

TRABAJO DE INTENSIFICACIÓN

IMPACTO DEL RALEO MECÁNICO SOBRE LA CALIDAD DEL SUELO EN UN ECOSISTEMA DE CALDENAL PAMPEANO



Joaquín Kraft

Tutora: Dra. Yanina A. Torres

Consejeros: Dr. Juan Manuel Martínez

Dr. Matías E. Duval

Dpto. de Agronomía, Universidad Nacional del Sur

Junio de 2025



Índice

Prólogo	2
Agradecimientos	3
Resumen	4
Introducción	6
Hipótesis	9
Objetivo	9
Materiales y métodos	10
Ubicación geográfica y descripción general	10
Manejo y diseño experimental	12
Determinación de materia orgánica total y particulada	13
Índices funcionales	18
Análisis estadístico	19
Resultados y Discusión	20
Fracciones orgánicas	20
Índices funcionales	24
Conclusiones	26
Bibliografía	27

Prólogo

La presente Tesina es presentada como parte de los requisitos para optar al grado académico de Ingeniero Agrónomo en la Universidad Nacional del Sur. El trabajo fue realizado bajo la dirección de la Dra. Yanina A. Torres y la codirección del Dr. Juan Manuel Martínez y del Dr. Matías E. Duval, a quienes agradezco profundamente por su constante acompañamiento, orientación y compromiso a lo largo del desarrollo de este proyecto.

Esta investigación representa no solo el cierre de una etapa académica, sino también el resultado de un proceso de aprendizaje, dedicación y crecimiento personal. A través de este trabajo, se buscó contribuir al conocimiento sobre la dinámica del ecosistema del Caldenal pampeano y aportar herramientas útiles para su manejo y conservación.

Bahía Blanca, junio de 2025



Joaquín Kraft

Agradecimientos

Agradezco en primer lugar a mis directores, Dra. Yanina A. Torres, Dr. Juan Manuel Martínez y Dr. Matías E. Duval, por su guía, paciencia y constante apoyo durante todo el proceso.

A la Universidad Nacional del Sur, por ofrecer todos sus recursos y herramientas necesarias para que pueda crecer personal y académicamente. A mis docentes y compañeros de la carrera, por las enseñanzas compartidas y los buenos momentos vividos a lo largo de estos años.

A mi familia, especialmente a mi papá, Julio César Kraft, a mi mamá, Ana María Ostertag y a mi tía, María Susana Ostertag, por hacer que no me falte nada durante toda mi carrera como estudiante, por su amor incondicional, por estar siempre presentes y por creer en mí incluso cuando yo dudaba.

A mi hermano, Juan Ignacio Kraft, mis amigos y compañeros, por acompañarme en este camino, por las risas, las charlas y el ánimo en los momentos clave.

Y a todas las personas que, de una forma u otra, fueron parte de este recorrido:
GRACIAS.

Resumen

El bosque de Caldén de la provincia de La Pampa ha sufrido un progresivo deterioro ecológico por el proceso de arbustización, caracterizado por el aumento en la cobertura y densidad de especies leñosas. El raleo mecánico ha demostrado ser una práctica efectiva para revertirla contribuyendo a la recuperación de la estructura y funcionalidad del ambiente, incrementando el aporte de material orgánico, lo que mejoraría la calidad del suelo (CS) en el corto plazo. El objetivo fue evaluar el efecto del raleo mecánico mediante chipeado sobre la dinámica de las fracciones orgánicas del suelo, considerando su rol como indicador sensible de la calidad edáfica, en distintas unidades de vegetación dominante dentro del Caldenal pampeano. En 2019, un sector de la Reserva Provincial Parque Luro, fue intervenido mediante la técnica de raleo mecánico con trituradora forestal (Rmec) y otro se mantuvo sin intervención (Control-Rmec). En otoño y primavera de 2023, se tomaron muestras compuestas de suelo (0-15 cm; n=5) en parches con distinta vegetación dominante: arbustos (A), arbustos y árboles (AA) y vegetación graminosa-herbácea (G). En cada muestra se determinó la materia orgánica total (MOT) y se realizó el fraccionamiento físico del suelo para aislar la fracción gruesa ($>53 \mu\text{m}$), la cual contiene la MO particulada (MOP). Ambas fracciones fueron cuantificadas mediante combustión seca por calcinación. Adicionalmente se calcularon diferentes índices funcionales. La MOT fue mayor en otoño y en los parches AA, intermedia en A y menor en G. Por su parte, la MOP fue mayor en primavera, observándose también mayores valores en AA y menores en G. El raleo mecánico no tuvo efecto sobre estas variables. La mayor concentración de MOT observada en otoño sería consecuencia de la caída de hojas de las especies caducifolias, lo que a su vez estimula los procesos de descomposición en el suelo, llegando a detectarse una mayor MOP en primavera. A su vez, la composición y estructura de la vegetación de cada parche serían determinantes para explicar las diferencias en la dinámica de la MO del suelo. La presencia de árboles y arbustos, en particular, tiene un efecto significativo en el aporte de broza, lo que influye directamente en los procesos de descomposición. Solo se observaron efectos positivos del raleo sobre los índices funcionales del suelo, con mayores valores de MOP/MOT, COP/NOP e IMO bajo tratamiento, especialmente en primavera. Además, la estacionalidad influyó significativamente en la dinámica de las fracciones orgánicas, reflejando una mayor actividad microbiana y transformación de la materia orgánica en dicha estación. Los resultados obtenidos subrayan la importancia de la presencia de especies vegetales de diferentes grupos funcionales en la regulación de las fracciones

orgánicas del suelo en el Caldenal. Esto contribuye a mantener su calidad, destacando la necesidad de futuras investigaciones para comprender los procesos de descomposición y la actividad microbiana asociados.

Introducción

Los pastizales naturales representan una de las formaciones vegetales más ampliamente distribuidas a nivel global, cubriendo aproximadamente una quinta parte de la superficie del planeta (Estell et al., 2012). En aquellos ubicados en regiones áridas y semiáridas, es común encontrar árboles y arbustos solitarios, con una densidad variable, dispersos entre la vegetación herbácea predominante (van Auken, 2000).

En los últimos 150 años, se ha observado un aumento en la cobertura de especies leñosas a escala global (D'Odorico et al., 2019). Este fenómeno, conocido como “arbustización”, se caracteriza por el incremento en la densidad, cobertura y biomasa de especies con hábito de crecimiento arbustivo o semi-arbustivo en ecosistemas donde predominan las herbáceas (Haubensak y Parker, 2004; van Auken, 2009). Generalmente, estas especies leñosas son nativas y formaban parte de la comunidad original, aunque en densidades bajas o restringidas a ciertas áreas (van Auken, 2000; Dussart et al., 2011).

Una combinación de factores ambientales —como sequías, vientos intensos y precipitaciones irregulares— junto con intervenciones antrópicas —tales como desmontes, laboreo intensivo, introducción de especies exóticas y sobrepastoreo— han contribuido a alterar el equilibrio natural de estos ecosistemas, promoviendo la expansión de árboles y arbustos en pastizales y sabanas a nivel mundial (MEA, 2005; D'Odorico et al., 2019). A escala regional, esta problemática también se manifiesta de manera significativa. En Argentina, aproximadamente el 75% del territorio corresponde a regiones áridas y semiáridas. A su vez, alrededor de dos tercios de estas áreas se encuentran vinculadas a ecosistemas conformados por pastizales naturales (Fernández y Busso, 1999).

El Distrito del Caldén (también conocido como Caldenal), perteneciente a la Provincia Fitogeográfica del Espinal (Cabrera, 1976), se localiza en el centro y sureste de la provincia de San Luis, el suroeste de Córdoba, el centro de La Pampa y el sur de la provincia de Buenos Aires (Anderson et al., 1970). La vegetación característica de este distrito corresponde a un bosque abierto, en el cual la especie dominante es *Neltuma caldenia* Burkart C.E. Hughes & G.P. Lewis (caldén). El sotobosque está compuesto principalmente por pastos bajos de crecimiento invernal y por gramíneas megatérmicas de porte intermedio, acompañado por un estrato arbustivo de densidad variable, integrado por especies como *Condalia microphylla* Cav. y *Schinus* spp. (Cano et al., 1980; Gallego y Distel, 2004; Estelrich et al., 2005).

Las acciones antrópicas, entre las que se destacan la ganadería extensiva, la persistencia de una elevada presión de pastoreo y los efectos del cambio climático, están vinculadas a una acelerada pérdida de la cobertura vegetal, procesos de erosión del suelo y el reemplazo de especies forrajeras de alto valor por otras menos palatables o no consumidas por el ganado (Schlesinger et al., 1990; Archer y Smeins, 1991; Morici et al., 2009).

En la provincia de La Pampa, los pastizales naturales del bosque de caldén también se encuentran afectados por el proceso de arbustización. En el contexto de la Ley Nacional N.º 26.331 (Presupuestos Mínimos de Protección Ambiental de los Bosques Nativos) y la Ley Provincial N.º 2.624 (Ordenamiento Territorial de los Bosques de La Pampa), se están implementando diversas prácticas de manejo orientadas a la restauración de la vegetación nativa y a la mejora de la calidad forrajera de los pastizales.

Entre las tantas estrategias disponibles para disminuir la cobertura de especies leñosas en ambientes afectados por la arbustización, se encuentra el control mecánico. Algunas técnicas consisten en el uso de maquinaria pesada, como el rolo, que reduce la cobertura de arbustos con diámetros menores a 12 cm, preservando los ejemplares arbóreos (Adema, 2006). Otras prácticas incluyen el raleo selectivo, llevado a cabo mediante hacha o motosierra por personal capacitado, o mediante el empleo de máquinas autopropulsadas equipadas con dispositivos de corte, como sierras giratorias o cabezales cosechadores (Leinonen, 2007; Nghikembua et al., 2021). Estas intervenciones permiten abrir el sistema, incrementando la entrada de luz y agua, promoviendo la incorporación de materia orgánica al suelo y favoreciendo el desarrollo de biomasa herbácea. Esto resulta en una mayor oferta forrajera y mejor accesibilidad para el ganado (Aguilera y Steinaker, 2001; Adema et al., 2004; Peláez et al., 2021). Además, esta práctica es considerada una medida conservacionista de la biodiversidad en ambientes arbustizados, dado que reduce la cobertura de arbustos sin afectar significativamente la densidad total de individuos (Mora y Rosales Mercado, 2012; Peláez et al., 2021).

La implementación de tratamientos mecánicos también genera modificaciones en la cobertura vegetal y en las condiciones microclimáticas, principalmente por la acumulación de grandes volúmenes de residuos que se incorporan al suelo (Adema, 2006). La adición de materia orgánica fresca contribuye a satisfacer las demandas nutricionales de la sucesión secundaria posterior al disturbio (Anriquez et al., 2005). Estas prácticas han demostrado promover la dominancia de especies deseables (Kunst et al., 2003; Adema et al., 2004). Larroulet et al. (2020) observaron incrementos en los niveles

de carbono orgánico total, respiración edáfica y coeficiente metabólico luego de aplicar tratamientos mecánicos, probablemente como consecuencia de una mayor actividad microbiana asociada a la descomposición de los residuos vegetales incorporados al suelo.

En este contexto, la evaluación de la calidad del suelo (CS) cobra relevancia, entendida como la capacidad del suelo para mantener su productividad biológica (Doran y Parkin, 1994). La conservación de la materia orgánica (MO) edáfica es clave para la sustentabilidad de los sistemas productivos, especialmente en regiones semiáridas. Dado que la MO no es homogénea, en los últimos años ha cobrado relevancia el análisis de sus distintas fracciones, con especial énfasis en la materia orgánica particulada (MOP), también denominada lábil o joven, que corresponde al material orgánico recientemente incorporado al suelo, en contraste con la MO asociada a la fracción mineral, más estable o humificada. Debido a que los cambios en el contenido total de MO son difíciles de detectar en el corto plazo (1–5 años), el monitoreo de fracciones más dinámicas como la MOP puede reflejar con mayor rapidez los efectos de las prácticas de manejo sobre la provisión de carbono orgánico y los procesos de mineralización (Galantini, 2008). Por esta razón, la MOP es considerada un indicador sensible e importante de la calidad del suelo (Carter, 2002). Teniendo en cuenta que los indicadores de CS más sensibles para detectar los cambios debido al manejo, también pueden responder a las variaciones meteorológicas, edáficas, topográficas y/o estacionales, puede resultar más adecuado el empleo de índices vinculados al funcionamiento del sistema, *i.e.*, índices funcionales, ya que los mismos son considerados de crucial importancia en la determinación del estado de degradación o de reconversión de los suelos (Zornoza et al., 2008).

Hipótesis

En base a los antecedentes presentados se plantea la siguiente hipótesis de trabajo: la historia de uso y las prácticas de manejo aplicadas en el Caldenal pampeano, particularmente el raleo mecánico mediante chipeado, generan modificaciones en la CS, promoviendo un incremento en las fracciones orgánicas lábiles en comparación con sitios sin intervención.

Objetivo

El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto del raleo mecánico mediante chipeado sobre diferentes parámetros vinculados a la dinámica de la MO edáfica, considerando su rol como indicador sensible de la CS, en distintas unidades de vegetación dominante dentro del bosque de caldén (Caldenal pampeano). Esta evaluación permitió aportar información relevante para la comprensión del impacto de las prácticas de manejo sobre el suelo en ecosistemas semiáridos y contribuir al desarrollo de estrategias de conservación y restauración sustentables.

Materiales y métodos

Ubicación geográfica y descripción general

El estudio se realizó durante el año 2023 en la Reserva Provincial Parque Luro (36°54'49"S; 64°15'41"O), ubicada a 36 km al sur de la ciudad de Santa Rosa, en el valle Chapalcó, provincia de La Pampa (Figura 1). Esta reserva, con una superficie de 7.608 hectáreas, forma parte de la Provincia Fitogeográfica del Espinal, específicamente del Distrito del Caldén (Caldenal; Cabrera, 1976), y representa actualmente la mayor extensión de bosque continuo dentro de este distrito (Duval et al., 2019).

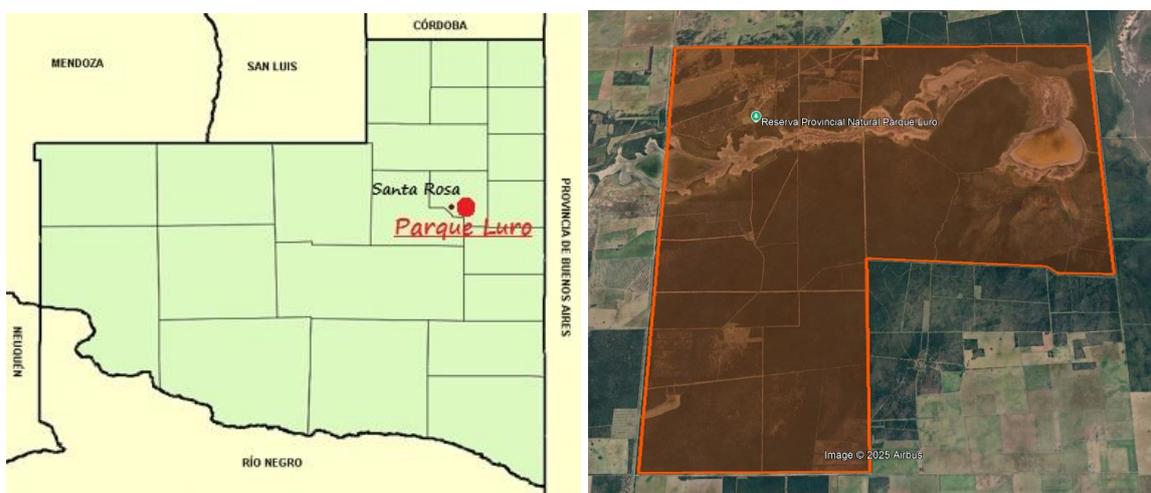


Figura 1. De izquierda a derecha. Ubicación de la Reserva Natural Parque Luro dentro de la Provincia de La Pampa y límites de la reserva.

Los suelos del área son franco arenosos, finos y profundos, con una densidad aparente de $0,91 \pm 0,02 \text{ g cm}^{-3}$ (Cano et al., 1980). El clima de la región se clasifica como templado semiárido, con una temperatura media de 7,7 °C en invierno y 22,8 °C en verano. La precipitación media anual es de 676 mm, concentrándose principalmente en los meses de octubre y noviembre (Duval et al., 2019). Durante el año de muestreo (2023), la precipitación total acumulada fue de 566 mm. En la Figura 2 se presentan los registros mensuales correspondientes.

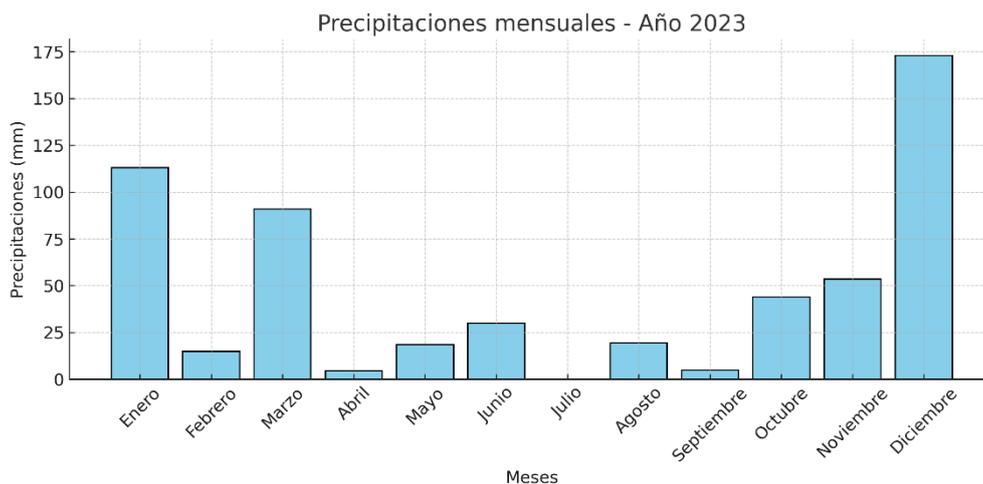


Figura 2. Precipitaciones mensuales registradas durante el año 2023 en la Reserva Provincial Parque Luro, La Pampa.

El área de estudio está dominada por un bosque caducifolio de *Neltuma caldenia* (Figura 3). Esta especie suele encontrarse asociada a otras leñosas como *Neltuma flexuosa* (DC.) C.E. Hughes & G.P. Lewis, *Geoffroea decorticans* (Gill ex Hook. & Arn.) Burkart y *Jodina rhombifolia* (Hook. & Arn.) (Informe Regional Espinal, 2006).



Figura 3. Ejemplar de *Neltuma caldenia*.

El estrato arbustivo está constituido principalmente por *Schinus fasciculata* (Griseb.) I.M. Johnst, *Condalia microphylla*, *Chuquiraga erinacea* D. Don, *Lycium chilense* Miers ex Bertero, *Neltuma flexuosa* var. *depressa* (F.A. Roig) C.E. Hughes & G.P. Lewis, *Lycium gilliesianum* Miers y *Aloysia gratissima* (Gillies & Hook. ex Hook.).

El estrato herbáceo-graminoso está compuesto por especies forrajeras como *Piptochaetium napostaense* (Speg.) Hackel, *Poa ligularis* Nees ex Steud, *Nassella tenuis* (Phil.) Barkworth, y especies no forrajeras como *Nassella tenuissima* (Trin.) Barkworth, *Amelichloa brachychaeta* (Godr.) Arriaga & Barkworth, *A. ambigua* (Speg.) Arriaga & Barkworth, *Jarava ichu* Ruiz & Pav. y *N. trichotoma* (Nees) Hack. ex Arechav (INTA, 1980).

La introducción de la ganadería y las actividades forestales, sumadas a factores naturales como los incendios rurales y las condiciones edafoclimáticas del área, han modificado la composición florística del bosque original. Estas alteraciones condujeron al desarrollo de una estructura de bosque secundario, con características de fachinal impenetrable y una elevada densidad de especies leñosas (Peinetti et al., 1993; Estelrich et al., 1997).

Manejo y diseño experimental

En el marco de la Ley Nacional N.º 26.331 y la Ley Provincial de Bosques N.º 2.624, la Subsecretaría de Ambiente del Gobierno de La Pampa lleva adelante diversas intervenciones orientadas a la restauración y conservación del bosque nativo dentro de la Reserva. Estas acciones se implementan considerando las distintas fisonomías presentes en el Caldenal, y se enfocan principalmente en la reducción del material combustible y la apertura del sistema, con el objetivo de favorecer la recuperación y conservación del estrato graminoso-herbáceo.

Dentro de la Reserva se seleccionaron dos sectores de bosque colindantes de 5 hectáreas cada uno. Uno de estos sectores fue intervenido en el año 2019 mediante la técnica de raleo mecánico con trituradora forestal (Rmec). La misma consta de un cabezal triturador, de 2 m de ancho, montado en una minicargadora Bobcat 770t de 3,6 m de largo y 2 m de ancho y un radio de giro de 2,24 m. Esta maquinaria, denominada “chipeadora”, ejerce una presión sobre el suelo de 30 KPa. El pasaje de la maquinaria, dejó en pie individuos arbóreos con un diámetro de tronco a la altura del pecho (DAP) superior a 10 cm. Mientras que el sector vecino se mantuvo sin intervención como control (Control-Rmec).

En otoño y primavera de 2023, se tomaron con un barreno, muestras compuestas de suelo (0-15 cm; n=5) en parches con distinta vegetación dominante: arbustos (A), arbustos y árboles (AA) y vegetación gramínea-herbácea (G) (Figura 4). En cada muestra se realizaron las evaluaciones de la MO total (MOT) y particulada (MOP).

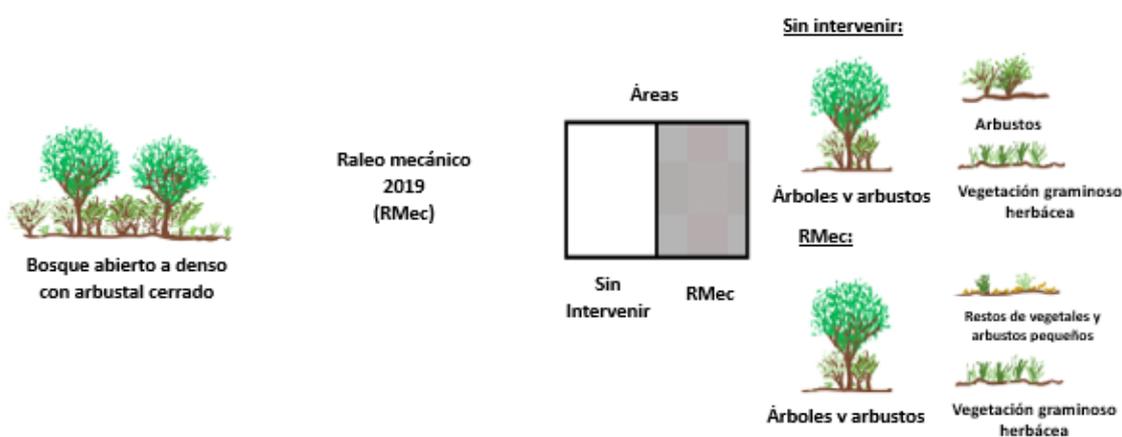


Figura 4. Esquema de la fisonomía de bosque estudiada, manejos aplicados y parches de vegetación. RMec: Raleo mecánico.

Determinación de materia orgánica total y particulada

Las determinaciones de MOT y MOP se realizaron en laboratorio utilizando muestras secadas al aire y tamizadas (<2 mm). En cada muestra, la MOT se determinó mediante el método de calcinación por ignición (Martínez et al., 2018), el cual consiste en la combustión seca de la muestra a 550 °C durante 4 horas, evaluando la pérdida de peso como estimación del contenido de MO. Es importante remarcar que previamente a la determinación por calcinación se elimina el contenido de agua higroscópica de las muestras mediante su secado en estufa a 105 °C durante 24-48 horas.

En cada muestra se llevó a cabo además el fraccionamiento físico con el fin de aislar la fracción gruesa (>53 µm), compuesta por arenas y materia orgánica particulada (MOP), la cual representa la porción más joven y lábil del carbono orgánico del suelo.

Fraccionamiento físico por tamaño de partícula

El fraccionamiento físico del suelo se realizó a través del método de tamizado húmedo (Duval et al., 2013). Para cada muestra se tomaron 30 g de suelo seco al aire, los cuales fueron transferidos a frascos previamente identificados (Figura 5). Se añadieron 10 perlas de vidrio por frasco con el objetivo de facilitar la ruptura mecánica de los agregados durante el mezclado y agitación. Luego se agregaron 100 ml de agua destilada dejando aproximadamente un volumen de aire dentro del frasco del 25%, para favorecer el golpeteo y la ruptura de agregados (Figura 6).



Figura 5. Frasco con 30 g de suelo identificado con número de muestra.



Figura 6. Frascos rotulados listos para agitar durante 18 h.

Las muestras fueron colocadas en un agitador rotatorio y sometidas a agitación continua durante 18 horas (Figura 7). Una vez finalizado este proceso, se procedió al tamizado en húmedo de las muestras, utilizando un tamiz con una abertura de malla de 53 μm . La muestra se vertió cuidadosamente sobre el tamiz (Figura 8) y se lavó con agua hasta que el efluente se volvió transparente, lo que indicó la completa eliminación de la fracción fina (<53 μm). La fracción retenida, correspondiente a las arenas y la MOP, fue transferida a cápsulas de aluminio (Figura 9). Estas se colocaron sobre una plancha calefactora para evaporar el exceso de agua y luego se trasladaron a una estufa a 105 °C durante 24 horas. Una vez secas, se retiraron las perlas de vidrio y se limpió cuidadosamente el contenido de cada cápsula con un pincel. A continuación, se pesó el material retenido en el tamiz para determinar el contenido de fracción gruesa (FG) de cada muestra (Figura 10).



Figura 7. Agitador rotatorio.



Figura 8. Tamizado húmedo.



Figura 9. Muestra tamizada correspondiente a la fracción gruesa (arenas + MOP).



Figura 10. Muestra seca a estufa de la fracción gruesa ($>53 \mu\text{m}$).

El material seco fue homogeneizado en un mortero y conservado en frascos rotulados con el número correspondiente a cada muestra (Figura 11).



Figura 11. Homogeneizado de la muestra luego del tamizado en húmedo.

Para la determinación del contenido de MO, se utilizó nuevamente el método de pérdida por ignición (Martínez et al., 2018). Se pesaron 5 g de muestra en una balanza de precisión en crisoles previamente identificados (Figura 12), los cuales se llevaron a mufla a $550 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 4 horas (Figura 13). Una vez finalizado el proceso, se registró la pérdida de peso como estimación del contenido de materia orgánica presente (Figura 14). Luego,

se estimó la fracción fina del suelo (limo + arcilla, valores promedio 399 g kg^{-1}) descontando al % de FG la MOP presente en esa fracción, obteniendo las arenas; y finalmente descontándolo del total.



Figura 12. Pesaje de crisoles rotulados con 5 g de muestra homogeneizada.

Figura 13. Crisoles en mufla.



Figura 14. Muestras antes (izquierda) y después (derecha) del tratamiento en mufla a $550 \text{ }^{\circ}\text{C}$, mostrando el cambio de color asociado a la pérdida de materia orgánica.

Índices funcionales

Adicionalmente, se evaluó el efecto de las prácticas de manejo del suelo sobre la calidad de la MO mediante los siguientes índices: la relación MOP/MOT (Galantini et al., 2004), como indicador de la estabilidad de la MO; la relación C/N, como estimador de su grado de descomposición; y la relación COP/NOP, que representa la calidad de su fracción más lábil. La construcción de estos índices resulta del cociente entre los indicadores edáficos pertinentes. Los datos de N empleados en algunos de estos índices provinieron del proyecto “Calidad del suelo en áreas con diferentes historias de manejo en el Caldenal: Una mirada desde la funcionalidad y estructura de las comunidades microbianas” (PGI UNS 24/ZA20). A continuación, se explica el significado de cada índice generado dentro del funcionamiento del suelo:

Índice MOP/MOT:

Las variaciones en la proporción de MOP, respecto de la MOT, permiten inferir acerca del enriquecimiento o pérdida de MO en suelos sometidos a diferentes manejos. Así valores bajos del índice MOP/MOT, indicarían condiciones muy favorables para la transformación del material orgánico que ingresa al suelo (Galantini, 2008).

Índice C/N:

Expresa la calidad del componente orgánico del suelo, y la capacidad del suelo para almacenar y reciclar nutrientes desde la MO. En ambientes de bosque, los valores de la relación C/N oscilan entre 16 y 44 en el horizonte orgánico del suelo forestal y entre 10 y 32 en el horizonte mineral superficial (Cools et al., 2014).

Índice COP/NOP:

Expresa la calidad de las fracciones orgánicas más lábiles, lo que podría indicar la posibilidad de mineralizar o inmovilizar nutrientes a partir de este material orgánico.

Índice IMO:

Expresa la susceptibilidad del suelo a la degradación, siendo un indicador más sensible que la MO con respecto al estado del suelo. Este índice deriva del cociente entre el nivel de MO y el % de la fracción limo + arcilla. Se recomienda su uso cuando los suelos analizados difieren en su granulometría (Quiroga et al., 2006). De esta forma, valores de IMO menores a cinco, prueban la existencia de problemas en el manejo del suelo debido a que señalan la existencia de un bajo contenido de MO (Vankeirsbilck, 2014).

Análisis estadístico

Se empleó un diseño experimental completamente aleatorizado, con réplicas balanceadas ($n = 5$). Los datos fueron sometidos a un análisis de varianza (ANOVA) triple para parcelas divididas en el tiempo, considerando como factores principales el tipo de manejo (con intervención y sin intervención), el tipo de parche (AA; A y G) y la época de muestreo (otoño y primavera) para los indicadores e índices de CS. En caso de interacción significativa se procedió a evaluar los factores por separado. La comparación entre medias se realizó mediante la prueba de diferencias mínimas significativas de Fisher (LSD), utilizando un nivel de significancia del 5%. El análisis de los resultados se llevó a cabo utilizando el software INFOSTAT (Di Rienzo et al., 2020).

Resultados y Discusión

Fracciones orgánicas

En general, no se observaron interacciones significativas en el ANOVA triple para las variables materia orgánica total (MOT) y materia orgánica particulada (MOP). Tampoco se detectaron diferencias significativas debido al tratamiento aplicado en 2019. Estos resultados pueden deberse a que la intensidad del raleo mecánico implementado no fue suficiente para inducir cambios en el sistema o a que los efectos generados fueron de corta duración y se diluyeron con el tiempo, resultando indetectables luego de cinco años de realizada la intervención. En este sentido, diversos estudios han señalado que los tratamientos mecánicos logran reducir la cobertura de especies leñosas solo durante un período limitado, que varía entre uno a cinco años (Peláez et al., 2017; Caresani Tossoni, 2021; Sabbatini et al., 2023). Una vez transcurrido ese lapso, es probable que la recolonización de especies arbóreas y arbustivas modifique nuevamente las condiciones microambientales del suelo, afectando la materia orgánica y reduciendo la eficacia del manejo aplicado. Esta dinámica pone en evidencia la notable resiliencia del bosque de caldén, que tiende a recuperar su estructura original rápidamente tras una perturbación (Peinetti et al., 2019).

Las Figuras 15 y 16 muestran los valores medios de MOT y MOP, respectivamente, obtenidos en ambos muestreos, diferenciados por tipo de parche (A; AA; G) y manejo (Control-Rmec y Rmec). Se registró un mayor valor de MOT en otoño, mientras que la MOP fue más elevada en primavera. La alta concentración de MOT observada en otoño podría atribuirse a la caída de hojas de especies caducifolias predominantes en el área (como *Neltuma caldenia*, *N. flexuosa*, *N. alpataco* y *Geoffroea decorticans*), lo que incrementa los aportes de hojarasca al suelo y estimula los procesos iniciales de descomposición. En cambio, los valores más bajos de MOT registrados en primavera podrían deberse a una disminución en el aporte inmediato de residuos vegetales tras la senescencia foliar, así como a la progresiva descomposición de la MO acumulada durante la estación anterior. Como resultado de estos procesos, se detectó una mayor proporción de MOP en primavera, posiblemente asociada a la fragmentación de la MO inducida por condiciones ambientales —como mayor temperatura y humedad— que favorecen la actividad microbiana en el suelo. En este contexto, diversos estudios sugieren que una mayor disponibilidad hídrica y temperaturas favorables se asocian con

un incremento en la producción de hojarasca por parte de especies arbustivas, así como con la germinación y establecimiento de especies anuales (Campanella & Bertiller, 2010; Torres et al., 2024). Estos eventos contribuyen al ingreso de nuevos residuos orgánicos al sistema, favoreciendo su descomposición y la acumulación de fracciones particuladas (Ambrosino et al., 2019).

Por otra parte, la composición y estructura de la vegetación de cada parche serían determinantes para explicar las diferencias en la dinámica de la materia orgánica del suelo. En todos los casos, los parches AA presentaron los valores más altos de MOT y MOP, seguidos por los parches A, mientras que los valores más bajos se observaron en los parches G (Fig. 15 y 16). Estos resultados se mantienen en ambas estaciones de muestreo evidenciando el efecto de la composición estructural de la vegetación sobre la CS. La presencia de árboles y arbustos, en particular, favorece el aporte de broza de mayor calidad y cantidad (Ambrosino et al., 2023), estimulando los procesos de descomposición.

Estos resultados coinciden con los de Sabbatini et al. (2023), quienes también observaron que prácticas de manejo como el rolado y el triturado pueden ser adecuadas para la recuperación de bosques afectados por procesos de arbustización, sin modificar negativamente la calidad del suelo según el contenido de carbono orgánico total (COT) y sus fracciones. Esto sugiere que el impacto del manejo no solo depende de la intensidad o tipo de intervención, sino también de la estructura y composición de la vegetación presente tras la intervención. En este sentido, los resultados obtenidos subrayan la importancia de la presencia de especies de diferentes grupos funcionales en la regulación de las fracciones orgánicas del suelo en el Caldenal, lo cual contribuye a mantener su calidad, destacando la necesidad de futuras investigaciones para comprender los procesos de descomposición y la actividad microbiana asociados.

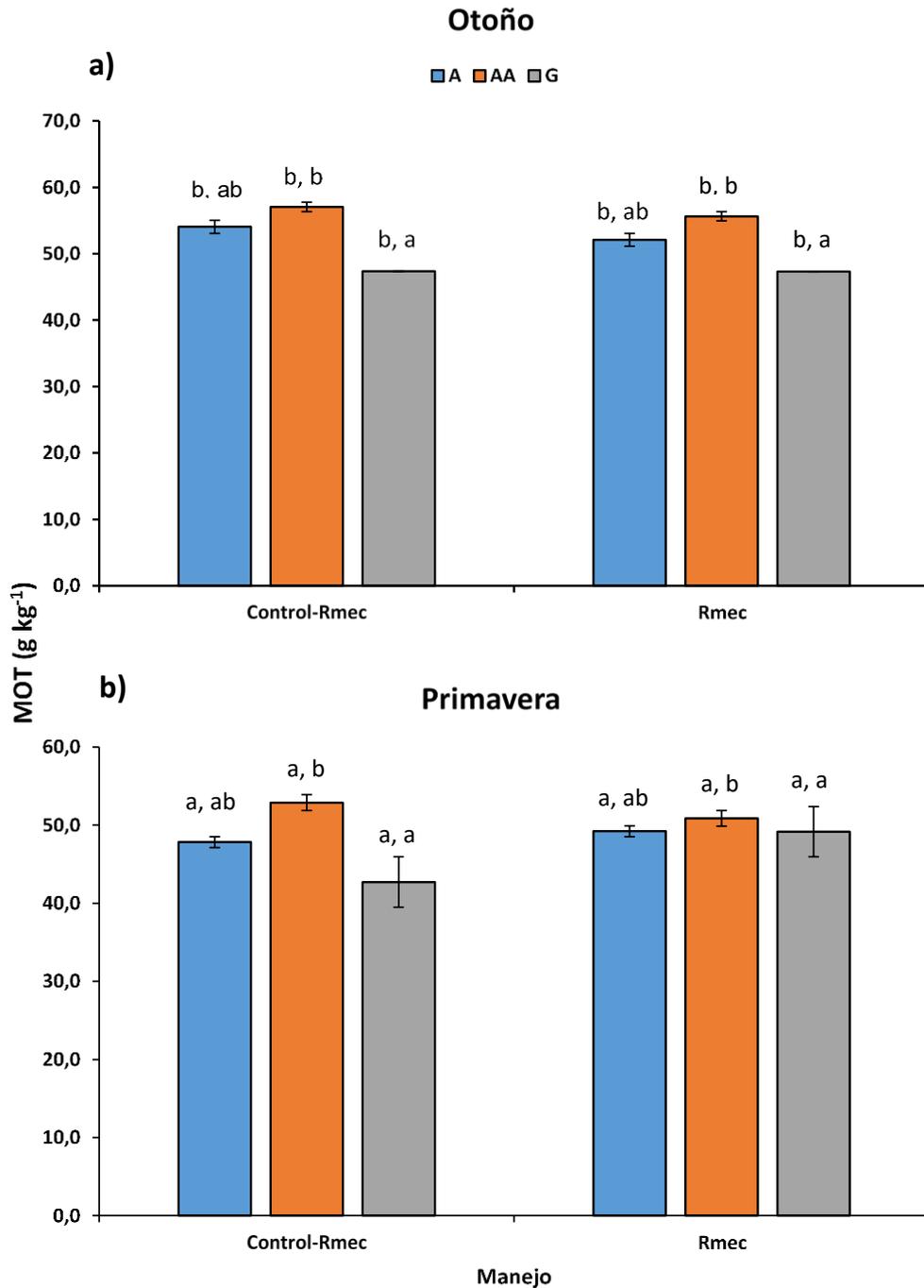


Figura 15. Contenido medio de materia orgánica total (MOT) \pm desvío estándar (n=5) según tipo de parche: Árboles (A), Árboles y arbustos (AA) y Graminoso-herbáceo (G) y manejo: Control (Control-Rmec) y Raleo mecánico (Rmec) en a) otoño y b) primavera. Letras distintas delante y después de la coma indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre muestreos y entre parches, respectivamente.

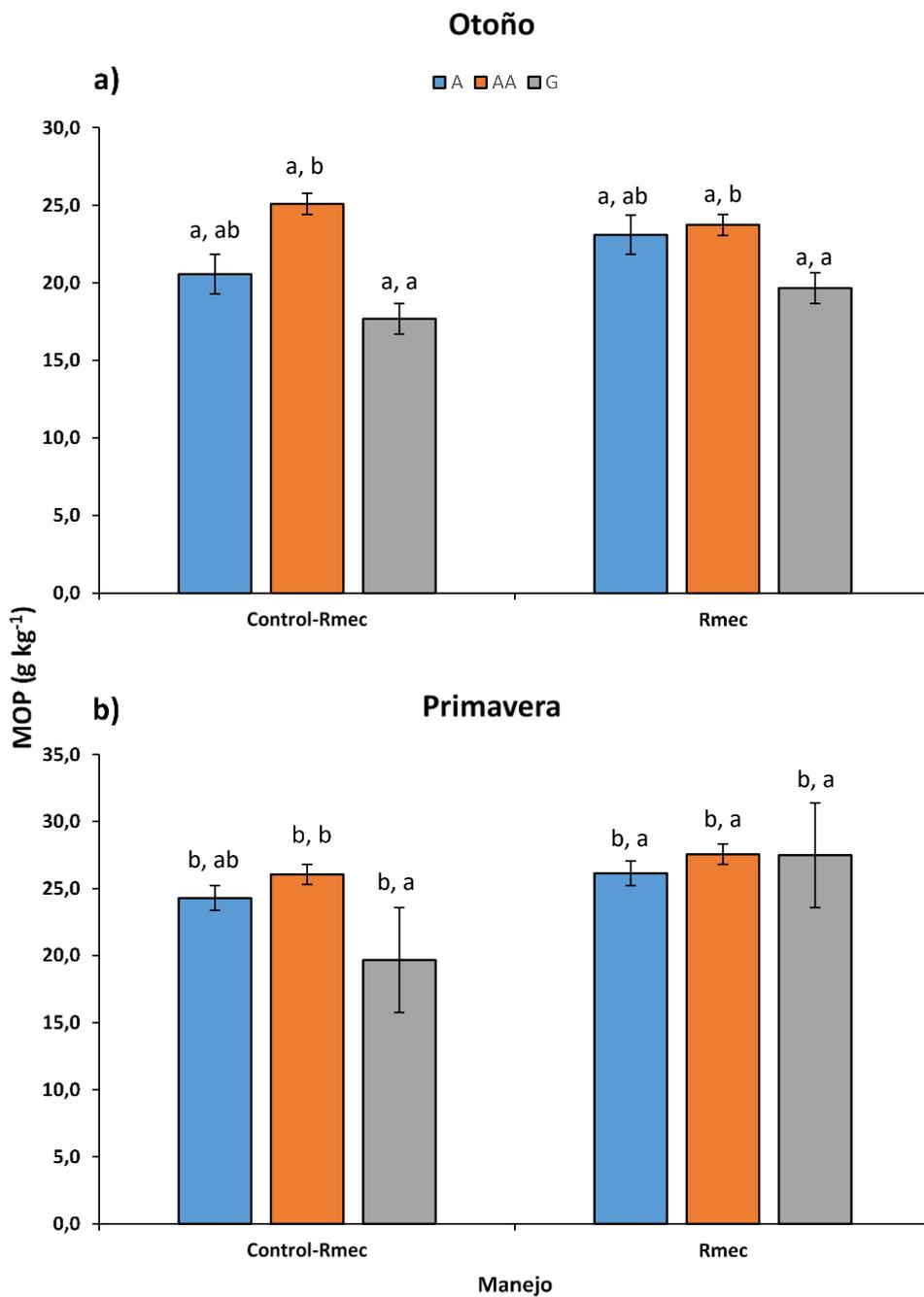


Figura 16. Contenido medio de materia orgánica particulada (MOP) \pm desvío estándar (n=5), según tipo de parche: Árboles (A), Árboles y arbustos (AA) y Graminoso-herbáceo (G) y manejo: Control (Control-Rmec) y Raleo mecánico (Rmec) para a) otoño y b) primavera. Letras distintas delante y después de la coma indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre muestreos y entre parches, respectivamente.

Índices funcionales

En la Tabla 1 se detallan los índices funcionales para cada época de muestreo, manejo y tipo de parche. Para MOP/MOT, no se halló interacción significativa, aunque sí se observaron efectos significativos del manejo, con mayores valores en Rmec y en el muestreo de primavera. Este índice sigue la tendencia observada para el indicador MOP. Esto podría deberse a que durante el otoño se incrementó el aporte de material orgánico por parte de las especies caducifolias, mientras que en primavera se intensificaron los procesos de transformación, favorecidos por las condiciones ambientales que promueven el aumento de las fracciones orgánicas lábiles.

Para el índice C/N, se observó una interacción significativa triple, por lo que se procedió a analizar los efectos según la época de muestreo y el tipo de manejo. En otoño, no se detectaron efectos significativos del manejo ni de los parches. En primavera, en cambio, se registró una interacción significativa entre manejo y parche, con valores de C/N más altos en el parche AA del sitio intervenido y en el parche G del sitio control. Es importante remarcar que, en general, la mayoría de los valores de la relación C/N, independientemente del momento de muestreo y del manejo aplicado, se ubicaron dentro del rango teórico de 10 a 14, característico de suelos con materia orgánica estabilizada (Cools et al., 2014; Gamarra et al., 2018). Sin embargo, estos resultados contrastan con los hallados por Anriquez et al. (2005) y Albanesi et al. (2013), quienes reportaron disminuciones en la relación C/N a mediano plazo como consecuencia del raleo mecánico. Por otro lado, Cools et al. (2014) destacaron que la especie arbórea es un factor determinante en la relación C/N del suelo en diferentes bosques, lo que evidencia el papel modulador de la vegetación leñosa sobre la calidad de la materia orgánica. En concordancia, la mayor relación C/N observada en el sitio intervenido, bajo árboles y arbustos, podría explicarse por mecanismos similares, donde la cobertura leñosa influye en el tipo y grado de transformación de los aportes orgánicos al suelo.

En el índice COP/NOP no se observó una interacción significativa en el ANOVA triple. Sin embargo, se hallaron diferencias significativas debido al manejo, con mayores valores bajo Rmec y en el muestreo de primavera. A nivel de parche no se detectaron diferencias significativas. Estos resultados podrían indicar que bajo el tratamiento control, se evidencia una mayor estabilización de la relación C/N de la fracción más lábil, mientras que el raleo mecánico favorece un mayor aporte de material orgánico. Con respecto al momento de muestreo se observa la misma tendencia hallada en MOP, con mayores

relaciones en primavera. Esto demuestra que la calidad de la fracción más lábil depende de la incorporación generada en el mediano plazo por el manejo y presenta variaciones por muestreo, lo que sigue la tendencia de la MOP.

Tabla 1. Índices funcionales de calidad del suelo (media \pm desvío estándar, n=5) según tipo de parche: Árboles (A), Árboles y arbustos (AA) y Graminoso-herbáceo (G) y manejo: Control (Control-Rmec) y Raleo mecánico (Rmec), para dos épocas de muestreo.

Muestreo	Manejo	Parche	MOP/MOT	C/N	COP/NOP	IMO
Otoño	Control-Rmec	A	0,4 \pm 0,07 a,a	11,5 \pm 1,5 a,a	10,9 \pm 2,76 a,a	14,3 \pm 2,23 b,b ^(*)
		AA	0,4 \pm 0,05 a,a	12,4 \pm 0,77 a,a	12,6 \pm 0,69 a,a	14,8 \pm 3,06 b,b ^(*)
		G	0,4 \pm 0,03 a,a	12,6 \pm 1,17 a,a	13,2 \pm 1,15 a,a	12,2 \pm 1,24 b,a ^(*)
	Rmec	A	0,4 \pm 0,05 a,a*	11,2 \pm 0,77 a,a	15,8 \pm 2,34 a,a*	13,9 \pm 1,36 a,b
		AA	0,4 \pm 0,04 a,a*	11,7 \pm 1,61 a,a	16,8 \pm 1,46 a,a*	14,3 \pm 1,40 a,b
		G	0,4 \pm 0,06 a,a*	12,8 \pm 1,50 a,a	15,7 \pm 0,97 a,a*	12,2 \pm 2,13 a,a
Primavera	Control-Rmec	A	0,5 \pm 0,06 b,a	12,1 \pm 1,95 a,a	19,0 \pm 4,65 b,a	12,2 \pm 1,96 a,b
		AA	0,5 \pm 0,06 b,a	10,3 \pm 1,37 a,a	16,9 \pm 4,78 b,a	12,1 \pm 1,53 a,b
		G	0,5 \pm 0,05 b,a,	14,0 \pm 0,62 a,b [#]	21,9 \pm 3,2 b,a	10,5 \pm 1,3 a,a
	Rmec	A	0,5 \pm 0,06 b,a*	12,9 \pm 2,21 a,a	22,8 \pm 2,21 b,a*	13,6 \pm 1,18 a,b*
		AA	0,5 \pm 0,08 b,a*	12,7 \pm 1,60 a,a [#]	22,4 \pm 6,03 b,a*	13,0 \pm 1,1 a,b*
		G	0,6 \pm 0,18 b,a*	11,6 \pm 2,19 a,a	22,2 \pm 2,77 b,a*	12,3 \pm 1,35 a,a*

Para cada índice, letras distintas delante y después de la coma indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre épocas de muestreo y entre parches, respectivamente; * indica diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre tratamientos en cada época de muestreo; # indica diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre tratamientos en cada parche; ^(*) indica diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre épocas de muestreo dentro de cada tratamiento.

El índice IMO mostró diferencias significativas entre los distintos parches de vegetación, registrándose valores más altos en los sitios con cobertura leñosa (A y AA) en comparación con el parche graminoso-herbáceo (G). Asimismo, se detectó una interacción significativa entre el manejo y el momento de muestreo, observándose en el sitio control valores más altos en otoño. Por su parte, solo en primavera, el sitio con raleo, mostró valores mayores al control. Es importante destacar que todos los valores de IMO superan ampliamente el umbral de cinco (IMO=5), establecido por Quiroga et al. (2006), que podrían evidenciar degradación edáfica, disminuyendo la CS. Estos resultados sugieren que el manejo favoreció el aporte de residuos por la acción mecánica obteniéndose mayores valores de IMO con respecto al control en primavera, posiblemente

atribuido a la mayor incorporación ocasionada por la caída de hojas de especies caducifolias en otoño.

Conclusiones

Aunque las prácticas de manejo contribuyen a mejorar la estructura y funcionalidad del bosque de caldén, sus efectos sobre la vegetación leñosa no son permanentes. La regeneración de especies arbustivas puede ocurrir en pocos años si no se aplican tratamientos adicionales. En este estudio, el raleo mecánico no mostró efectos significativos sobre las fracciones orgánicas evaluadas (MOT y MOP), aunque sí se observaron diferencias asociadas al momento del muestreo y al tipo de parche de vegetación. Además, la composición y estructura de la vegetación de cada parche resultaron ser factores determinantes para explicar estas diferencias, especialmente la presencia de árboles y arbustos. Con respecto a los índices, MOP/MOT y COP/NOP demostraron ser sensibles a la práctica de manejo efectuado mientras que los restantes no mostraron sensibilidad. Esto indicaría que estos índices podrían ser promisorios para la evaluación de la CS bajo estas condiciones. En conjunto, los resultados subrayan la importancia de conservar y manejar la diversidad de grupos funcionales de especies vegetales en el Caldenal, dado su papel clave en la regulación de la materia orgánica del suelo y, por ende, en el mantenimiento de su calidad. Esto resalta la necesidad de profundizar en estudios que aborden los procesos de descomposición y la actividad microbiana asociados a diferentes contextos de manejo.

Bibliografía

- Adema, E. (2006). *Recuperación de pastizales mediante rolado en el Caldenal y en el monte Occidental* (Publicación Técnica N.º 65). INTA EEA Anguil.
- Adema, E. O., Buschiazzo, D. E., Babinec, F. J., Rucci, T. E., & Hermida, V. F. G. (2004). Mechanical control of shrubs in a semiarid region of Argentina and its effect on soil water content and grassland productivity. *Agricultural Water Management*, 68(3), 185–194. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.04.001>
- Aguilera, M., & Steinaker, D. (2001). Rolado y siembra en arbustales semiáridos de San Luis. En J. Panigatti, D. Buschiazzo, & H. Marelli (Eds.), *Siembra directa II* (pp. 289–302), INTA.
- Albanesi, A., Kunst, C. R., Anriquez, A. L., Silverman, J. E., & Ledesma, R. (2013). Rolado selectivo de baja intensidad (RBI) y sistemas silvopastoriles de la región chaqueña. Hacia la Construcción del desarrollo agropecuario y agroindustrial. De La FAyA Al NOA. Ediciones Magna, Tucumán, Tucumán, Argentina, 147-174.
- Ambrosino, M.L., Busso, C.A., Torres, Y.A., Ithurrart, L.S., Martínez, J.M., Minoldo, G., Cardillo, D.S., Palomo, I.R. (2019). “Plant litter decomposition in a semi-arid rangeland of Argentina: species and defoliation effects”. *The Rangeland Journal*, 41, 371-381. <https://doi.org/10.1071/RJ18070>
- Ambrosino, M.L., Torres, Y.A., Lucero, T.C., Lorda, GS., Ithurrart, L., Martínez, J.M., Armando, L.V., Garayalde, A., Busso, C.A. (2023). Impacts of shrub encroachment on soil quality in the native Monte rangelands of Southwestern Buenos Aires, Argentina”. *Land Degradation and Development*, 34, 3406-3417. <https://doi.org/10.1002/ldr.4692>
- Anderson, D. L., Del Aguila, J. A., & Bernardón, A. E. (1970). Las formaciones vegetales de la provincia de San Luis. *RIA (INTA)*, 7(3), 153–183.
- Anriquez, A., Albanesi, A., Kunst, C., Ledesma, R., López, C., Torres Rodríguez, A., & Godoy, J. (2005). Rolado de fachinales y calidad de suelos en el Chaco Occidental, Argentina. *Ciencia del Suelo*, 23(2), 145–157.

- Archer, S., & Smeins, F. E. (1991). Ecosystem-level processes. En R. K. Heitschmidt & J. W. Stuth (Eds.), *Grazing management: An ecological perspective* (pp. 109–139). Timber Press.
- Cabrera, A. L. (1976). Regiones fitogeográficas argentinas. En E. F. Ferreira Sobral (Ed.), *Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería* (pp. 1–85). ACME.
- Campanella, M. V., & Bertiller, M. B. (2010). Leaf litterfall patterns of perennial plant species in the arid Patagonian Monte, Argentina. *Plant Ecology*, 210, 43-52. <https://doi.org/10.1007/s11258-010-9736-7>
- Cano, E., Fernández, B., & Montes, M. (1980). La vegetación de la provincia de La Pampa y carta de vegetación 1:500.000. En *Inventario integrado de los recursos naturales de la provincia de La Pampa* (pp. 1–493). INTA / Facultad de Agronomía UNLPam.
- Caresani Tossoni, J. M. (2021). El chipeado, ¿herramienta útil para restaurar un Caldenal degradado de una reserva natural protegida en La Pampa, Argentina? Tesis de grado, Universidad Nacional de La Pampa. Repositorio UNLPam., 55 pp.
- Carter, MR. (2002). Soil quality for sustainable land management: organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions. *Agronomy Journal* 94, 38-47. <https://doi.org/10.2134/agronj2002.3800>
- Cools, N., Vesterdal, L., De Vos, B., Vanguelova, E., & Hansen, K. (2014). Tree species is the major factor explaining C: N ratios in European forest soils. *Forest Ecology and Management*, 311, 3-16. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.06.047>
- D'Odorico, P., Porporato, A., & Wilkinson Runyan, C. (2019). *Dryland ecohydrology* (2.^a ed.). Springer Nature Switzerland.
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., González, L., Tablada, M., & Robledo, C. W. (2020). *InfoStat* (Versión 2020). Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba. <http://www.infostat.com.ar>

- Doran, J. W., & Parkin, T. B. (1994). Defining and assessing soil quality. En J. W. Doran, D. C. Coleman, D. F. Bezdicek, & B. A. Stewart (Eds.), *Defining soil quality for a sustainable environment* (pp. 3–23). Soil Science Society of America.
- Dussart, E. G., Chirino, C. C., & Morici, E. A. (2011). Reconstrucción del paisaje del caldenal pampeano en los últimos 250 años. *Quebracho*, 19(1–2), 54–65.
- Duval, M. E., Galantini, J. A., Iglesias, J. O., Canelo, S., Martínez, J. M., & Wall, L. (2013). Analysis of organic fractions as indicators of soil quality under natural and cultivated systems. *Soil and Tillage Research*, 131, 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.03.001>
- Duval, V. S., Benedetti, G. M., & Campo, A. M. (2019). Fisonomía y diversidad del bosque secundario de *Prosopis caldenia*, provincia de La Pampa, Argentina. *Revista Geográfica de América Central*, 62, 185–206. <https://doi.org/10.15359/rgac.62-1.7>
- Estell, R., Havstad, K. M., Cibils, A., Anderson, D., Schrader, T., & James, K. (2012). Increasing shrub use by livestock in a world with less grass. *Rangeland Ecology and Management*, 65, 553–562. <https://doi.org/10.2111/REM-D-11-00124.1>
- Estelrich, H. D., Chirino, C. C., Fernández, B. C., & Morici, E. F. (1997). Cambios florísticos en los sistemas naturales de la Región Semiárida Pampeana por efecto del pastoreo. En *XVIII Reunión Argentina de Ecología* (p. 43). Buenos Aires.
- Estelrich, H. D., Fernández, B., Morici, E., & Chirino, C. C. (2005). Persistencia de los cambios provocados por los fuegos controlados en diferentes estructuras del bosque de caldén (*Prosopis caldenia* Burk.). *Revista de la Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de La Pampa*, 16, 25–30.
- Fernández, O. A., & Busso, C. A. (1999). Arid and semi-arid rangelands: Two thirds of Argentina. En O. Arnalds & S. Archer (Eds.), *Case studies of rangeland desertification, Agricultural Research Institute Report N° 200* (pp. 41–60). Reykjavik, Islandia.

- Galantini, J.A, N Senesi, G Brunetti & R Rosell. (2004). Influence of texture on the nitrogen and sulphur status and organic matter quality and distribution in semiarid Pampean grassland soils. *Geoderma* 123: 143-152.
- Galantini, JA. (2008). Calidad de las fracciones orgánicas en suelos naturales y cultivados. En: J Galantini et al. (eds.). Estudio de las fracciones orgánicas en suelos de la Argentina, pp. 71-95. Editorial Universidad Nacional del Sur.
- Gallego, L., & Distel, R. A. (2004). Phytolith assemblages in grasses native to Central Argentina. *Annals of Botany*, 94, 865. <https://doi.org/10.1093/aob/mch214>
- Gamarra Lezcano, C. C., Díaz Lezcano, M. I., Vera de Ortíz, M., Galeano, M. del P., & Cabrera Cardús, A. J. N. (2018). Relación carbono-nitrógeno en suelos de sistemas silvopastoriles del Chaco paraguayo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(46), 1–17. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i46.134874>.
- Haubensak, K. A., & Parker, I. M. (2004). Soil changes accompanying invasion of the exotic shrub *Cytisus scoparius* in glacial outwash prairies of western Washington (USA). *Plant Ecology*, 175, 71–79.
- Informe Regional Espinal. (2006). *Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación*. Buenos Aires, Argentina.
- INTA. (1980). Gobierno de La Pampa & Facultad de Agronomía (UNLPam). *Inventario integrado de los recursos naturales de La Pampa* (493 pp.).
- Kunst, C., Bravo, S., Moscovich, F., Herrera, J., Godoy, J., & Vélez, S. (2003). Fecha de aplicación de fuego y diversidad de herbáceas en una sabana de *Elionurus muticus* (Spreng) O. Kuntze. *Revista Chilena de Historia Natural*, 76, 105–115.
- Larroulet, M. S., Hepper, E. N., Ferreyra, P. A., Iglesias, J. O., & Galantini, J. A. (2020). Carbono orgánico y actividad microbiana en un suelo del Caldenal pampeano con diferentes manejos. *Ciencia del Suelo*, 38(1), 95–105.
- Leinonen, A. (2007). *Wood chip production technology and costs for fuel in Namibia*. VTT Technical Research Centre of Finland. (VTT Tiedotteita - Research Notes 2417).

- Martinez, J. M., Galantini, J. A., Duval, M. E., Lopez, F. M., & Iglesias, J. O. (2018). Estimating soil organic carbon in Mollisols and its particle-size fractions by loss-on-ignition in the semiarid and semihumid Argentinean Pampas. *Geoderma Regional*, 12, 49–55. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2017.12.004>
- MEA – Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and human well-being: Desertification synthesis*. World Resources Institute.
- Mora, S., & Rosales Mercado, I. A. (2012). *El rolado en Mendoza*. Ediciones INTA.
- Morici, E., Doménech García, V., Gómez Castro, G., Kin, A. G., Saenz, A. M., & Rabotnikof, C. M. (2009). Diferencias estructurales entre parches de pastizal del caldenal y su influencia sobre el banco de semillas, en la provincia de La Pampa, Argentina. *Agrociencia*, 43, 529–537.
- Nghikembua, M. T., Marker, L. L., Brewer, B., Leinonen, A., Mehtätalo, L., Appiah, M., & Pappinen, A. (2021). Restoration thinning reduces bush encroachment on freehold farmlands in north-central Namibia. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 94, 551–564. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpab009>
- Peinetti, R. H., Bestelmeyer B. T., Chirino, C. C., Kin, A. G. & Frank Buss, M. E. (2019). Generalized and Specific State-and-Transition Models to Guide Management and Restoration of Caldenal Forests. *Rangeland Ecology and Management*, 72(2), 230–236.
- Peinetti, R., Pereyra, M., Kin, A., & Sosa, A. (1993). Effects of cattle ingestion on viability and germination rate of caldén (*Prosopis caldenia*) seeds. *Journal of Range Management*, 46, 483–486. <https://doi.org/10.2307/4002856>
- Peláez, D. V., Blázquez, F. R., Giorgetti, H. D., & Rodríguez, G. D. (2021). Respuesta de la vegetación a un rolado en la Provincia Fitogeográfica del Monte, Buenos Aires, Argentina. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 47(2), 224–231.
- Peláez, D. V., Giorgetti, H. D., Montenegro, O. A., Elía, O. R., Rodríguez, G. D., Blázquez, F. R., Andrioli, J. R. (2017). Vegetation response to fire and roller-chopping in the south-west of Buenos Aires, Argentina. *Phyton-International*

Journal of Experimental Botany, 86, 325-331.
<https://doi.org/10.32604/phyton.2017.86.325>

Quiroga, A., Furano, D., Noellemeyer, E., & Peinemann, N. (2006). Barley yield response to soil organic matter and texture in the Pampas of Argentina. *Soil & Tillage Research*, 90, 63–68. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.08.019>

Sabattini, R., Sabattini, J., Befani, R., Hernández, J., Boschetti, N., Alvarado, M., & Muzzachiodi, N. (2023). Sucesión ecológica de un bosque nativo intervenido en la ecorregión Espinal. *Ciencia, Docencia y Tecnología Suplemento*, 13(14), 280-304.

Schlesinger, W. H., Reynolds, J. F., Cunningham, G. L., Huenneke, L. F., Jarrell, W. M., Virginia, R., & Whitford, W. G. (1990). Biological feedbacks in global desertification. *Science*, 247, 1043–1048.
<https://doi.org/10.1126/science.247.4946.1043>

Torres, Y.A., Ithurrart, L.S., Ambrosino, M.L., Brendel, A.S., Blázquez, F.R., Armando, L.V., Pezzola, A. (2024). Shrub encroachment in semi-arid rangelands of southwestern Buenos Aires, Argentina does not affect plant diversity and composition. *Journal of Arid Environments*, 222, 105140.
<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2024.105140>

Van Auken, O. W. (2000). Shrub invasions of North American semiarid grasslands. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 31, 197–215.
<https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.31.1.197>

Van Auken, O. W. (2009). Causes and consequences of woody plant encroachment into western North American grasslands. *Journal of Environmental Management*, 90, 2931–2942.

Vankeirsbilck, M., Barraco, M., & Maekawa, M. (2014). Materia orgánica y textura en suelos de sistemas lecheros de la cuenca oeste de la provincia de Buenos Aires. *Memoria técnica*. EEA General Villegas.

Zornoza, R; J Mataix-Solera; C Guerrero; V Arcenegui; J Mataix-Beneyto & I Gómez. (2008). Validating the effectiveness and sensitivity of two soil quality indices based

on natural forest soils under Mediterranean conditions. *Soil Biology and Biochemistry* 40, 2079-2087. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.01.014>