
| Arena (%) | 85,7 (1,7) b | 81,5 (1,0) ab | 76,7 (1,1) a | 78,7 (1,8) a | 0,006 |
| Limo (%) | 7,9 (1,3) a | 10,7 (1,6) ab | 14,6 (0,8) bc | 15,1 (1,5) c | 0,002 |
| Arcilla (%) | 6,8 (2,3) | 7,8 (1,6) | 8,6 (0,9) | 6,2 (0,8) | ns |
| Limo+Arcilla (%) | 14,7 (1,7) a | 18,5 (1,0) ab | 23,2 (1,1) b | 21,3 (1,8) b | 0,006 |
| DA (Mg m ⁻³) | 1,39 (0,02) ab | 1,36 (0,03) a | 1,42 (0,02) b | 1,34 (0,02) a | 0,01 |
| CO (%) | 12,6 (2,1) b | 7,8 (0,8) a | 7,1 (1,1) a | 9,1 (1,0) a | 0,03 |

Letras distintas indican diferencias significativas (p<0,05) entre usos y manejos.

En el Pastizal N.+PR se encontró una mayor relación entre CO/(L+a) comparada a la obtenida en los otros usos y manejos, con valores de 0,86 para el primero y 0,38 en promedio para los otros, lo que representa un 55,8 % más CO en suelos con Pastizal N.+PR (Figura 6). El manejo de pastizales con gramíneas es el que mayores niveles de COS reflejó, coincidiendo con lo hallado por Schiavi (2019), donde se comprueba una mayor efectividad para retener CO a granulometrías más finas (L+a). De esta manera, en el mismo estudio se encontraron valores mayores al 50% en CO/(L+a) en lotes con uso y manejo de pastizal con gramíneas respecto de los usos y manejos con agropiro y cereales de invierno, resultado coincidente al hallado en este estudio. De acuerdo a lo reportado por Berhongaray & Álvarez (2019), quienes encontraron que la textura del suelo condiciona la retención de agua disponible para la productividad de la vegetación, y en consecuencia el ingreso de CO vía residuos al suelo, alrededor del 90% de este CO está vinculado a los aportes realizados en los primeros 10 cm del suelo. En este sentido, los sistemas de Pastizal N.+PR tendrían un mayor aporte de residuos orgánicos a nivel superficial, incrementando así el COS.

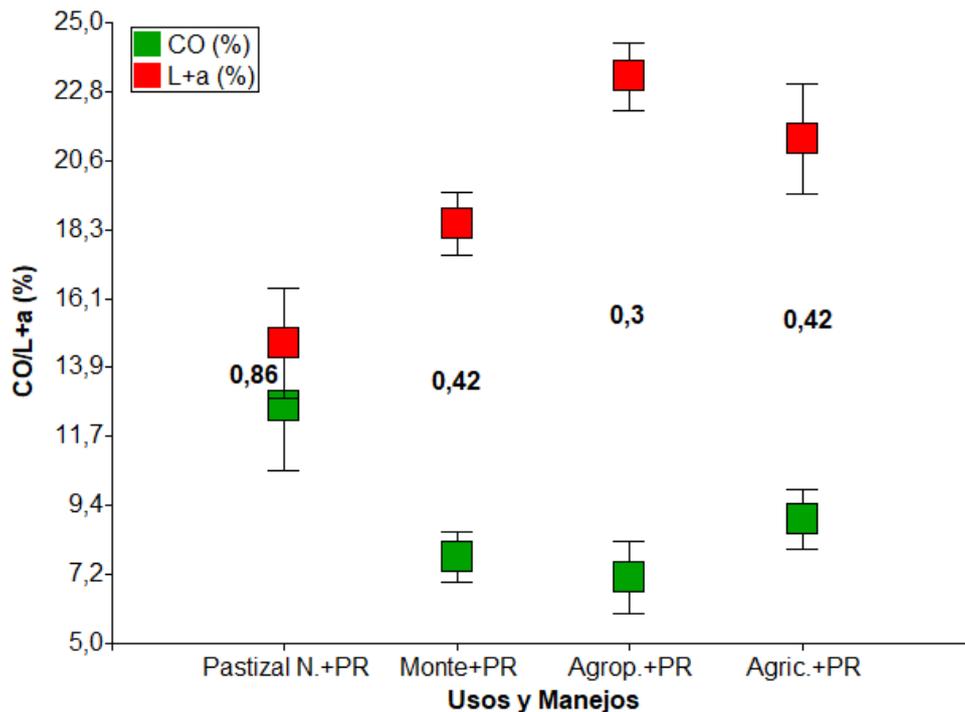


Figura 6. Relación entre el CO y la fracción fina del suelo (L+a) en cada uso y manejo. Las barras representan ± 1 EE.

Variación en concentración y cantidad de COS en cada uso y manejo

En la figura 7a se presentan los porcentajes obtenidos de COT y de las fracciones de CO_{ox} (F1, F2 y F3) para los usos y manejos evaluados, en los primeros 10 cm de suelo. La F1 no presentó diferencias significativas entre ellos. Mientras que la F2 y la F3 permitieron diferenciar los ambientes menos intervenidos de aquellos con mayor disturbio antrópico, encontrándose más CO en los primeros. El contenido de COT resultó mayor en Pastizal N.+PR y Monte+PR, con un amplio rango de variación comparado con lo que se encontró en los suelos con Agrop.+PR y Agric.+PR. Al igual que para el horizonte más superficial evaluado, a profundidad 10-20 cm se encontró poca variabilidad del contenido de CO para F1; mientras que la F2 y la F3 posibilitaron diferenciar los suelos de Monte+PR de aquellos con Agric.+PR. En este estudio, el Pastizal N.+PR se diferenció de los manejos más antropizados por su contenido de COT, aunque guarda similitud con el porcentaje encontrado para el uso y manejo del Monte+PR (Figura 7 b). Por último, la figura 7c muestra el contenido de CO encontrado en el perfil completo (0-20 cm), donde se aprecian mayores valores de F1 en Pastizal N.+PR respecto de los otros usos y manejos evaluados. Para el Pastizal N+PR y el Monte+PR, F2 y F3 alcanzaron los máximos valores, superando de esta

manera a los usos y manejos con especies introducidas. El porcentaje de COT, siguió la tendencia del suelo superficial y resultó ser mayor en los usos y manejos con especies nativas. Similar a lo hallado en este trabajo (15,9% vs. 10,5% en COT y 4,5% vs. 3,3% en F1+F2), Ashckar (2022) determinó 4,9% y 4,4% más COT y CO lábil en sistemas con menor intervención antrópica en el NE de Río Negro respecto del monte natural con sistemas de usos y manejos agrícolas. Así los propone como un indicador importante a la hora de evaluar la capacidad de mantenimiento del COS. De esta manera, el mantenimiento de pastizales mantiene o mejora la calidad del suelo en estos ecosistemas, lo que se apoya en base a los resultados de este trabajo. A partir de estudio del uso de indicadores de salud del suelo en el sureste de la Región Pampeana, se comprobó una disminución del COS del 25% en suelos con uso agrícola comparado a ambientes con especies nativas (Rodríguez et al., 2022). Este resultado coincide con el que pudo registrarse en el presente trabajo, donde la diferencia en la concentración de COS a favor de los ambientes menos intervenidos fue del 31%.

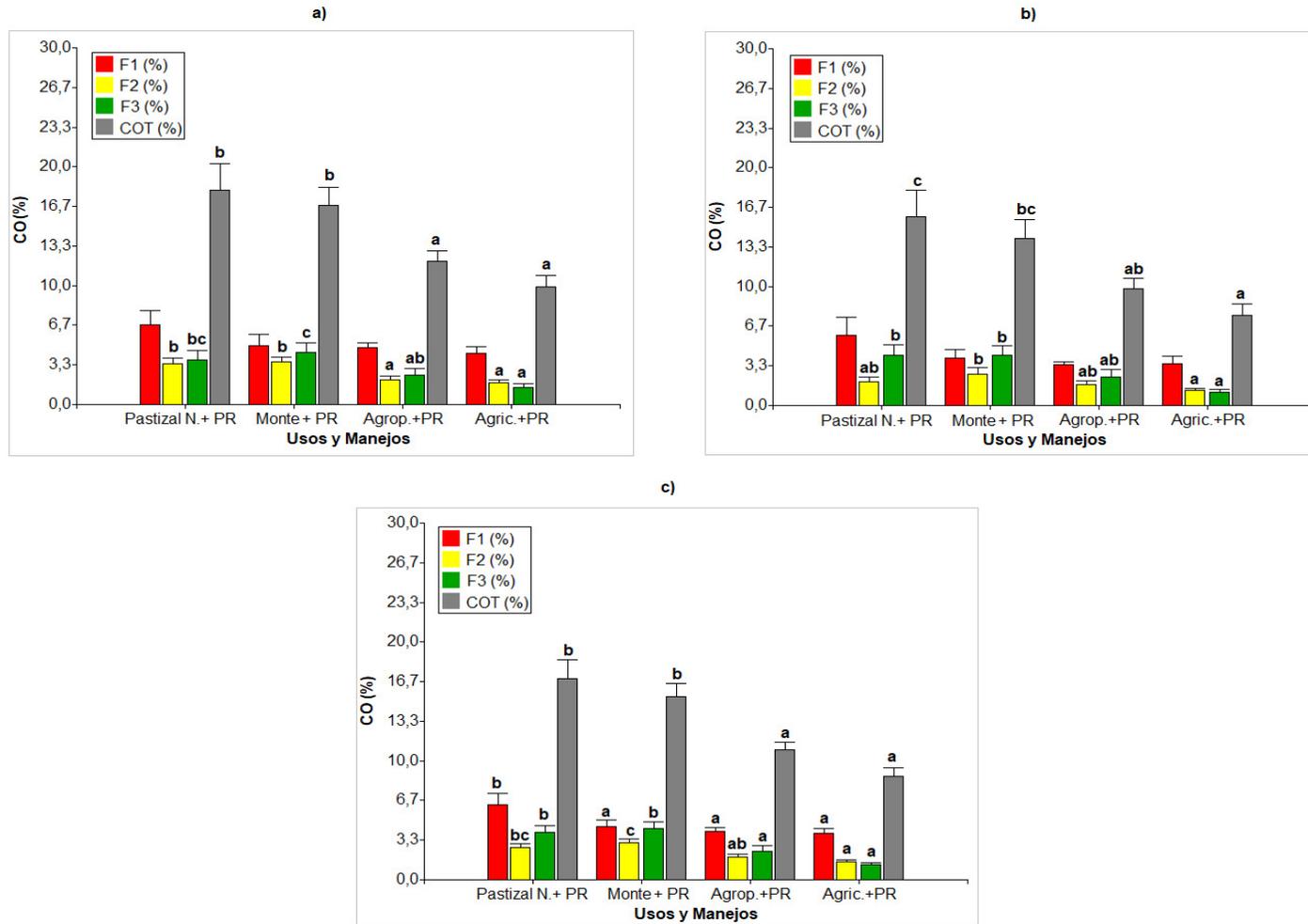


Figura 7. Fracciones de carbono orgánico (CO) oxidables (F) y total (COT). Profundidad edáfica (cm): a) 0-10, b) 10-20 y c) 0-20. Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre usos y manejos evaluados. Las barras representan ± 1 EE

Como consecuencia de la actividad y distribución de las raíces dentro del suelo, a mayor profundidad disminuye el contenido de COS (Jobbágy & Jackson, 2000). Al comparar el COS a distintas profundidades (0-10 y 10-20 cm) en los sistemas con Pastizal N+PR y Monte+PR, se encontró un 16,2% más COS en los primeros 10 cm y, en aquellos con Agrop.+PR y Agric.+PR un 17,3%. En suelos del área de bosques en Alemania, Grüneberg et al. (2010) encontraron un 25% más COS a 0-10 cm comparado con mayores profundidades. Por otra parte, estudios acerca de la variación del CO entre suelos con diferentes grados de restauración y uso en el oeste de la provincia de Chaco, Argentina, mostraron que el mayor tiempo de mantenimiento de la cobertura mejora o mantiene los contenidos de C en el suelo (Abril & Bucher, 2001). Por lo tanto, estos resultados coinciden con los de este trabajo, donde se halló que los suelos con mayor intervención antrópica contenían menos CO como consecuencia del uso y la menor cobertura vegetal.

En este sentido, Duval et al. (2013) informaron reducciones de hasta un 38% en los niveles de COS al comparar los sistemas naturales con los cultivados en la región semiárida pampeana, Argentina, señalando la efectividad de los pastizales para el mantenimiento a largo plazo del COS. Similar a lo reportado por estos autores, se encontró en este trabajo un 31,6% menos COS en los sistemas más intervenidos. De esta forma, el aumento de la cobertura vegetal y de la diversidad de especies (sistemas con Pastizal N.+PR y Monte+PR) produciría, al mismo tiempo, un aumento en la actividad de raíces dentro de los suelos, y por ende más aportes de residuos orgánicos al sistema, proponiéndose al proceso de exudado radicular como uno de los responsables del aumento del COS (Panchal et al., 2022).

La Figura 8 muestra la cantidad de CO correspondiente a cada uso y manejo estudiado. Los suelos con Pastizal N.+PR y Monte+PR presentaron los máximos valores (en promedio $107,3 \text{ Mg CO ha}^{-1}$), diferenciándose de aquellos con Agrop.+PR y Agric.+PR en al menos $52,7 \text{ Mg CO ha}^{-1}$. Fernández et al. (2021) afirman que el uso y manejo de pastizales naturales contribuye no solo a aumentar la concentración de COS, sino que además logra aumentar la cantidad y las reservas de CO disponibles. Esto sucede así porque la estructura del suelo guarda estrecha relación con la porosidad del mismo; en ese sentido, en Molisoles de la Pampa Subhúmeda se confirmó que los suelos de baja a moderada intervención contenían al menos un 50% de espacio poroso, frente a suelos de mayor intervención que arrojaron un 45%. De

forma coincidente, Castillo-Pacheco et al. (2015) confirman la efectividad del pastizal natural en sus estudios del CO bajo diferentes sistemas de producción vegetal, encontrando que los pastizales naturales contenían 90 Mg CO ha⁻¹ en comparación con los suelos de uso agrícola que alcanzaron valores medios de 46 Mg CO ha⁻¹. Por su parte, Duval et al. (2013) encontraron hasta 7,1 Mg CO ha⁻¹ a favor de los ambientes naturales en suelos Haplustoles énticos, areno-limosos de la Región Pampeana argentina, tras compararlos con suelos bajo agricultura intensiva.

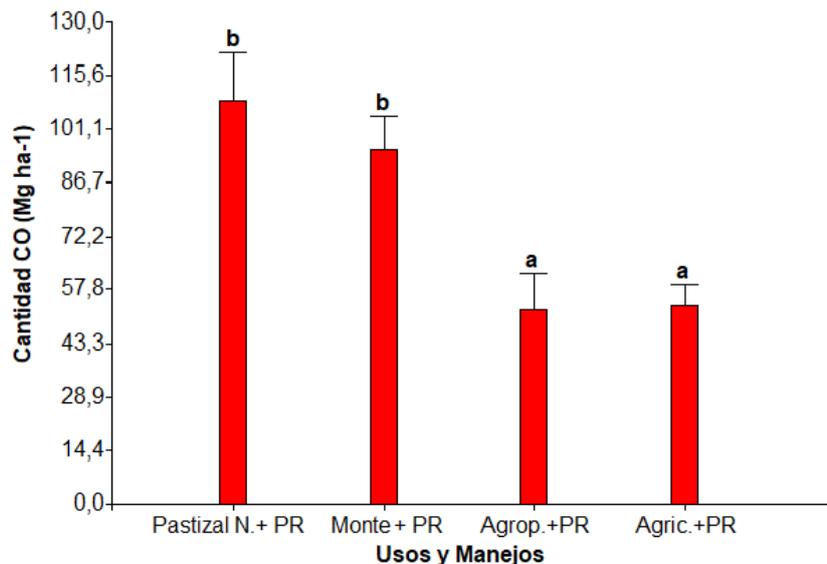


Figura 8. Cantidad de CO en función de los diferentes usos y manejos. Profundidad edáfica 0-20 cm. Las barras representan ± 1 EE.

Variación en la cantidad de COS en cada tipo de uso y manejo

La cantidad de COS a 0-10 y 10-20 cm de profundidad fue siempre mayor en la situación de referencia (Pastizal N.+PR), comparado a la que se encontró en los suelos de los otros usos y manejos estudiados (Figura 9 a). A su vez, el COS fue mayor en el horizonte más superficial en la situación de referencia. Las diferencias con la situación de referencia, en orden descendente, fueron: Monte+PR (-1,9 Mg CO ha⁻¹) > Agrop.+PR (-18,1 Mg CO ha⁻¹) > Agric.+PR (-19,2 Mg CO ha⁻¹) (Figura 9 a). A 10-20 cm las tendencias se mantuvieron, aunque encontrando que las diferencias con la referencia se incrementaron en -10,8 Mg CO ha⁻¹ para el Monte+PR, y en -22,6 Mg CO ha⁻¹ para Agrop.+PR y Agric.+PR. En el perfil completo (0-20 cm), la diferencia encontrada entre la situación de referencia y aquellos más disturbados alcanzó los -44,8 Mg CO ha⁻¹ (Figura 9 b). Esto se fundamenta con el estudio de Quiroga et al. (2016), quienes identificaron que el contenido de CO en suelos vírgenes y agrícolas no solo varía en función de la textura, sino que la

biodiversidad también es un factor relevante para mantenerlo por más tiempo dentro del suelo. Así, hallaron una variación de entre 3-5% en suelos de ambientes naturales, y de 1-2% en aquellos con uso agrícola y pastoreo; siendo el primer caso correspondiente a los suelos que presentaron mayor cobertura y diversidad de especies vegetales. En este sentido, Duval et al. (2013) evaluaron diferentes modelos de producción agrícola respecto de ambientes poco intervenidos, encontrando en los primeros suelos contenidos de 8,4 Mg CO ha⁻¹ y, en los segundos con especies nativas, 26,6 Mg CO ha⁻¹. De esta manera argumentan que a medida que aumenta la cobertura vegetal menor será la liberación de los compuestos de CO hacia la atmósfera, y que en suelos de mayor intervención las pérdidas de CO se deben al constante movimiento en los primeros cm de suelo y un aumento en el porcentaje de parches de suelo desnudo entre especies. La FAO en el año 2020 lanzó un programa para la re-carbonización de los suelos a nivel mundial, afirmando que los suelos más intervenidos pierden entre un 25-75% de su contenido de CO en comparación al contenido original registrado en los ambientes naturales. Contrariamente, los usos más intensivos producen la “descarbonización” de los suelos, siendo esto una consecuencia directa del uso de prácticas agrícolas poco conservacionistas que degradan el CO y lo liberan en forma de CO₂ a la atmósfera.

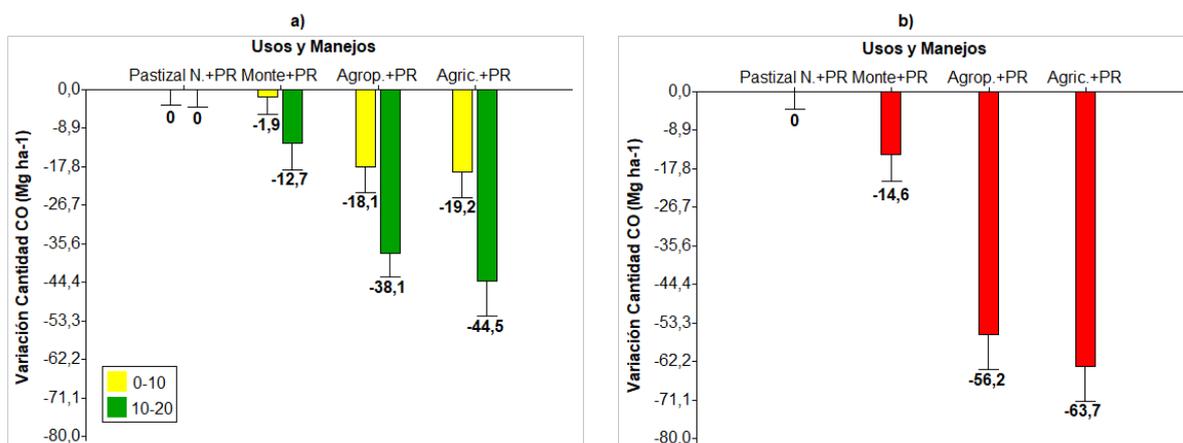


Figura 9: Variación de ganancias-pérdidas en la cantidad de CO para cada uso y manejo, respecto de la situación referencia (pastizal natural): a) Por profundidad, y b) Perfil completo. Las barras representan ± 1 EE.

La cantidad de CO lábil (F1+F2) fue significativamente mayor (en 76,4 Mg ha⁻¹) en los suelos con Pastizal N.+PR respecto de los de usos y manejos más intervenidos, sin diferenciarse estadísticamente de los suelos con Monte+PR (Figura 10 a). Mientras que la cantidad de CO humificado (F3) fue significativamente mayor (en 53,9 Mg ha⁻¹)

1) en los suelos con usos y manejos menos intervenidos (Pastizal N.+PR y Monte+PR) respecto de los suelos con Agric.+PR, sin diferenciarse estadísticamente con su contenido en suelos con Agrop.+PR (Figura 10 b).

Considerando el Pastizal N.+PR como la situación de referencia, se registró una reducción del 16,2% del CO lábil (F1+F2) en los suelos con Monte+PR y un 35,3% en aquellos con Agrop.+PR y Agric.+PR, en promedio. Respecto al CO humificado (F3), los suelos con Agric.+PR presentaron la mayor reducción (32,0%) seguido por el Agrop.+PR (20,8%). Por el contrario, en los suelos Monte+PR se encontró 6,5% más CO humificado respecto de la situación de referencia (Figura 11).

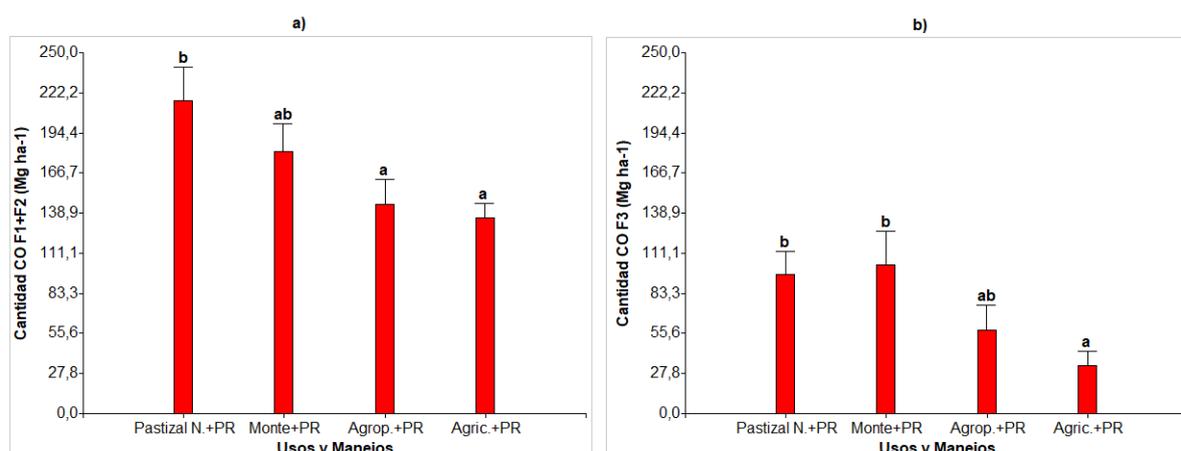


Figura 10: Cantidad de CO para cada uso y manejo del suelo: a) CO lábil (F1+F2), y b) CO humificado (F3). Las barras representan ± 1 EE.

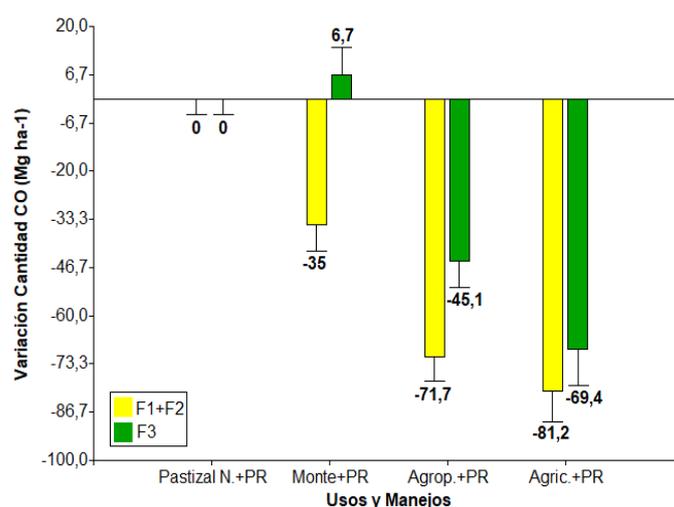


Figura 11: Variación de las cantidades de CO por fracción para cada uso y manejo del suelo respecto de la situación de referencia (pastizal natural). Las barras representan ± 1 EE.

Al igual que lo encontrado en este trabajo, para el COT y formas de COS, estudios realizados por Shrestha & Stahl (2008) y Panchal et al. (2022) reportan que la

biodiversidad cumple un rol importante en el mantenimiento de las formas de COS, al aumentar los valores vinculados a diversos procesos que favorecen su formación. Un indicador asociado a esto es la “relación C/N” dentro del ecosistema, para el cual estos autores hallaron un aumento del CO lábil por actividad microbiana, en suelos que mantenían áreas con pastizales naturales. Por su parte, Jiménez Madrid et al. (2021) consideran que los pastizales naturales tienen un impacto positivo en la captura de C, pudiendo secuestrarlo en grandes cantidades y así disminuir la concentración de CO₂ atmosférico. Todos estos estudios apoyan los resultados encontrados en este trabajo, pudiendo inferir que la concentración y cantidad de COS tiende a ser mayor en los ambientes naturales comparados con aquellos destinados a un uso y manejo de producción agrícola.

Consecuencias ambientales y productivas debidas a variaciones en el COS

Los resultados de este estudio señalan que el reemplazo de la cobertura vegetal nativa (pastizales naturales y monte arbustivo graminoso), para someter los suelos a usos y manejos más intensivos (producción de forraje y/o cereales), tienden modificar los niveles y las formas del COS (lábil y humificado). Las alteraciones de los procesos edáficos producen cambios en el funcionamiento de los ecosistemas y muchos problemas medioambientales que cobran visibilidad en otros medios (Ayala Aragón & Almanza López, 2021). En el proceso de reemplazo de la cobertura vegetal de origen por especies exóticas tanto para consumo humano como de forraje para la producción ganadera, Ashckar (2022) al NE de la provincia de Río Negro, Argentina, halló que el desmonte redujo en 4,9% el COT y en 4,4% el CO lábil, agudizando los procesos degradativos como por ejemplo la pérdida de suelo por erosión eólica. Estos resultados son coincidentes a lo encontrado en este estudio, donde el COT y el CO lábil (F1+F2) fueron 5,4% y 1,2% menores en los sistemas con mayor intervención. De forma complementaria, González et al. (2022) sostienen que el mantenimiento de las especies nativas dentro del ecosistema ofrece una mejor y continua protección de los suelos arenosos y arenosos-francos, susceptibles a ser erosionados por los vientos fuertes y frecuentes que caracterizan al norte de la Patagonia Argentina. Siendo la erosión eólica uno de los procesos degradativos de mayor impacto ambiental y productivo también en el SO Bonaerense.

Los cambios realizados dentro de los ecosistemas alteran los ciclos biogeoquímicos, lo que a su vez contribuye a generar parte de los sucesos que conllevan al cambio climático. La sociedad moderna considera que esto se trata de un fenómeno a nivel atmosférico, donde se encuentra incluido el C. Sin embargo, la reserva de COS en el primer metro de suelo es mayor al C contenido en la atmósfera y la vegetación terrestre combinados (Lefèvre et al., 2017). No obstante, el suelo como reservorio de C es un factor clave a la hora de pensar estrategias de mitigación del cambio climático. Los sistemas con especies nativas pueden mantener por más tiempo el C dentro del suelo gracias a la mayor diversidad de especies y de raíces que aportan compuestos carbonados al suelo vía sus residuos. En el presente estudio, esto puede comprobarse debido a que en los sistemas con pastizales naturales y monte arbustivo-graminoso se encontró 54,6 Mg CO ha⁻¹ más que en los de mayor intervención.

En las zonas donde predominan climas áridos y semiáridos, como en el área de estudio de este trabajo, Laban et al. (2019) sostiene que la implementación de las prácticas convencionales de mantenimiento del CO tales como la agroforestería, la agricultura conservacionista y el pastoreo rotativo resultan más complejas de aplicar. Para sortear las dificultades asociadas, proponen la adopción de técnicas de uso y manejo basadas en las características funcionales del suelo y la vegetación natural (herbáceas y arbustivas). En este estudio, en los suelos con vegetación nativa se halló 55,8% más CO asociado a la fracción más fina del suelo (L+a), lo que podría ser consecuencia de un mejor funcionamiento de estabilización y acumulación de CO, producto de condiciones bióticas y abióticas más favorables para estos procesos. Mantener condiciones favorables en los ecosistemas a partir del conocimiento de su funcionamiento integral (ambiental - productivo) pueden acompañar al productor a tomar decisiones de uso y manejo más conscientes de los ecosistemas para la provisión de bienes y servicios a la población del SO Bonaerense.

Los procesos de desmonte y remoción de especies nativas disminuyen la capacidad de retención del CO por parte del suelo, incrementando su emisión a la atmósfera como CO₂, CH₄ (metano) y N₂O (óxido nitroso), aportando a los GEI. Prácticas de uso y manejo intensivas del suelo con notoria intervención humana, por lo general conllevan a un progresivo agotamiento del COS (Crespo et al., 2021). Esta afirmación se relaciona directamente con lo encontrado en el presente estudio, donde se determinó una diferencia de 44,8 Mg CO ha⁻¹ entre los usos y manejos menos

intervenidos (Pastizal N.+PR y Monte+PR) y aquellos más disturbados, a favor de los primeros.

Se ha documentado que después de producirse un cambio en el uso del suelo, de sistemas naturales a agroecosistemas, se genera una variación en las entradas disponibles de C y en su dinámica espacial de renovación dentro de los suelos, alterando la reserva del COS (Berhongaray & Álvarez, 2019). Los hallazgos de este estudio estarían en concordancia a lo postulado por estos autores, ya que se encontró que el COS (0-20 cm) fue 59,9 Mg CO ha⁻¹ menor en los suelos con usos y manejos más intervenidos los que, de alguna manera para ponerlos bajo producción agrícola, fueron sometidos a un reemplazo de la cobertura vegetal nativa.

La combinación de diferentes sistemas de uso y manejo de los ecosistemas debería permitir lograr la retención del CO en superficie y a mayor profundidad. En este sentido, la vegetación cumple un rol fundamental ya que permite la formación del COS por medio de la transformación microbiana de los restos aéreos y subterráneos vegetales (Lefèvre et al., 2017). De los cuatro usos y manejos analizados en este estudio, los ecosistemas asociados a vegetación natural presentaron mayor cantidad de CO lábil (+62,4 Mg CO ha⁻¹), esto podría reflejar mayores aportes de residuos realizados bajo estos sistemas. A partir del COS, cuantificar y monitorear el CO lábil (F1+F2), resultó ser un indicador sensible y eficiente para determinar la salud y calidad del suelo en una forma simple y rápida. Se encontró a las fracciones de CO_{ox} como buenos indicadores de cambio, en función de prácticas agrícolas tradicionalmente aplicadas sobre suelos del SO Bonaerense.

En relación a los procesos erosivos, la remoción o reducción de la cobertura vegetal expone al suelo a la pérdida de partículas por acción de lluvias y fuertes vientos, reduciendo su contenido de CO y nutrientes. El rol que cumple la vegetación en el mantenimiento del CO dentro del sistema suelo en los distintos ecosistemas es un factor clave para los procesos vinculados a la retención de nutrientes ricos en C y su posterior formación de compuestos de CO (Wilson, 2017). Así, afirma que los pastizales naturales son los sistemas más diversos, mostrando un mayor índice de biodiversidad en comparación a otros tipos de usos y manejos del suelo. Tal como se ha indicado en la figura 8 del presente estudio, se comprueba una mayor cantidad de COS en ambientes con especies nativas (52,7 Mg CO ha⁻¹ más) respecto de suelos con sistemas más intervenidos. De esta manera, González et al. (2022) argumentan que la modificación del ecosistema natural para uso productivo requiere la realización

de desmontes, reemplazar la cobertura vegetal de origen (ya sean pastizales naturales o monte arbustivo-graminoso) y dejar el suelo desnudo, provocando una reducción del COS.

La actividad de raíces contribuye a aumentar la concentración del CO lábil (Panchal et al., 2022). Esto a causa de que el exudado de raíces trae consigo la inhibición de procesos llevados a cabo por los microorganismos del suelo en cuanto a la humificación del CO. Por lo tanto, es importante evaluar la mejor alternativa de uso y manejo del suelo para cada caso, destacando en este punto el potencial que tiene el uso y manejo de pastizales naturales en la captación y mantenimiento de las formas de CO, tanto en la captación de C aéreo como subterráneo (Panchal et al., 2022). En este estudio se pudo comprobar que los usos y manejos con especies nativas, si bien son los que mayor cantidad de COS tienen, difieren entre ellos en función del grado de transformación de compuestos orgánicos de C, dado que en el Pastizal N.+PR se encontró mayor cantidad de CO lábil ($F1+F2= +16,2\%$) y en el Monte+PR mayor CO humificado ($F3= +6,5\%$).

En el trabajo de Jiménez Madrid et al. (2021) se argumenta que en el pasado existió una variedad de opiniones respecto de si la captura de C en los suelos podía ser realista, práctica y con opciones a largo plazo, acumulando de esta forma la cantidad suficiente de evidencias en favor de dichos aspectos. Es así como se considera que los ambientes destinados al pastoreo tienen el potencial necesario para almacenar una buena reserva de CO y disminuir la liberación de CO₂ hacia la atmósfera. En suma, Lal et al. (2018) en sus estudios sobre el potencial de secuestro de COS en los distintos ecosistemas naturales, sostienen que los pastizales naturales tienen la capacidad de retenerlo por más tiempo, argumentando que, para el caso de los ecosistemas áridos y semiáridos, es fundamental su diversificación, ayudando así a disminuir la cantidad de suelos desnudos o desprotegidos (todos ellos siendo éstos más propensos a ser erosionados). También, Abraham et al. (2016) plantean la necesidad de un cambio profundo en la estructuración del modelo productivo y su manejo a largo plazo, haciendo énfasis en el manejo sustentable y el cambio de criterio tanto por parte de los productores, como de aquellos sectores con poder de decisión. Debe tenerse en cuenta que, en paisajes como los del SO bonaerense, las probabilidades de que se manifiesten los procesos de erosión de suelos son mucho mayores que en ecosistemas donde el suelo está completamente cubierto (paisajes de climas más húmedos), por tal motivo es importante remarcar que el mantenimiento

de los pastizales naturales puede ayudar a disminuir la degradación física de dichos suelos (Ambrosino et al., 2022).

CONSIDERACIONES FINALES

Los resultados obtenidos en este estudio permiten confirmar la hipótesis propuesta, destacando que: *La presión de uso antrópica sobre los ecosistemas estudiados en el SO de Buenos Aires condiciona el balance de las fracciones de COS*. Esto se verifica a partir de haber hallado en los suelos con especies nativas más CO asociado a la fracción más fina del suelo (L+a), y una mayor concentración y cantidad de CO lábil (F1+F2) y humificado (F3) en los sistemas con usos y manejos menos intervenidos (Pastizal N.+PR y Monte+PR). Esto podría deberse a que los sistemas con Pastizal N.+PR y Monte+PR no fueron sometidos a un cambio brusco en su cobertura, por lo tanto, habría mayor diversidad de especies vegetales que aportarían mayor cantidad de residuos al suelo con la consecuente acumulación y estabilización del COS, contribuyendo a mitigar la liberación de CO₂ a la atmósfera.

- El estudio de los cambios en las fracciones oxidables de CO y del COT permitieron detectar diferencias entre los principales usos y manejos productivos evaluados, lo cual indica el impacto diferencial de la aplicación de estas prácticas sobre los ecosistemas del SO de la provincia de Buenos Aires. Es posible utilizar estos indicadores para detectar variaciones en parámetros edáficos con importancia sobre la productividad del ambiente. La F2 (transición CO lábil-CO humificado/CO semi-humificado) resultó ser la fracción de CO más sensible al comparar los usos y manejos del suelo, y también a distinta profundidad de muestreo.

- El reemplazo de ecosistemas naturales por agroecosistemas provocaría una importante pérdida de COS, alterando de esta manera su funcionamiento natural con pérdida en su capacidad de resistencia y resiliencia a posibles procesos erosivos.

- La planificación de uso y manejo productivo de los suelos del SO de la provincia de Buenos Aires, requiere de un esfuerzo conjunto entre instituciones agrarias y aquellas vinculadas al cuidado ambiental para contribuir en la toma de decisiones estratégicas de los productores. La alta susceptibilidad a la erosión que caracteriza a los ambientes de esta región pone de manifiesto la necesidad de fomentar alternativas de uso y manejo conservacionistas y sustentables. El uso y manejo racional y sustentable de los sistemas naturales (pastizales naturales y montes arbustivo-graminosos) sería una alternativa viable para mantener el equilibrio ambiental y productivo esperado, ya

que los resultados de este estudio comprobaron un mejor funcionamiento de acumulación y estabilización de COS.

BIBLIOGRAFÍA

- Abraham E., Valle H.F.D., Roig F., Torres L., Ares J.O., Coronato F. and Godagnone R. 2009. Overview of the geography of the Monte Desert biome (Argentina). *Journal Arid Environments* 73(2): 144–153.
- Abraham E., Guevara J.C., Candia R.J. and Soria N.D. 2016. Dust storms, drought and desertification in the Southwest of Buenos Aires Province, Argentina. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias de Cuyo*. 48, 221–241.
- Abril A. and Bucher E.H. 2001. Overgrazing and soil carbon dynamics in the western Chaco of Argentina. *Applied Soil Ecology* 16 (2001) 243-249.
- Aguilera S. M. 2000. Importancia de la protección de la materia orgánica en suelos. Universidad de Chile. Casilla 233. Santiago, Chile.
- Ambrosino M. L., Torres Y. A., Lucero C. T., Lorda G. S., Ithurrart L. S., Martínez J. M., Armando L. V., Garayalde A. and Busso C. A. 2022. Impacts of shrub encroachment on soil quality in the native Monte rangelands of Southwestern Buenos Aires, Argentina. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1577176/v1>.
- Arturi M. F. 2006. Situación Ambiental en la Ecorregión Espinal: 241-246. En: A. Brown, U. Martínez Ortiz, M. Acerbi y J. Corcuera (Eds.). *La Situación Ambiental Argentina 2005*. Fundación Vida Silvestre Argentina, Buenos Aires. 587 pp.
- Aschkar G.M. 2022. Alteraciones físicas, químicas y biológicas en suelos afectados por desmonte en el noreste rionegrino. Contribución a la conservación de los suelos de regiones semiáridas. Tesis Doctoral, Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca, Argentina.
- Ayala Aragón O. R. y Almanza López M. V. 2021. Almacenamiento de carbono orgánico en suelos agrícolas de la zona intersalar potosino en diferentes tipos de uso. Universidad Autónoma Tomás Frías (UATF). Potosí, Bolivia. Proyecto PIA.ACC.UATF.65.
- Benavides Ballesteros H.O. y León Aristizábal G.E. 2007. Información técnica sobre Gases de Efecto Invernadero y el Cambio Climático. Nota técnica del IDEAM, IDEAM-METEO/008-2007. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM. Subdirección de Meteorología.

- Berhongaray G. and Álvarez R. 2019. Soil carbon sequestration of Mollisols and Oxisols under grassland and tree plantations in South America - A review, *Geoderma Regional*, <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2019.e00226>.
- Blake G.R. and Hartge K.H. 1986. Bulk density. In: A Klute (ed.) *Methods of soil analysis*, Part 1. 2nd ed. American Society of Agronomy, Madison, Agronomy 9.
- Bouyoucos G. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agron. J.*, vol. 54: 464-465.
- Burbano Orjuela H. 2018. El carbono orgánico y su rol frente al cambio climático. *Rev. Cienc. Agr.* 35(1): 82-96. Doi: <http://dx.doi.org/10.22267/rcia.183501.85>.
- Cabrera A.L. 1976. Regiones fitogeográficas argentinas. *Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería*. 2da. Edición Tomo II. ACME. Buenos Aires, Argentina.
- Castillo-Pacheco L. A., Bojórquez-Serrano J. I., Hernández-Jiménez A., y García-Paredes D. 2015. Contenidos de carbono orgánico en suelos bajo diferentes coberturas vegetales y de cultivo. Universidad Autónoma de Nayarit, Ciudad de la Cultura Amado Nervo, C.P. 63190, Tepic, Nayarit, México.
- Chan K.Y., Bowman A. and Oates A. 2001. Oxidizable organic carbon fractions and soil quality changes in an OxicPaleultalf under different pasture leys. *Soil Science*, 166, 61-67.
- Cotler H., Sotelo E., Dominguez J., Zorrilla M., Cortina S. y Quiñones L. 2007. La conservación de suelos: un asunto de interés público. *Gaceta Ecológica*, núm. 83, pp. 5-71 Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Distrito Federal, México.
- Crespo C., Wyngaard N., Sainz Rozas H., Studdert G., Barraco M., Gudelj V., Barbagelata P. and Barbieri P. 2021. Effect of the intensification of cropping sequences on soil organic carbon and its stratification ratio in contrasting environments. *Catena* 200: 105145. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105145>.
- Cueva-Rodríguez, A., Yépez, E. A., Garatuza-Payán, J., Watts, C. J., & Rodríguez, J. C. (2012). Diseño y uso de un sistema portátil para medir la respiración de suelo en ecosistemas. *Terra Latinoamericana*, 30(4), 327-336.
- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., González L., Tablada M. y Robledo C.W. 2013. *InfoStat*. Grupo InfoStat, FCA. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Duarte-Guardia S., Peri P.L., Amelung W., Sheil D., Laffan S.W., Bird M.I., Dieleman W., Pepper D.A., Zutta B., Jobbagy E., Silva L.C.R., Bonser S.P., Borchard N., Berhongaray G., Piñeiro G., Martínez M., Cowie A.L., and Ladd B. (2019). Better

estimates of soil carbon from geographical data: a revised global approach. *Mitig Adapt Strateg Glob Chang* 24:355–372. doi: 10.1007/s11027-018-9815-y

- Duarte-Guardia S., Peri P.L., Amelung W., Thomas E., Borchard N., Baldi G., Cowie A.L., and Ladd B. (2020). Biophysical and socioeconomic factors influencing soil carbon stocks: a global assessment. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 25(6), 1129-1148.

- Duval M.E., Galantini J.A., Iglesias J.O., Canelo S., Martínez J.M. and Wall L.G. 2013. Analysis of organic fractions as indicators of soil quality under natural and cultivated systems. *Soil & Tillage Research*, 131, 11–19.

- Duval M.E., De Sá Pereira E., Iglesias J.O. y Galantini J.A. 2014. Efecto de uso y manejo del suelo sobre las fracciones de carbono orgánico en un argiudol. *Ciencia del Suelo* vol.32 no.1, Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

- Duval M.E., Galantini J.A., Martínez J.M., López F.M. and Wall L.G. 2016. Sensitivity of different soil quality indicators to assess sustainable land management: Influence of site features and seasonality. *Soil & Tillage Research*, 159, 9–22.

- FAO. 2009. *Glosario de agricultura orgánica*. Plataforma de conocimientos sobre agricultura familiar.

- FAO 2020. *Re-carbonización de los suelos del mundo. Una herramienta para implementar el Programa de Trabajo Conjunto de Koronivia*. FAO. Roma, Italia.

- Feller C., Compagnone C., Goulet F. and Sigwalt A. 2015. In. *Soil carbon: science, management and policy for multiple benefits*. ISBN: 9781780645322.

- Fernández R., Lucas M. M. R., Painemilla L. A., y Quiroga A. 2021. Efecto de las pasturas perennes en la estructura de molisoles de la región semiárida pampeana. *Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo (AACS)*. *Cienc. Suelo (Argentina)* 39 (2): 285-306, 2021.

- Galantini J.A. 2002. Contenido y calidad de las fracciones orgánicas del suelo bajo rotaciones con trigo en la región semiárida pampeana. *INTA, Argentina. RIA*, 30, 125–146.

- Galantini J.A. y Suñer L. 2008. Las fracciones orgánicas del suelo: análisis en los suelos de la Argentina. *Agriscientia* 45: 41-55.

- Giuffré L. 2008. *Agroecosistemas: Impacto Ambiental y Sustentabilidad*. 1ª Edición. Ed. Fac. de Agronomía, UBA. ISBN 978-950-29-1061-1. 493 pp.

- Giuffré L., Marbran L., Romaniuk L., Vespasiano C., Sammartino F. y Arata L. 2013. Diagnóstico edafológico para la planificación de huertas orgánicas familiares en suelos periurbanos. *Revista FAVE-Ciencias Agrarias* 12 (1-2).
- Godagnone R.E. y Bran D.E. (Eds). 2009. *Inventario Integrado de los Recursos Naturales de la Provincia de Río Negro*. Buenos Aires: INTA.
- González, G.M.; Luna, M.A. & Hernández, H.J. 2022. *Agropiro en Patagones. Evaluación cuantitativa y cualitativa en cuatro sitios*". Informe técnico N.º 77 INTA. ISSN 0328-3399.
- Grüneberg E., Schöning I., Kalko E.K.V. and Weisser W.W. 2010. Regional organic carbon stock variability: A comparison between depth increments and soil horizons. *Geoderma* 155 (2010) 426-433.
- IPCC, 2019. Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza. ISBN 978-92-9169-351-1.
- IPCC, 2021. Comunicado de Prensa del IPCC. 9 de agosto de 2021.
- Jimenez Madrid A.M., Reyes Sandoval J.T. y Silveira M.L. 2021. *Secuestro y distribución del carbono orgánico bajo diferentes sistemas de manejo de pasturas*. Universidad de Florida. IFAS Extensión.
- Jobbágy, E.G., Jackson, R.B., 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecol. App.* 10 (2), 423–436.
- Kent F. S., Beneitez A. H., Blain G., Breit M. A., Cabo S. E., Fontana L. M. C., Lehr F. J., Leonhardt D. A., Ortellado M. R., Paredes S. S., Poey M. S. y Ruiz M. A. 2019. *Forrajeras cultivadas anuales y perennes más difundidas en la provincia de La Pampa*. INTA Centro Regional La Pampa-San Luis. EEA Anguil.
- Krölpf A.I., Deregibus V.A. y Cecchi G.A. 2007. Disturbios en una estepa arbustiva del Monte: cambios en la vegetación. *Ecología Austral*, 17, 257–268.
- Laban P., Metternicht G. y Davies J. 2019. *Biodiversidad y carbono orgánico en suelos: como mantener vivas las tierras áridas*. UICN-AFD.
- Lal R. 2007. Anthropogenic influences on world soils and implications to global food security. *Adv Agron* 93:69-93.

- Lal R., Smith P., Jungkunst H.F., Mitsch W.J., Lehmann J., Ramachandran Nair P.K., McBratney A.B., De Moraes Sá J.C., Schneider J., Zinn Y.L., Skorupa A.L.A., Zhang H., Minasny B., Srinivasrao C. and Ravindranath N.H. 2018. The carbon sequestration potential of terrestrial ecosystems. *Journal of Soil and Water Conservation* 73(6):145A-152A.
- Lefèvre C., Rekik F., Alcántara V. y Wiese L. 2017. Carbono orgánico del suelo, el potencial oculto. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Alianza Mundial por el Suelo.
- Manuel-Navarrete D., Gallopín G., Blanco M., Díaz-Zorita M., Ferraro D., Herzer H., Littera P., Morello J., Murmis M.R., Pengue W., Piñeiro M., Podestá G., Satorre E.H., Torrent M., Torres F., Viglizzo E., Caputo M.G. y Celis A. 2005. Análisis sistémico de la agriculturización en la pampa húmeda argentina y sus consecuencias en regiones extra-pampeanas: sostenibilidad, brechas de conocimiento e integración de políticas. División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos. ONU-CEPAL. Santiago de Chile.
- Martínez, E.; Fuentes J.; y Acevedo, E. 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal* 8(1), 68-96. <https://scielo.conicyt.cl/pdf/rcsuelo/v8n1/art06.pdf>
- Mateucci S.D. y Colma A. 1982. Metodología para el estudio de la vegetación. Monografía N° 22, Serie Biología. Secretaría General de la OEA. Washington D.C. 168 pp.
- Panchal P., Preece C., Peñuelas J. y Giral J. 2022. Soil carbon sequestration by root exudates. *CelPress. Trends in Plant Science. Special issue: Climate change and sustainability II*.
- Peri P.L., Lasagno R.G., Martínez Pastur G., Atkinson R., Thomas E. and Ladd B. 2019. Soil carbon is a useful surrogate for conservation planning in development nations. *Scientific Reports* 9, Article number 3905.
- Pezzola A. y Winschel C. 2004. Estudio multitemporal de la degradación del monte nativo en el partido de Patagones- Buenos Aires. EEA INTA Hilario Ascasubi.
- Quiroga A., Oderiz A., Uhaldegaray M., Álvarez C., Scherger E., Fernández R. y Frasier I. 2016. Influencia del uso de suelos sobre indicadores físicos de compactación. *SEMIÁRIDA Revista de la Facultad de Agronomía UNLPam Vol 26 (I):* 21-28.

- Rodríguez S., Baeza M.C., García G.V., Domínguez G.F., Clemente N.L. and Studdert G.A. 2022. Permanganate Oxidizable Carbon, New Soil Health Indicator for Mollisols of the Southeastern Argentinean Pampas? *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 2022, vol. 53, no. 16, 2029-2044. <https://doi.org/10.1080/00103624.2022.2070631>.
- Roldán M.F. 2012. Distribución del carbono orgánico particulado por tamaño de agregados bajo distintos sistemas de labranza. Programa de postgrado en Ciencias Agrarias. Facultad de Ciencias Agrarias. UNMdP. Balcarce, Argentina. 12 de marzo de 2012.
- SAGPyA. 2007. Determinación de materia orgánica en suelos. Pp 10. Esquema A2 IRAM - SAGPyA. 29571-2:2008.
- Schiavi M. 2019. Estudios sobre fracciones orgánicas del suelo y la aplicación de índices de calidad en tierras de uso ganadero. Trabajo final de grado. Universidad Nacional de Río Negro. <https://rid.unrn.edu.ar/jspui/handle/20.500.12049/3142>.
- Shrestha G. and Stahl P. 2008. Carbon accumulation and storage in semi-arid sagebrush steppe: Effects on long-term grazing exclusion. Department of Renewable Resources, University of Wyoming, Laramie, WY 82072, USA. *Agriculture Ecosystems and Environment* 125 (2008) 173-181.
- Taboada M. 2021. Carbono: el elemento que determina la sustentabilidad del agro. *Revista RIA-INTA*, ISSN 1669-2314, ISSN 0325-8718. <http://ria.inta.gov.ar/>.
- Tadiello T., Perego A., Valkama E., Schillaci C. and Acutis M. 2022. Computation of total soil organic carbon stock and its standard deviation from layered soils. *Methods X* (2022) 1016:62. www.elsevier.com/locate/mex.
- Tate K.R. and Theng B.K.G. 2014. Climate Change-An underfoot perspective? In *The Soil Underfoot*, eds.
- Torres Robles, S. S., Arturi, M. F., Contreras, C., Peter, G., y Zeberio J. M. 2015. Variaciones geográficas de la estructura y composición de la vegetación leñosa en el límite entre el espinal y el monte en el Noreste de la Patagonia (Argentina). *vegetación leñosa* ISSN 0373-580 X. *Bol. Soc. Argent. Bot.* 50 (2): 209-215. 2015.
- USDA. 2013. Biblioteca Nacional de Agricultura de los Estados Unidos de América (NALT-USDA).

- Ussiri D. A. N., Lal R., and Jacinthe P. A. 2006. Soil properties and carbon sequestration of afforested pasture in reclaimed Minesoils of Ohio. *Soil Science Society of America Journal*, 70, 1797–1806.
- Van Andel J., Grootjans A.P. and Aronson J. 2012. *Restoration Ecology: The New Frontier*, second edition, chapter 2 (pp 9-22).
- Vázquez M. 2008. Incidencia de la vegetación sobre aspectos cuantitativos y cualitativos de la materia orgánica del suelo. En: *Estudio de las fracciones orgánicas en suelos de la Argentina / edición literaria a cargo de Juan Alberto Galantini*. - 1a ed. - Bahía Blanca : Univ. Nacional del Sur - Ediuns, 2008. 309 p. ; 21x15 cm. ISBN 978-987-655-009-3. pp. 263-292.
- Viglizzo E.F. y Jobbágy E. 2010. Expansión de la frontera agropecuaria en Argentina y su impacto ecológico-ambiental. INTA-TAI. ISBN N° 978-987-1623-83-9.
- Walkley A. and Black I. 1934. An examination of the method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37, 29-38.
- Wilson G.M. 2017. *Manual de indicadores de calidad del suelo para las ecorregiones de Argentina*. INTA Ediciones, Colección Recursos. 1a edición. Entre Ríos.
- Xu C., McDowell N.G., Fisher R.A., Wei L., Sevanto S., Christoffersen B.O., Weng E., and Middleton R.S. 2019. Increasing impacts of extreme droughts on vegetation productivity under climate change. *Nat. Clim. Change*, 9, no. 12, 948-953, doi:10.1038/s41558-019-0630-6.
- Zeberio J.M. 2018. *Estado de conservación y posibilidades de rehabilitación en ecosistemas semiáridos: el caso del Monte en el Noroeste de Río Negro*. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Naturales y Museo. Universidad Nacional de La Plata. Argentina.