



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA**

**FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES**

**TESINA DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE BIÓLOGA**

**Cuantificación del carbono almacenado a lo largo de un  
gradiente de estructura de la vegetación en paisajes  
agrícolas del Espinal de Córdoba**

**Tesinista: Belén Nancy Longoni**      Firma: \_\_\_\_\_

**Directora: Georgina Conti**              Firma: \_\_\_\_\_

**Codirector: Esteban Kowaljow**        Firma: \_\_\_\_\_

**Instituto Multidisciplinario de Biología Vegetal (CONICET-UNC)**

**2023**

**TESINA PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE GRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**

**Cuantificación del carbono almacenado a lo largo de un gradiente de estructura de la vegetación en paisajes agrícolas del Espinal de Córdoba.**

Tribunal examinador:

Dra. Natalia Pérez Harguindeguy

Firma: \_\_\_\_\_

Dr. Anibal Cuchietti

Firma: \_\_\_\_\_

Dra. Ana Carolina Mateos

Firma: \_\_\_\_\_

Calificación: \_\_\_\_\_

Fecha: \_\_\_\_\_

## **Agradecimientos**

A mis directores, Georgina y Esteban, por haberme guiado con dedicación y paciencia en la elaboración de esta tesina.

Al tribunal examinador, por su valioso aporte a la realización de este trabajo.

A Juan y Norma, por su colaboración en las tareas de campo y laboratorio.

A la Universidad Nacional de Córdoba y la educación pública y gratuita, a las cuales les debo mi formación como Bióloga y también como persona.

A mi mamá, Susana, por apoyarme y permitirme hacer del estudio una prioridad en todo momento. A mi hermana y hermanos, a Hugo, por haberme incentivado desde pequeña a pensar y aprender.

A Vani, por la contención y paciencia, y por la ayuda en las últimas etapas de este camino. A Sofí, Nadia y Flor, por su amistad y compañía a lo largo de estos años.

A las amigas y amigos que me dejó la facultad, por los consejos y ayuda en la elaboración de esta tesina, y por todo lo compartido en estos años.

# Índice

## Contenido

Agradecimientos .....	3
Resumen.....	5
Introducción .....	6
Objetivos .....	8
Objetivo General .....	8
Objetivos específicos.....	8
Hipótesis y resultados esperados.....	9
Materiales y métodos .....	11
Área de estudio .....	11
Diseño experimental .....	11
Análisis estadístico .....	16
Resultados.....	17
Gradiente de estructura de la vegetación.....	17
Carbono almacenado en ecosistemas del Espinal de Córdoba.....	17
Carbono almacenado a lo largo del gradiente de estructura de la vegetación .....	18
Carbono almacenado en el ecosistema a lo largo del gradiente de estructura de la vegetación. .....	22
Discusión .....	23
Conclusión.....	26
Referencias bibliográficas .....	27
Anexo I.....	33
Gradiente de propiedades del suelo y C almacenado en suelo. ....	33
Fotos de los sitios .....	36

## Resumen

La emisión de CO<sub>2</sub> debida al cambio en el uso del suelo representa una de las causas del cambio climático global. Los bosques constituyen importantes reservorios de carbono (C), mientras que el potencial de almacenar carbono de pasturas y cultivos depende de la intensidad y tipo de manejo productivo. El Espinal presenta una larga historia de expansión agrícola-ganadera; sin embargo, son escasos los estudios que evalúan el efecto del cambio en el uso del suelo sobre los reservorios de C en estos ecosistemas. El objetivo de este trabajo consistió en cuantificar el C almacenado a lo largo de un gradiente de estructura de la vegetación asociado al uso, en ecosistemas del Espinal de Córdoba. Se seleccionaron 9 sitios representativos de los usos del suelo más extendidos, entre ellos cuatro bosques bajo uso ganadero y cinco sitios con distintas intensidades de uso productivo. Los ecosistemas del Espinal de Córdoba tienen el potencial de almacenar hasta 173 Mg C ha<sup>-1</sup> en la vegetación y en el suelo (hasta 1 m de profundidad), dependiendo del tipo de manejo productivo. El C del suelo constituyó el reservorio más importante en relación al C almacenado en la vegetación (entre 81 y 97%). El C almacenado en la vegetación cambió drásticamente a lo largo del gradiente de uso (c. 95%), mientras que el C en el suelo se mostró estable a cambios en la cobertura y manejo. Dada la baja cobertura actual de los bosques nativos del Espinal, su conservación y recuperación es de fundamental importancia para la mitigación del cambio climático a escala regional, dado su potencial de almacenamiento de C. Si bien los datos de este trabajo muestran un impacto del cambio en el uso sobre la vegetación, este efecto no se evidencia en el suelo. Es indispensable considerar nuevas mediciones agrupadas en función de sus características edáficas para entender el efecto del cambio en el uso del suelo sobre el C almacenado en el suelo.

Palabras Clave: Almacenamiento de carbono, Cambio de uso del suelo, Bosques xerófilos, Mitigación del cambio climático.

## Introducción

La emisión neta de CO<sub>2</sub> debida al cambio en el uso de la tierra, constituye una de las principales causas del cambio climático global (IPCC, 2013). La captación biológica de CO<sub>2</sub> atmosférico y su almacenamiento en el tiempo (la capacidad de “secuestro de carbono”) se considera un servicio ecosistémico importante a la hora de proponer estrategias de mitigación del cambio climático (Catovsky y col., 2002). Dentro de los ecosistemas terrestres, los bosques constituyen los principales reservorios de carbono (C), mayormente almacenado en la biomasa leñosa y en el suelo (Malhi y col., 1999), mientras que pasturas y cultivos tienen la potencialidad de almacenar C principalmente en el suelo, dependiendo del tipo de manejo y el grado de disturbio que presenten (Céspedes Flores y col., 2009).

La vegetación leñosa del centro de Argentina comprende dos grandes regiones de bosque estacionalmente seco: el Chaco y el Espinal (Cabrera, 1976). Éstas representan los bosques estacionalmente secos más grandes de Sudamérica y se encuentran entre las pocas áreas del mundo donde la transición entre los trópicos y las zonas templadas no se presenta en forma de desierto sino como bosques semiáridos y matorrales (Cabido y col., 2018). Ambas regiones brindan numerosos servicios ecosistémicos necesarios para la regulación y soporte de los procesos ecosistémicos básicos, entre ellos el secuestro de carbono (Conti y Díaz, 2013). Debido a su menor productividad y biomasa en pie en comparación con otros bosques templados y tropicales, estos bosques subtropicales estacionalmente secos han sido poco estudiados en términos de su contribución a la mitigación del cambio climático. Sin embargo, no sólo representan una significativa proporción de la superficie terrestre (c. 17.47 %; Lal, 2004), sino que, como consecuencia de un ambiente menos productivo y condiciones de déficit hídrico (mayor temperaturas y menor precipitaciones), la biomasa de la vegetación se reduce junto con la tasa de ciclado de carbono y nutrientes, propiciando que la mayor proporción del C secuestrado se encuentre en reservorios estables del suelo en comparación con ecosistemas más productivos y con menor déficit hídrico (Campo y Merino, 2016; Mi y col., 2015). Numerosos trabajos realizados en el Chaco han puesto énfasis en el rol de estos relictos boscosos como reservorios de C y las consecuentes pérdidas de este servicio ecosistémico por efecto de los acelerados cambios en el uso de la tierra (Baldassini y Paruelo, 2020; Baumann y col., 2017; Bonino, 2006; Conti y col., 2014; Osinaga y col., 2018; Villarino y col., 2017). Sin embargo, son aún escasos los trabajos realizados en el Espinal que cuantifiquen, tanto el potencial de secuestro de C como el efecto del cambio en

el uso de la tierra sobre los reservorios de C (pero ver González Roglich y col., 2014; Sione y col., 2018; Ledesma y col., 2021).

El Espinal ocupa una franja estrecha de unos 307.000 km<sup>2</sup> que rodea las praderas pampeanas y los “Campos” en el centro-este de Argentina (Lewis y Collantes, 1973). El espinal está descrito como un sistema conformado por bosques y matorrales dominados por especies micrófilas caducifolias y espinosas de *Neltuma* y *Strombocarpa* (Ex *Prosopis spp.*) (Cabido y col., 2018). Esta región, en conjunto con la región pampeana, tiene una larga historia de expansión agrícola-ganadera (Nanni y col., 2020). Particularmente en el Espinal, la expansión de la ganadería ocurrió a partir del siglo XVI asociada al inicio de la colonización europea. Posteriormente esta actividad fue reemplazada por cultivos de girasol, maíz y trigo a principios del siglo XX, y por soja a partir de 1990. Esto último desplazó la ganadería a sectores marginales del Chaco y del Espinal (Viglizzo y col., 2011). Actualmente se estima que, de la distribución original total del Espinal, el 48.64 % de su superficie fue modificada para algún tipo de uso productivo, y que solo el 1.58 % de esa superficie remanente se encuentra protegida (Nanni y col., 2020). Particularmente dentro de la provincia de Córdoba, el bosque nativo del Espinal fue reducido al 3.43 % de su superficie original, quedando remanentes pequeños y aislados dentro de una matriz agrícola (Zeballos y col., 2020). Esta matriz se encuentra representada principalmente por cultivos extensivos de soja, trigo y maíz, aunque también se presentan sistemas productivos ganaderos y mixtos (Ghida Daza y Sánchez, 2009).

En general, la reducción en la cobertura boscosa trae aparejado una disminución de los reservorios de C de la vegetación y el suelo, tanto por efecto directo del disturbio aplicado en el corto plazo (Martínez-Mena y col., 2002; Post y Kwon, 2000), como por una reducción del aporte de biomasa aérea en el mediano y largo plazo (Jandl y col., 2007; Don y col., 2011). Por ejemplo, para el caso de los bosques secos del Chaco argentino, el cambio en el uso de la tierra reduce los reservorios de C en la vegetación (incluyendo al C almacenado en vegetación leñosa, herbácea y broza) en un 85-90%, independientemente si los bosques son convertidos a uso agrícola o a tierra de pastoreo (Conti y col. 2014; Villarino y col., 2017). Aunque se considera que los reservorios de C del suelo (C almacenado en diferentes profundidades del suelo) son más estables que los de la vegetación, éstos también se ven profundamente afectados por los cambios en la cobertura vegetal en los bosques secos, sufriendo una disminución significativa por efecto del uso agrícola, no solo en superficie sino también en profundidad (c. 30%. Conti y col., 2014; Villarino y col., 2017; Osinaga y

col., 2018; Baldassini y Paruelo, 2020). Un trabajo reciente que evalúa por primera vez los cambios en el stock de COS producto de la transformación de los distintos bosques nativos de la Argentina hacia otros usos alternativos de suelo encontró una disminución general en el stock de COS luego de la deforestación de  $18 \text{ Mg ha}^{-1}$ , siendo el cambio a agricultura el que mayor efecto tiene en la pérdida de COS ( $40 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) (Nosetto y col., 2023). En cuanto a la conversión del bosque en pastizales o sistemas silvopastoriles, se ha observado que puede generar tanto reducción como aumento de los reservorios de C en el suelo, dependiendo del manejo y el tipo de disturbio aplicado (Osinaga y col., 2018; Baldassini y Paruelo, 2020; Fernández y col., 2020). Para el caso del Espinal, González-Roglich y col. (2014) encontraron que, en un gradiente de cobertura leñosa en el Caldenal, la cantidad de C almacenado varió de  $165 \text{ Mg ha}^{-1}$  en los sitios más conservados a  $45 \text{ Mg C ha}^{-1}$  en pastizales, representando una pérdida de  $120 \text{ Mg C ha}^{-1}$ . En el mismo trabajo, reportaron que la mayor parte del C se encontró en los suelos (c. 70%), como es esperado para este tipo de ecosistema. Por otra parte, Ledesma y col. (2021) encontraron que la biomasa aérea de los bosques del Espinal entrerriano almacena aproximadamente  $44 \text{ Mg C ha}^{-1}$ . Así mismo, Sione y col (2018) encontraron un valor similar para bosques nativos de Entre Ríos, de  $40,14 \text{ Mg C ha}^{-1}$  en la vegetación. Sin embargo, no existen antecedentes previos para el Espinal de Córdoba que cuantifiquen y comparen las pérdidas de C asociadas al cambio en la cobertura vegetal en distintas configuraciones asociadas a distintos usos de la tierra, producto del avance en la frontera agropecuaria para el Espinal del centro de Argentina.

## **Objetivos**

### Objetivo General

Cuantificar la capacidad de secuestro de C a lo largo de un gradiente de estructura de la vegetación asociado a distintos usos de la tierra en ecosistemas del Espinal de Córdoba, Argentina.

### Objetivos específicos

- Determinar un gradiente de estructura en base a variables de la vegetación que incluya a los principales usos de la tierra en el Espinal del centro-este de Córdoba.
- Cuantificar el carbono almacenado en la biomasa leñosa, herbácea, en la broza acumulada y en el suelo hasta 1 m de profundidad en cada una de las coberturas determinadas en los ecosistemas del Espinal.

- Determinar los cambios en los reservorios de C del ecosistema a lo largo de un gradiente de estructura de la vegetación asociado a los principales usos de la tierra en el Espinal de Córdoba, Argentina.

## **Hipótesis y resultados esperados**

Obj. 1. H1. La estructura de la vegetación, entendida como complejidad en términos de distribución espacial de estratos, coberturas y diversidad de la comunidad vegetal, permiten identificar variaciones relacionadas con el uso actual e histórico.

Obj. 1 RE1. Aquellas variables asociadas a una mayor complejidad estructural, cobertura y diversidad de la comunidad vegetal caracterizan a aquellas coberturas con menor intensidad de uso comparado con comunidades vegetales más simplificadas en términos de estructura, cobertura y diversidad de especies asociadas a mayores intensidades de uso de la tierra.

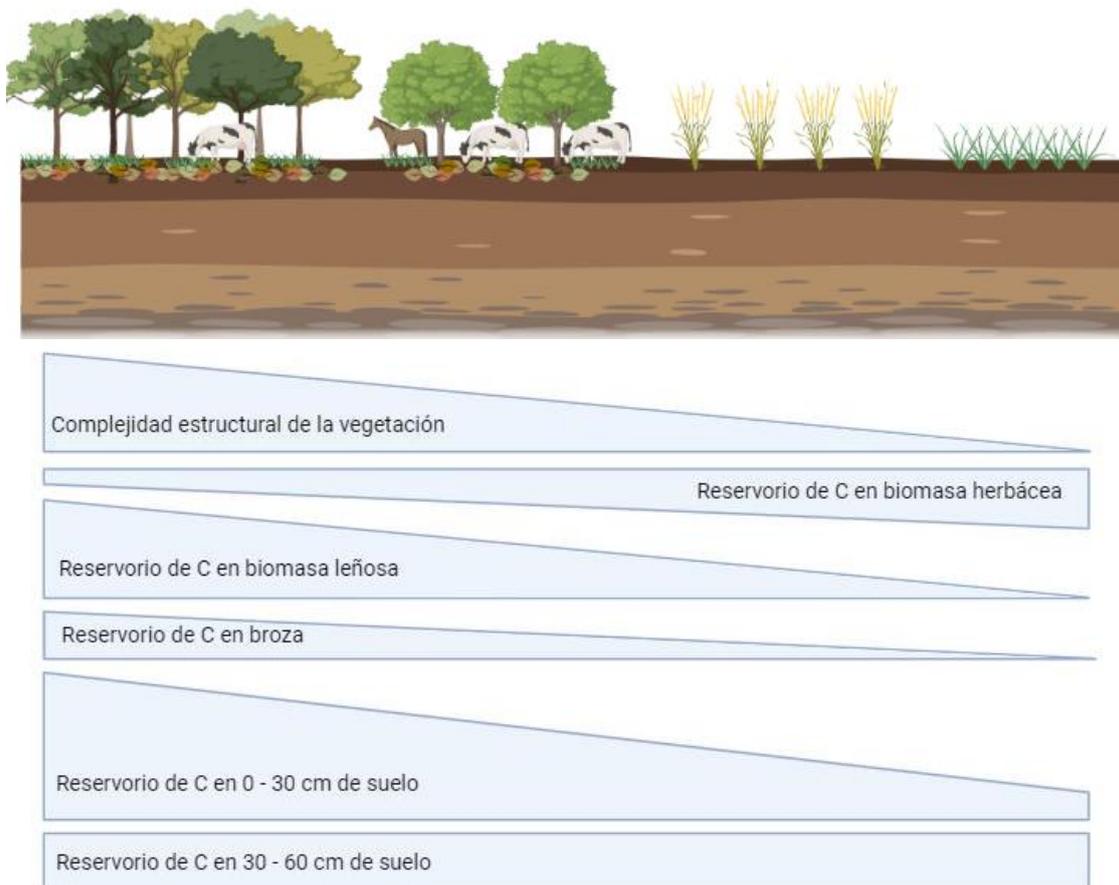
Obj. 2. H2. Los bosques del centro de Argentina se encuentran bajo condiciones semiáridas, donde las precipitaciones relativamente bajas y la alta evapotranspiración crean condiciones de déficit hídrico que constituyen la principal limitante a la entrada (productividad) de C y salida (respiración) en estos sistemas, reduciendo la acumulación de C en relación a otros ecosistemas forestales.. Esta limitante implica que los reservorios de C en la vegetación son menores en relación a otros ecosistemas forestales. Estas mismas condiciones generan que los procesos de pérdida de C desde el suelo se encuentran reducidos en relación a los de la vegetación, permitiendo la acumulación del C en el suelo aún en profundidad, y el aumento de su contribución relativa al carbono total almacenado en el ecosistema.

Obj. 2. RE2. Los bosques subtropicales secos del Espinal presentan valores de C ecosistémico absolutos menores a los encontrados para otros ecosistemas templados y húmedos. Dadas las características de estos bosques se espera que, si bien el C almacenado en la vegetación represente un reservorio importante en términos relativos, la mayor parte del C esté almacenado en la fracción orgánica del suelo, como se ha encontrado para otros ecosistemas de bosques secos del centro de Argentina.

Obj. 3. H3. El cambio en el uso de la tierra genera cambios directos sobre la estructura de la comunidad vegetal, al reemplazar total o parcialmente su composición vegetal y biomasa acumulada. Por otra parte, al disminuir la complejidad estructural y dependiendo del manejo o disturbio aplicado, el suelo puede verse directamente alterado en el corto plazo por

remoción o compactación, o indirectamente a través de los cambios en el aporte de broza de la vegetación, afectando principalmente al suelo superficial, en íntima interacción con los cambios en la vegetación. Como consecuencia, el potencial de secuestro de C en los distintos reservorios del ecosistema se ve profundamente afectado por los cambios en su estructura producto del cambio en el uso, siendo el efecto mayor en la vegetación, con el consecuente traslado de los efectos al reservorio de C del suelo.

Obj. 3. RE3. Se espera encontrar un mayor reservorio ecosistémico de C total en sistemas con mayor complejidad estructural (bosques bajo uso ganadero), viéndose reducido en aquellos sistemas más simplificados bajo uso intensivo. Sin embargo, como consecuencia de la disminución en la vegetación leñosa, se espera un aumento de la vegetación herbácea, siendo esta predominante en sistemas productivos. Además, se espera que el reservorio de C en la broza sea menor con la disminución de vegetación leñosa, debido a un escaso aporte de biomasa muerta. Por otra parte, se espera que el impacto de la remoción de biomasa en el C almacenado en suelo sea mayor en el reservorio de C del suelo en los primeros 0-30 cm de profundidad, y que disminuya con el aumento de la profundidad (**Figura 1**).



*Figura 1: Representación esquemática de las hipótesis y resultados esperados. El tamaño de las figuras representa el tamaño esperado del reservorio de C en cada compartimento.*

## Materiales y métodos

### Área de estudio

El área de estudio se encuentra en la Provincia Fitogeográfica del Espinal, en la región centro-este de la Provincia de Córdoba, entre las localidades de Alto Alegre y Cintra (**Figura 2**). El Espinal se extiende desde el centro de Corrientes y norte de Entre Ríos, atravesando el centro de Santa Fe, Córdoba, sur de San Luis y centro de La Pampa, hasta el sur de Buenos Aires. Presenta un clima cálido y húmedo hacia el norte, templado y seco hacia el sur, con precipitaciones principalmente estivales (Cabrera, 1976), mostrando una temperatura media anual que varía entre los 14 °C y 16 °C y una precipitación media anual de 800 mm (Servicio Meteorológico Nacional, período 1981-2010). Los suelos de la región son molisoles y alfisoles, de textura franca. La vegetación nativa del Espinal está compuesta por bosques y matorrales xerófitos entremezclados con pastizales, con presencia de especies de los géneros *Neltuma* y *Strombocarpa* y otras como *Celtis ehrenbergiana*, *Geoffroea decorticans* y *Vachellia caven* (Cabrera, 1976; Oyarzabal y col, 2018; Zeballos y col, 2020). Actualmente, la vegetación nativa ha sido casi totalmente reemplazada por monocultivos y pasturas exóticas para ganadería, quedando algunos relictos de bosques aislados.



**Figura 2:** Mapa del área de muestreo. B: Bosques bajo uso ganadero, AG: Agrícola (Granos), AGF: Agrícola (Granos y Forraje), P: Pastura. Editado de Noy-Meir y col. (2012).

### Diseño experimental

Dentro del área de estudio, seleccionamos 9 sitios representativos de los usos de la tierra más extendidos en la zona (**Figura 2**). Debido a que estos presentaban suelos overos, es decir que integran complejos determinados o indiferenciados con una alta variabilidad espacial, la selección se realizó en base a la capacidad de uso de los suelos. La capacidad de

uso de la tierra es una clasificación de los suelos en función de su aptitud productiva y su riesgo de degradación, en función de variables como la susceptibilidad a la erosión de los suelos, el exceso de agua (relacionado a la capacidad de drenaje y el nivel de la capa freática), limitantes climáticas y limitaciones del suelo en la zona radical (relacionado a la salinidad, alcalinidad, escasa profundidad, fertilidad, entre otras variables). Esta clasificación consiste en un ordenamiento que permite identificar el comportamiento, las características, las potencialidades y las limitaciones de los suelos para el uso agrícola, ganadero y forestal. Este sistema de clasificación distingue 8 clases de suelos, que indican un aumento progresivo de las limitaciones que presentan los suelos para el desarrollo de los cultivos. Las primeras 4 categorías incluyen los suelos aptos para el desarrollo de los cultivos, a partir de la categoría 5 encontramos suelos poco productivos. Dado que los parches de bosque remanentes de la región sólo se encuentran dentro de las categorías de uso VI y VII, y que algunos sitios bajo uso agrícola y ganadero también pueden encontrarse en este tipo de suelos (Suelos bajo uso principalmente ganadero) (IDECOR, 2020), se seleccionaron sitios que presentaban distintos usos dentro de estas categorías. Esta categorización nos permite así seleccionar suelos relativamente homogéneos que se encuentren bajo distintos usos. Además, cuantificamos las principales variables del suelo para cada sitio con fines descriptivos: textura, pH, materia orgánica, nitrógeno total, resistencia a la penetración a 10 cm de profundidad y densidad aparente del suelo superficial (0-10 cm). Dentro de las coberturas seleccionadas, cuatro sitios corresponden a bosques bajo uso ganadero, mientras que el resto de los cinco sitios corresponden a ecosistemas manejados con distintas intensidades de uso agrícola y ganadero (**Tabla 1**) (Anexo I).

*Tabla 1: Descripción de los usos actuales e históricos, capacidad de uso y caracterización de los suelos correspondientes a los sitios de muestreo. C: Carbono, N: Nitrógeno, DA: Densidad Aparente, RP: Resistencia a la Penetración. B: Bosques bajo uso ganadero, AG: Agrícola (Granos), AGF: Agrícola (Granos y Forraje), P: Pastura.*

Sitio	Uso actual e histórico	Capacidad de uso del suelo	Características del suelo	
B1	Bosque relativamente cerrado con carga vacuna.	VII	% Arcilla	16,255
			% C	2,398
			N (g kg <sup>-1</sup> )	1,51
			DA (g cm <sup>-3</sup> )	1,2706
			RP (MPa)	6,124
			pH	5,1
B2	Bosque cerrado con carga equina.	VI	% Arcilla	27,317
			% C	3,838
			N (g kg <sup>-1</sup> )	2,39

			DA (g cm <sup>-3</sup> )	1,22
			RP (MPa)	4,163
			pH	5,1
B3	Bosque cerrado con carga equina. Desmontado hace ~40 años, recuperación desde 1989.	VI	% Arcilla	23,286
			% C	2,545
			N (g kg <sup>-1</sup> )	1,22
			DA (g cm <sup>-3</sup> )	1,37
			RP (MPa)	4,828
			pH	5,5
B4	Bosque relativamente cerrado con carga vacuna. Disminución de la carga vacuna desde 2010.	VII	% Arcilla	36,288
			% C	3,311
			N (g kg <sup>-1</sup> )	1,89
			DA (g cm <sup>-3</sup> )	1,29
			RP (MPa)	7,885
			pH	6,01
AGF1	Agrícola (Granos y Forraje): trigo, maíz, alfalfa (Desde 2015)	VII	% Arcilla	27,053
			% C	1,058
			N (g kg <sup>-1</sup> )	1,09
			DA (g cm <sup>-3</sup> )	1,44
			RP (MPa)	5,819
			pH	6,96
AGF2	Agrícola (Granos y Forraje): trigo, maíz, alfalfa (Desde 2015)	VI	% Arcilla	19,631
			% C	0,756
			N (g kg <sup>-1</sup> )	0,88
			DA (g cm <sup>-3</sup> )	1,45
			RP (MPa)	7,187
			pH	5,95
P1	Ganadero con pastura implantada.	VI	% Arcilla	27,946
			% C	3,349
			N (g kg <sup>-1</sup> )	1,76
			DA (g cm <sup>-3</sup> )	1,25
			RP (MPa)	15,371
			pH	6,6
AG1	Agrícola (Granos): trigo, maíz, soja, sorgo	VII	% Arcilla	22,665
			% C	2,149
			N (g kg <sup>-1</sup> )	1,72
			DA (g cm <sup>-3</sup> )	1,32
			RP (MPa)	4,098
			pH	5,23
AG2	Agrícola (Granos): trigo, maíz, soja, sorgo	VI	% Arcilla	28,329
			% C	1,843
			N (g kg <sup>-1</sup> )	1,37
			DA (g cm <sup>-3</sup> )	1,37
			RP (MPa)	5,613
			pH	5,34

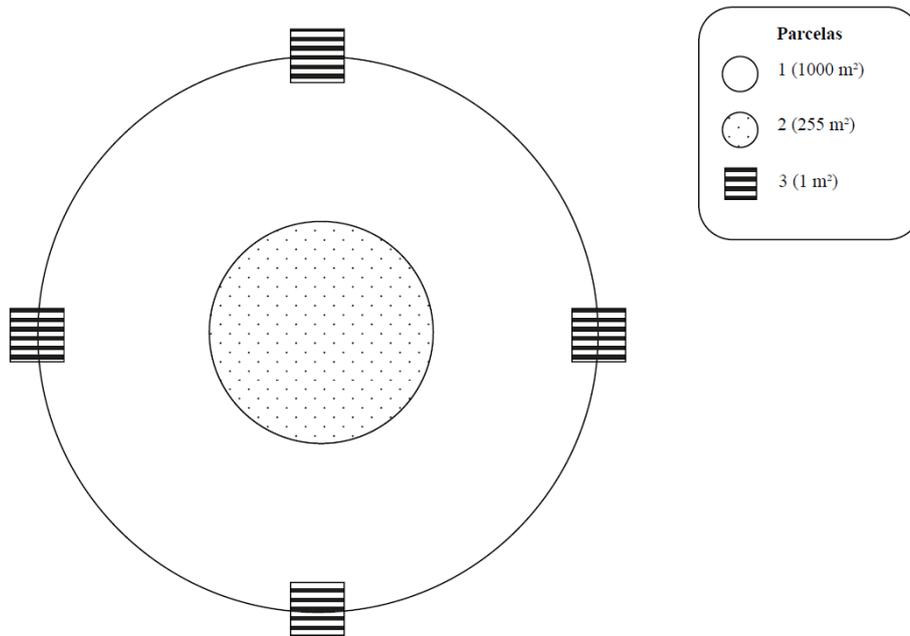
En cada uno de los sitios registramos diversas variables de estructura de la vegetación, asumiendo que estas reflejan la intensidad del uso productivo en el sitio. La estructura de la vegetación es definida como el patrón espacial de distribución de estratos, coberturas y diversidad de la comunidad vegetal (Barkman, 1979; Rangel y Velásquez, 1997). Se delimitó una parcela circular de 30 m de diámetro dentro de cada lote, donde se registraron las siguientes variables estructurales: broza acumulada, número de especies presentes, altura de la vegetación y cobertura de suelo desnudo. Estas variables fueron registradas en 15 puntos sobre una transecta de faja de 30 m de largo por 1 m de ancho; en cada punto se registró la altura utilizando una pértiga telescópica, y visualmente el porcentaje de suelo desnudo utilizando en una cuadrata de 1x1 m establecida a lo largo de la parcela. En la misma cuadrata se colectó la broza acumulada para su posterior secado y pesado. En cada uno de los sitios llevamos a cabo censos florísticos, registrando la identidad y porcentaje de cobertura de todas las especies de plantas vasculares presentes por estrato, de acuerdo a la metodología propuesta por Cabido y col. (1993). A partir de las variables de vegetación generamos un gradiente de estructura de la vegetación, asociado a distintas intensidades de uso.

#### *Estimación de biomasa y carbono*

En cada sitio delimitamos parcelas concéntricas de acuerdo a la metodología propuesta por el Inventario Nacional de Bosques Nativos (Secretaría de Gobierno de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, 2019) (**Figura 3**). El diseño consiste en una parcela principal de 1000 m<sup>2</sup> (parcela principal), dentro de la cual se evaluaron los datos biométricos de todos los individuos leñosos con diámetro a la altura del pecho (DAP) mayor a 10 cm. Dentro de la parcela principal se proyectó otra parcela concéntrica (parcela secundaria) de 255 m<sup>2</sup> donde registramos los datos biométricos de todas las especies leñosas entre 5 y 10 cm de diámetro de fuste. Finalmente establecimos una tercera serie de 4 sub-parcelas adicionales de 1 m<sup>2</sup> en los extremos N, S, E y O de la parcela principal, donde contabilizamos individuos leñosos menores a 5 cm de diámetro, y cosechamos la vegetación herbácea y la broza acumulada presente en la totalidad de la parcela.

En cada parcela medimos diversas variables biométricas de individuos leñosos, incluyendo altura (H) con una pértiga telescópica, el área de copa (AC), midiendo el eje de copa más largo y su perpendicular para estimar el área total utilizando una cinta métrica, el diámetro del fuste a la altura del pecho (DAP) y el diámetro del fuste a 10 cm del suelo (DAB) (Conti

y col., 2019). Las variables evaluadas en cada individuo dependieron de la bioforma del mismo y de la factibilidad de medirlas con precisión. En función de las variables registradas para cada individuo, utilizamos los modelos alométricos propuestos por Chave y col. (2014) y Conti y col. (2019). Los modelos estiman la biomasa individual seca (kg), que luego se adiciona para todos los individuos presentes en la parcela y se extrapola a una hectárea.



*Figura 3: Diagrama del diseño de muestreo. Referencias: 1. Parcela principal. 2. Parcela Secundaria. 3. Sub-parcelas.*

Calculamos la cantidad de C almacenado en la biomasa leñosa multiplicando el valor de biomasa seca obtenido por un factor de conversión fijado en 0,5, que corresponde, de modo general, a la fracción de C contenida en la materia orgánica viva (Brown, 1997). Para estimar el C almacenado en la biomasa herbácea y broza, secamos el material recolectado en las sub-parcelas (descritas en la Figura 3) en estufa de circulación forzada a 80° hasta peso constante, y obtuvimos el peso seco total por sub-parcela. Luego extrajimos una submuestra de material (con peso variable entre 1,5 y 2,5 g) que fue molida e incinerada en mufla a 500°C por 4 h para estimar el porcentaje de C (Gallardo y Merino, 1993). Multiplicamos el peso seco total de cada sub-parcela el contenido de C de la muestra asociada, obteniendo el C total en el material de cada sub-parcela. Finalmente, promediamos estos valores y los extrapolamos a la unidad de stock de C más usada en la literatura (Mg C ha<sup>-1</sup>).

Extrajimos además una muestra de suelo en cada una de las sub-parcelas, para lo cual consideramos distintos intervalos de profundidad (0-10 cm, 10-30 cm, 30-60 cm, 60-100 cm). Combinamos las muestras para obtener una muestra compuesta por sitio. Secamos

muestras compuestas a temperatura ambiente y las tamizamos en tamiz de 2 mm. Para estimar el contenido de C orgánico utilizamos el procedimiento de Walkley y Black (Nelson y Sommers, 1996). Para obtener el stock final de C, multiplicamos este valor por la densidad aparente por profundidad del suelo, calculada a partir de la ecuación de Heuser (2005) correspondiente a suelos molisoles. Modelamos los valores de densidad aparente en profundidad en función de los resultados obtenidos para los primeros 10 cm de suelo, dado la dificultad para obtener una muestra intacta de suelo en profundidad. Por último, corregimos los valores del reservorio de C en el suelo por masa equivalente, de acuerdo a la metodología propuesta por Ellert y Bettany (1995) y Haden et al (2020). Para finalizar, extrapolamos los valores de todos los reservorios de C obtenidos a unidad de stock de C ( $\text{Mg C ha}^{-1}$ ).

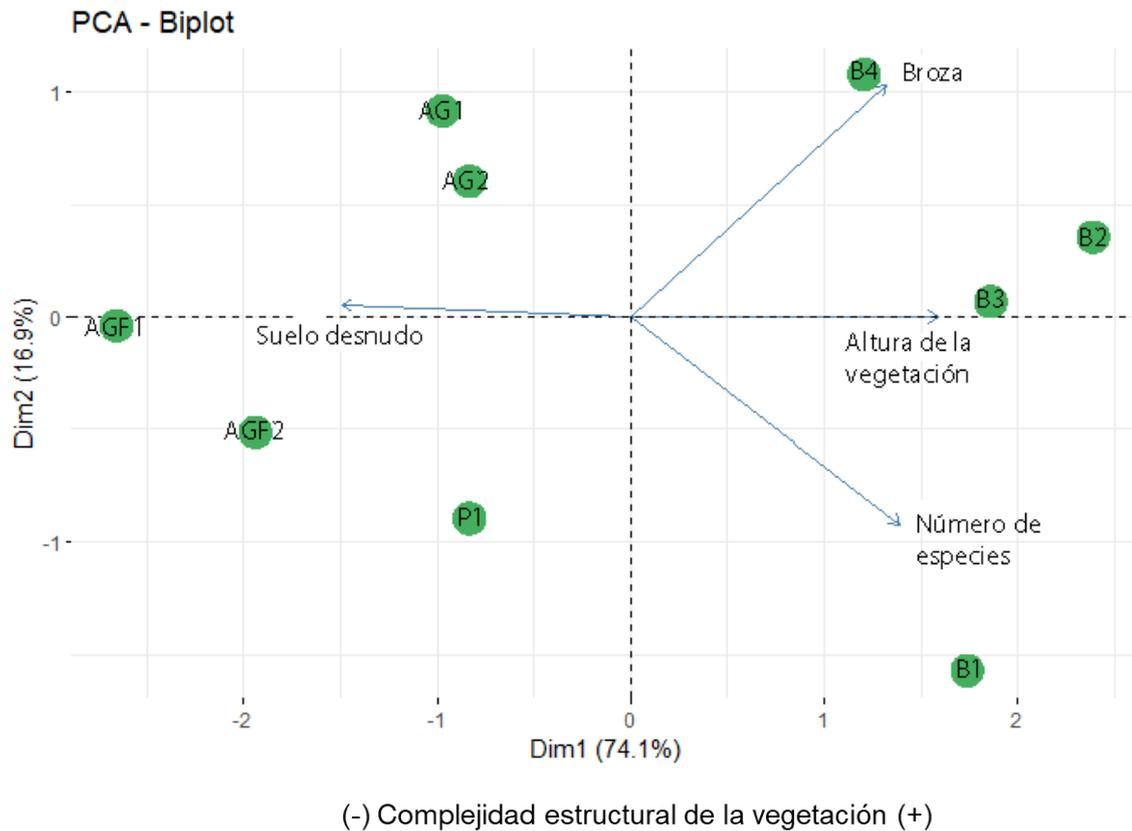
### Análisis estadístico

Efectuamos los análisis estadísticos con R statistical software v 4.1.2. Los datos de estructura de la vegetación se sometieron a un análisis de componentes principales (ACP) de tal manera de ordenar los sitios de acuerdo a un gradiente de estructura y complejidad de la vegetación asociada a la intensidad de uso. Analizamos estadísticamente los datos de C obtenidos, tanto en cada reservorio por separado, como el total de C en el ecosistema, a través de análisis de regresión a lo largo del eje generado por el ACP realizado, siguiendo modelos lineales simples. Además, analizamos los datos para los supuestos de normalidad con el paquete ‘dplyr’ (Wickham y col., 2023) y heterogeneidad de varianzas con el paquete ‘lmtest’ (Zeileis y Hothorn, 2002). Para la corrección de masa equivalente se utilizaron los paquetes ‘openxlsx’ (Schauberger y Walker, 2019) y ‘tidyr’ (Wickham y Henry, 2019).

## Resultados

### Gradiente de estructura de la vegetación

El análisis de componentes principales permitió generar un ordenamiento de los sitios seleccionados en función de las variables de estructura medidas (Fig 4). Las variables seleccionadas para este análisis fueron: broza acumulada, número de especies, altura de la vegetación y suelo desnudo. El eje 1 del ACP explica el 74,1% de la variabilidad de los sitios en función de las variables de estructura medidas, agrupando los bosques hacia la derecha del eje y el resto de las comunidades hacia la izquierda del mismo (**Figura 4**). El eje 1 está explicado principalmente por la altura de la vegetación (que aumenta hacia la derecha) y el porcentaje de suelo desnudo (que muestra un aumento hacia la izquierda). Siendo la estructura de los primeros de mayor complejidad respecto a los segundos.



*Figura 4: Biplot del análisis de componentes principales (ACP). Referencias: B: Bosques bajo uso ganadero, AG: Agrícola (Granos), AGF: Agrícola (Granos y Forraje), P: Pastura.*

### Carbono almacenado en ecosistemas del Espinal de Córdoba

La magnitud de los reservorios de C en los distintos compartimentos de los ecosistemas más representativos del Espinal de Córdoba se encuentran en la **Tabla 2**. Estos bosques tienen la

potencialidad de almacenar entre 173 y 43 Mg C ha<sup>-1</sup> en el ecosistema, dependiendo del tipo de uso. Encontramos que el C almacenado en la vegetación representó en promedio un 9% (0.7 -23%) del C ecosistémico total, mientras que el suelo constituyó en promedio el 90% del C ecosistémico (76-98%). El 63% del C almacenado en promedio en la profundidad total de 1 m se encontró entre los primeros 30 cm de suelo en todos los sitios y tipos de uso.

**Tabla 2: Cantidad de carbono almacenado en los distintos compartimentos de cada sitio. Referencias: B: Bosques bajo uso ganadero, AG: Agrícola (Granos), AGF: Agrícola (Granos y Forraje), P: Pastura.**

Sitio	Stock C ecosistémico (Mg/ha)	Stock C vegetación total (Mg/ha)	Stock C leñosas (Mg/ha)	Stock C herbáceas (Mg/ha)	Stock C broza (Mg/ha)	COS 0-100 cm (Mg/ha)	COS 0-10 cm (Mg/ha)	COS 10-30 cm (Mg/ha)	COS 30-60 cm (Mg/ha)	COS 60-100 cm (Mg/ha)
B1	109,84	12,83	10,41	0,82	1,60	97,01	30,47	27,24	21,33	12,20
B2	173,03	32,90	29,37	0,70	2,83	140,13	49,35	51,63	24,61	14,53
B3	88,46	21,00	16,56	1,47	2,98	67,45	19,61	26,58	15,23	6,02
B4	168,71	24,33	21,60	0,91	1,82	144,38	42,77	58,91	35,42	7,28
AGF1	52,30	2,68	0	2,32	0,36	49,62	13,40	19,14	10,35	6,73
AGF2	43,49	0,62	0	0,44	0,17	42,87	9,50	14,82	9,04	9,52
P1	121,90	0,89	0	0,56	0,33	121,00	42,97	40,61	22,30	15,13
AG1	169,20	2,18	0	0,09	2,08	167,02	27,39	36,09	43,58	59,96
AG2	100,72	5,57	0	4,00	1,56	95,16	23,37	37,87	21,01	12,90

### Carbono almacenado a lo largo del gradiente de estructura de la vegetación

#### i. Reservorios de carbono en la vegetación

Para el reservorio de C en la vegetación total (incluyendo el C almacenado en vegetación leñosa, herbácea y broza acumulada) encontramos una relación positiva y estadísticamente significativa con el gradiente de estructura de la vegetación, alcanzando un valor máximo en el sitio B2 de 32,90 Mg C ha<sup>-1</sup>, y un mínimo en AGF2 de 0,62 Mg C ha<sup>-1</sup> (R<sup>2</sup> = 0,74; p = 0,002) (**Figura 5.A**).

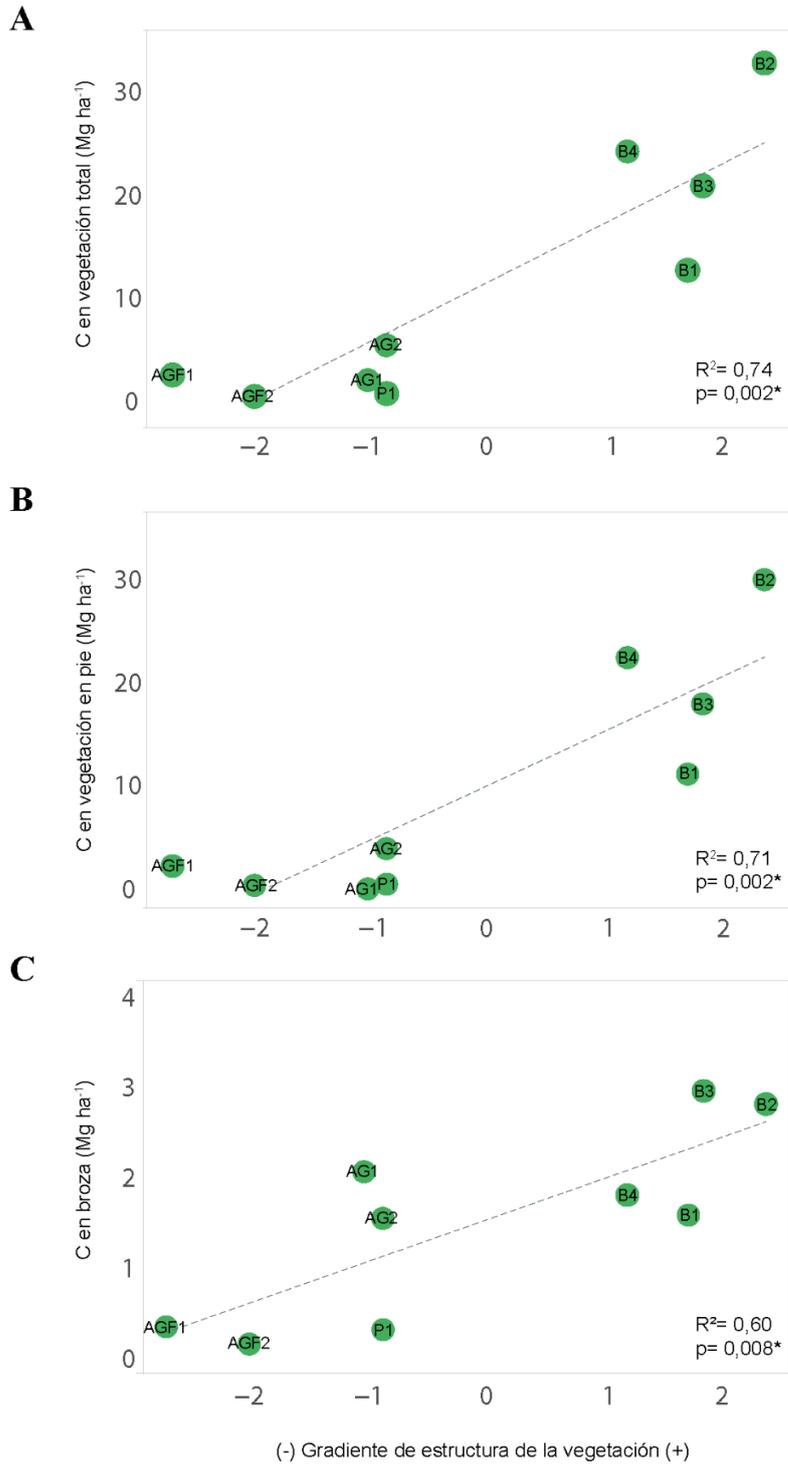
El C almacenado en la vegetación en pie (que incluye los reservorios en la biomasa arbórea, arbustiva y herbácea) se relacionó positiva y significativamente con el gradiente de estructura de la vegetación (R<sup>2</sup>=0.71, P= 0.002) (**Figura 5.B**). Este compartimento presentó

una mayor cantidad de C en bosques respecto a los sitios bajo uso intensivo, siendo el valor de B2 (el sitio con mayor cantidad de C) 300 veces mayor al de AG1 (el sitio con menor cantidad de C almacenado).

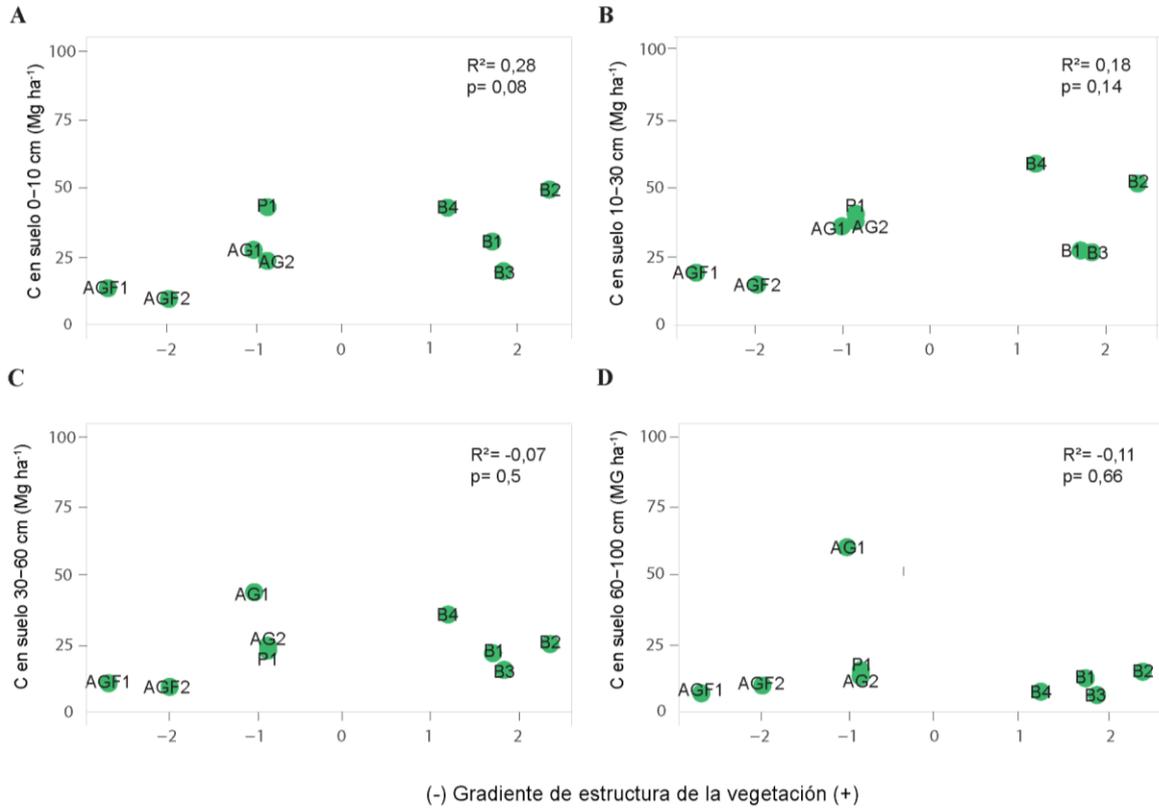
Por otra parte, el análisis de regresión lineal entre el carbono almacenado en la broza y el gradiente de estructura de la vegetación mostró una correlación positiva y estadísticamente significativa ( $R^2= 0.60$ ,  $P= 0.008$ ), siendo el stock de C en el sitio B3 17 veces mayor que en el sitio AGF2 (**Figura 5.C**).

ii. Reservorios de carbono orgánico del suelo (COS)

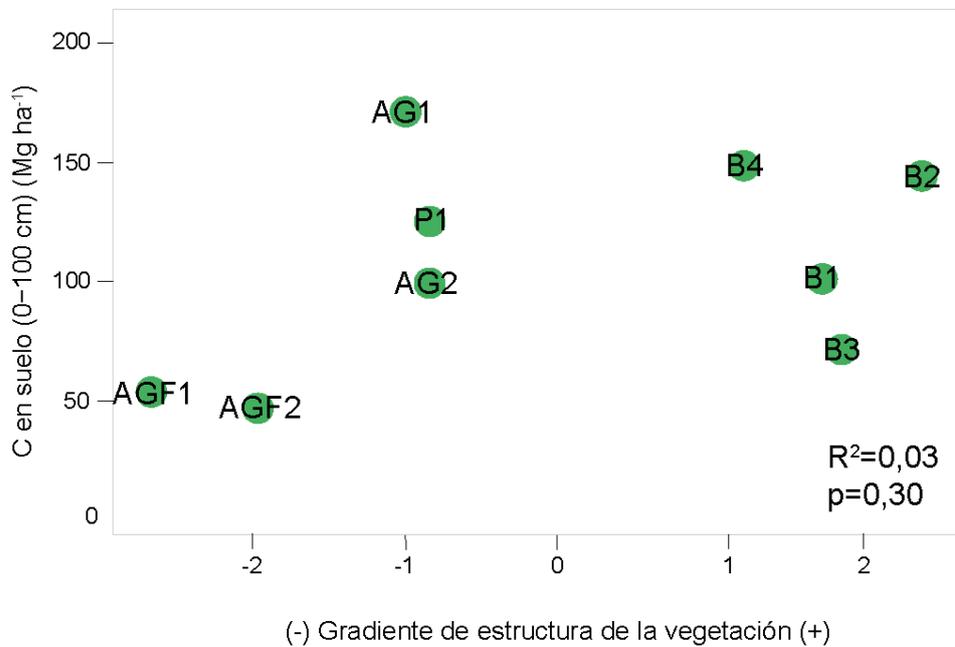
Los reservorios de COS fueron muy variables dentro de los mismos tipos de uso (**Tabla 2**). El valor más alto de COS en las capas superficiales (0 a 30 cm) se encontró en el sitio B4, siendo 4 veces mayor que lo encontrado en el sitio AGF2, que presentó el menor stock de C. Por otra parte, AG1 fue el sitio con la mayor cantidad de C almacenado en las capas inferiores del suelo (30 cm a 100 cm), cuyo stock de C fue 5 veces mayor que el encontrado en AGF1, el sitio con menor cantidad de C. Para la profundidad total de suelo almacenado, se encontró un valor 4 veces mayor en el sitio AG1 en comparación con AGF2, que presentó el menor stock de COS. Los análisis de regresión lineal entre la cantidad de COS y el gradiente no fueron significativos, tanto si se consideran las distintas profundidades individualmente (**Figura 6**) como considerando la profundidad total analizada (**Figura 7**).



**Figura 5: Regresiones lineales entre el carbono almacenado en los compartimentos de biomasa vegetal (Mg/ha) y el gradiente de estructura de la vegetación. 5A: Reservorio de C en la vegetación total (incluyendo biomasa leñosa, herbácea y broza). 5B: Reservorio de C en la vegetación en pie (incluyendo biomasa leñosa y herbácea). 5C: Reservorio de C en la broza. Referencias: B: Bosques bajo uso ganadero, AG: Agrícola (Granos), AGF: Agrícola (Granos y Forraje), P: Pastura.**



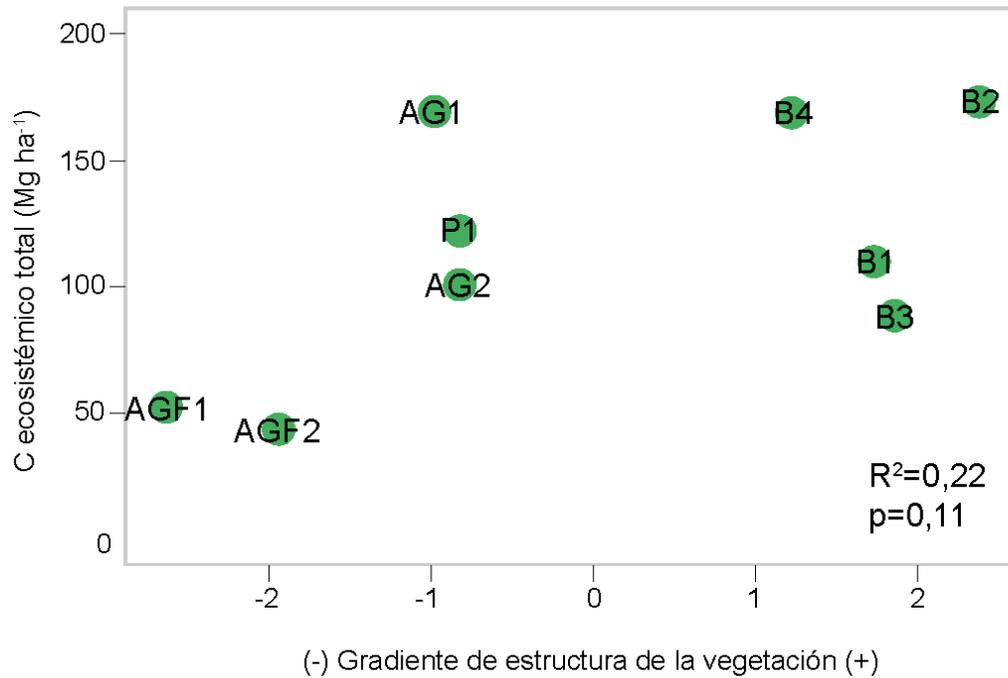
**Figura 6: Regresión lineal entre el carbono almacenado en suelo (Mg ha<sup>-1</sup>) y el gradiente de estructura de la vegetación.** 6A: C almacenado a los 0-10 cm de profundidad. 6B: C almacenado a los 10-30 cm de profundidad. 6C: C almacenado a los 30-60 cm de profundidad. 6D: C almacenado a los 60-100 cm de profundidad. Referencias: B: Bosques bajo uso ganadero, AG: Agrícola (Granos), AGF: Agrícola (Granos y Forraje), P: Pastura.



**Figura 7: Regresión lineal entre el carbono almacenado en 1 m de profundidad del suelo (Mg ha<sup>-1</sup>) y el gradiente de estructura de la vegetación.** Referencias: B: Bosques bajo uso ganadero, AG: Agrícola (Granos), AGF: Agrícola (Granos y Forraje), P: Pastura.

Carbono almacenado en el ecosistema a lo largo del gradiente de estructura de la vegetación.

En concordancia con los patrones encontrados en el suelo, el análisis de regresión lineal entre el C total del ecosistema y el gradiente de estructura de la vegetación no fue estadísticamente significativo ( $R^2= 0.22$ ,  $P= 0.11$ ) (**Figura 8**). Por otro lado, el sitio B2 presentó el mayor reservorio de C, con un valor 4 veces mayor al sitio AGF2, el cual mostró los valores más bajos de C ecosistémico.



*Figura 8: Regresión lineal entre el carbono almacenado en el ecosistema (Mg ha<sup>-1</sup>) (incluyendo todos los compartimentos de vegetación y suelo) y el gradiente de estructura de la vegetación. Referencias: B: Bosques bajo uso ganadero, AG: Agrícola (Granos), AGF: Agrícola (Granos y Forraje), P: Pastura.*

## Discusión

Los resultados del presente trabajo muestran el potencial de estos ecosistemas como sumideros de C, considerando principalmente los pocos relictos de vegetación nativa existentes en el Espinal de Córdoba, dada su historia de explotación y manejo antrópico. Sin embargo, los ecosistemas asociados a distintas intensidades de uso, no presentaron variaciones significativas en relación al C ecosistémico total principalmente debido a la existencia de un reservorio de gran magnitud relativa en el suelo, pero muy variable independientemente del tipo de comunidad vegetal.

En relación a los antecedentes existentes de cuantificación de C en los distintos reservorios, los valores de C encontrados en la vegetación leñosa de los bosques analizados (20,24 Mg C ha<sup>-1</sup> en promedio) son menores a los encontrados por Ledesma y col., (2021) y Sione y col., (2021) (en promedio 43,99 y 38,82 Mg C ha<sup>-1</sup>, respectivamente) en bosques del Espinal entrerriano. Además, el stock de C en la vegetación leñosa fue, en general, menor al reportado por Gonzalez-Roglich y col., (2014) para bosques abiertos del distrito del Caldén (20,9 Mg C ha<sup>-1</sup>). Esto podría relacionarse con el uso actual de los bosques muestreados en este trabajo que, a diferencia de los trabajos citados, se encuentran bajo presión ganadera en cargas variables (ver **Tabla 1**) y no necesariamente representan los bosques en mejor estado de conservación.

Respecto al stock de COS, encontramos en promedio para bosques un reservorio de 76,64 Mg ha<sup>-1</sup> en la profundidad de 0-30 cm, valor comparable a los encontrados por Sione y col., (2023) en bosques del Espinal entrerriano, que oscilaron entre los 56,9 y 115,2 Mg ha<sup>-1</sup> (80,5 Mg ha<sup>-1</sup> en promedio). Los valores de C hallados en esta tesina para suelos agrícolas en la profundidad de 0-30 cm (45,39 Mg C ha<sup>-1</sup>) fueron mayores a los encontrados por Basanta y Álvarez, (2015) en sistemas agrícolas de la región central de la provincia de Córdoba (38,5 Mg C ha<sup>-1</sup> en promedio), pero mostraron similitud con el promedio para cultivos anuales del Espinal descrito en el Reporte Nacional de reservas de COS para cultivos y otras plantaciones (Peri y col., 2022) de 45,65 Mg C ha<sup>-1</sup>.

Nuestros resultados muestran que, contrario a lo esperado, el C ecosistémico presente en los sitios seleccionados no muestra una disminución a lo largo del gradiente de estructura de la vegetación. Esto se debe a que, si bien el C almacenado en la vegetación disminuyó a lo largo del gradiente, el stock de C ecosistémico se encuentra representado principalmente por el COS, el cual se mostró más estable de lo esperado.

La disminución del C almacenado en la vegetación fue resultado de la ausencia de vegetación leñosa en los sitios bajo manejos intensivos, representando una pérdida de un 95% respecto al C almacenado en la vegetación presente en bosques bajo uso ganadero. En términos generales se ha observado en diversos ecosistemas que la conversión de los ecosistemas leñosos a sistemas bajo manejo intensivo causa una pérdida inmediata del C almacenado en la biomasa que es acompañada por la pérdida de COS debido al disturbio y remoción del suelo en el corto plazo, y a la disminución del aporte de material descomponible en el largo plazo (Don, 2011; Nosetto y col., 2023). Sin embargo, nuestros resultados indican que, al menos considerando los 9 sitios muestreados en el presente trabajo, el COS almacenado hasta el metro de profundidad parece ser más estable de lo esperado, dado que no muestra una relación significativa con el gradiente de vegetación asociado al uso al cual están sometidos. Contrario a lo esperado, observamos valores similares entre el C almacenado en los suelos de bosques, que presentaron algunos de los valores más altos para este compartimiento, y los sitios bajo uso agrícola (sitios AG). No obstante, teniendo en cuenta sólo la capa superficial del suelo (0 – 30 cm), encontramos una pérdida de COS de aproximadamente un 41% en cultivos (teniendo en cuenta AG y AGF) en comparación con los bosques. Este porcentaje es mayor que el registrado por Villarino y col. (2017) para la región del Chaco semiárido, donde los primeros 30 cm de suelo perdieron aproximadamente un 30% de COS en suelos cultivados. Por otro lado, las pasturas suelen poseer valores altos de COS en relación a los cultivos debido a la presencia de abundantes raíces y a la presencia permanente de cobertura vegetal (Don, 2011; Osinaga y col., 2018). En este sentido, encontramos un valor de COS en el sitio P1 que muestra un aumento de alrededor del 9% de COS en comparación con el promedio encontrado en bosques. Nuestros resultados muestran que los stocks de C ecosistémico en el Espinal de Córdoba no siguen el gradiente de estructura de la vegetación como era esperable. Esto se debe principalmente a los valores de COS presentes en los sistemas boscosos, que presentaron valores similares, y en algunos casos menores, a los encontrados en los sistemas agrícolas (particularmente sitios AG). Los bosques del Espinal presentan una larga historia de uso del suelo (desde el S. XVI), lo cuál podría explicar en alguna medida que el reservorio en el suelo sea similar entre bosques bajo uso ganadero y sistemas bajo uso agrícola, considerando que estos bosques podrían ser bosques secundarios regenerados en sitios muy degradados y posteriormente abandonados. Sin embargo, la falta de relación entre el COS a lo largo del gradiente está dada en primera medida por una alta variabilidad del reservorio independientemente de la

comunidad vegetal asociada. Además, los valores encontrados en este rango de variación no son necesariamente bajos, asociados a suelos empobrecidos con mucho uso, que podrían indicar un antecedente de degradación y abandono posterior. En este sentido, consideramos que probablemente las categorías de uso del suelo seleccionadas con el fin de homogeneizar el sustrato, no representan necesariamente tipos de suelo similares. Variaciones en las propiedades edáficas de los suelos pueden estar íntimamente asociadas a las variaciones en el contenido de carbono del suelo (Schimel et al. 1994). Por esto, realizamos un segundo gradiente a partir de datos de las características del suelo de los sitios muestreados (Ver Anexo I), observando una relación positiva y significativa con los reservorios de C en el suelo a todas las profundidades. Estos resultados nos plantean la necesidad no solo de aumentar el número de réplicas utilizado para abarcar la heterogeneidad de los sistemas por efecto del uso y de las propiedades del suelo, sino además el de agrupar los sitios en función de sus propiedades edáficas con el objetivo de poder separar analíticamente el factor uso del factor edáfico. En este punto, resulta interesante poder ahondar a futuro en la importancia relativa de los factores que determinan el secuestro de C en el suelo que, a la luz de los resultados encontrados, parecería ser más importante las características edáficas que la comunidad vegetal o uso asociado.

## Conclusión

Los resultados de la presente tesina permitieron cuantificar y describir detalladamente los reservorios de C en los ecosistemas más representativos del Espinal de Córdoba, aportando nuevos datos cuantitativos a un área históricamente poco estudiada. Los ecosistemas del Espinal de Córdoba almacenan entre 43,5 y 173 Mg C ha<sup>-1</sup> en la vegetación y en el suelo respectivamente (0 -100 cm de profundidad) dependiendo del tipo de manejo productivo. Como era esperable, el C del suelo constituyó el reservorio más importante en magnitud en relación al C almacenado en la vegetación (entre el 81 y el 97%). El cambio en el uso del suelo reduce drásticamente el C almacenado en la vegetación (c. 95%), mientras que el C en el suelo se mostró más estable a cambios en la cobertura y el manejo asociado. Dada la baja cobertura actual de los bosques nativos del Espinal, su conservación y recuperación es de fundamental importancia para la mitigación del cambio climático a escala regional, dado su potencial de almacenamiento de C. Por otra parte, prácticas sustentables de manejo, como la inclusión de cultivos de servicios en sitios agrícolas o la nivelación de la carga ganadera para minimizar la extracción de biomasa en bosques, pueden contribuir a restaurar los stocks de C en el Espinal.

Si bien los resultados de este trabajo muestran un impacto del cambio en el uso sobre la vegetación, este efecto no se ve reflejado en el carbono orgánico del suelo, por lo que nuevas mediciones considerando un mayor número de réplicas agrupadas en función de sus características edáficas serán necesarias para profundizar en el efecto del cambio en el uso del suelo sobre el C almacenado en sus reservorios subterráneos.

## Referencias bibliográficas

- Achim Z., y Torsten H., (2002). Diagnostic Checking in Regression Relationships. *R News* 2(3), 7-10. URL <https://CRAN.R-project.org/doc/Rnews/>
- Baldassini, P. y Paruelo, J. M. (2020). Deforestation and current management practices reduce soil organic carbón in the semi-arid Chacho, Argentina. *Agricultural Systems*, 178, 102749. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102749>
- Barkman, J.J. 1979. The investigation of vegetation texture and structure. In: M. J. Werger (ed.). *The study of vegetation*: 123-160. Junk. The Hague-Boston.
- Basanta, M. y Alvarez, C. (2015). Manejo sustentable de sistemas agrícolas en la región central de Córdoba: una experiencia de largo plazo en INTA EEA Manfredi. *Rev. investig. Agropecu.*, 41(2), 215-222. ISSN 1669-2314.
- Baumann, M., Israel, C., Piquer-Rodríguez, M., Gavier-Pizarro, G., Volante, J.N. y Kuemmerle, T. (2017) Deforestation and cattle expansion in the Paraguayan Chaco (1987-2012). *Reg Environ Change*, 17, 1179–1191. DOI 10.1007/s10113-017-1109-5.
- Bonino, E.E. (2006). Changes in carbon pools associated with a land-use gradient in the Dry Chaco, Argentina. *Forest Ecology and Management*, 223, 183–189. doi:10.1016/j.foreco.2005.10.069.
- Brown, S. (1997). *Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forests: a Primer*. FAO Forestry Paper, 134, 55.
- Cabido, M., Zeballos, S.R., Zak, M., Carranza M.L., Giorgis, M.A., Cantero, J.J. y Acosta, A.T.R. (2018). Native woody vegetation in central Argentina: Classification of Chaco and Espinal forests. *Appl Veg Sci*, 1–14. DOI: 10.1111/avsc.12369.
- Cabido, M., González, C., Acosta, A. y Díaz, S. 1993. Vegetation changes along a precipitation gradient in Central Argentina. *Vegetatio*. 109, 5-14.
- Cabrera, A.L. (1976). Regiones fitogeográficas argentinas. En: Ferreira Sobral, E.F. (Ed.), *Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería* (pp. 1-85). ACME.

- Campo, J. y Merino, A. (2016). Variations in soil carbon sequestration and their determinants along a precipitation gradient in seasonally dry tropical forest ecosystems. *Global Change Biology*, 22(5), 1942-1956.
- Catovsky, S., Bradford, M., y Hector, A. (2002). Biodiversity and ecosystem productivity: Implications for carbon storage. *Oikos*. 97. 443-448. DOI:10.1034/j.16000706.2002.970315.x.
- Céspedes-Flores, F., Bernardis, A., Fernandez, J., y col. (2009). Stock de carbono en un pastizal de *Sorghastrum setosum* (Griseb.) Hitchc en la provincia de Chaco, Argentina. *Agrotécnia*, 19, 3-7. DOI:10.30972/agr.019394
- Chave, J., Rejou-Mechain, M., Búrquez, A., y col. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20, 3177–3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
- Conti, G., Enrico, L., Casanoves, F., y Díaz, S. (2013). Shrub biomass estimation in the semiarid Chaco forest: a contribution to the quantification of an underrated carbon stock. *Annals of Forest Science*. DOI 10.1007/s13595-013-0285-9.
- Conti, G., Pérez-Harguindeguy, N., Quèrtier, F., y col. (2014). Large changes in carbon storage under different land-use regimes in subtropical seasonally dry forests of southern South America. *Agriculture, ecosystems & environment*, 197, 68-76.
- Conti G., Gorné, L. D., Zeballos, S. R., y col. (2019). Developing allometric models to predict the individual aboveground biomass of shrubs worldwide. *Global Ecology and Biogeography*, 1–15. DOI:10.1111/geb.12907.
- Don, A., Schumacher, J., y Freibauer, A. (2011). Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks – a meta-analysis. *Global Change Biology*, 17, 1658-1670. doi: 10.1111/j.1365-2486.2010.02336.x
- Ellert, B. H., y Bettany, J. R. (1995). Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Canadian Journal of Soil Science*, 75(4), 529-538. <https://doi.org/10.4141/cjss95-075>
- Fernandez PD, le Polain de Waroux Y, Jobbágy EG, y col. (2020). A hard-to-keep promise: Vegetation use and aboveground carbon storage in silvopastures of the Dry Chaco.

- Agriculture, Ecosystems & Environment, 303 (2020) 107117,  
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107117>
- Gallardo A. y Merino J. 1993. Leaf decomposition in two mediterranean ecosystems of Southwest Spain: Influence of substrate quality. *Ecology*. 74, 152-161.
- Ghida Daza, C. y Sanchez, C. (2009). Zonas agronómicas homogéneas de Córdoba. INTA.
- Gonzalez-Roglich, M., Swenson, J. J., Jobbagy, E. G. y col. (2014). Shifting carbon pools along a plant cover gradient in woody encroached savannas of central Argentina. *Forest Ecology and Management*, (331), 71–78.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2014.07.035>
- von Haden, A.C., Yang, W.H. y DeLucia, E.H. (2020). Soils' dirty little secret: Depth-based comparisons can be inadequate for quantifying changes in soil organic carbon and other mineral soil properties. *Glob Change Biol*, 26, 3759–3770. DOI: 10.1111/gcb.15124.
- Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., y col. (2013). High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, 342, 850-853.  
DOI:10.1126/science.1244693.
- Heuscher, S. A., Brandt, C. C., & Jardine, P. M. (2005). Using soil physical and chemical properties to estimate bulk density. *Soil Science Society of America Journal*, 69(1), 51-56.
- Infraestructura de Datos Espaciales de la Provincia de Córdoba (IDECOR). 2020. Cartas de Suelo para la provincia de Córdoba, escala 1:50.000.  
<https://idecor.cba.gov.ar/wpcontent/uploads/2020/07/INFORME-Mapa-Cartas-de-Suelo.pdf>.
- IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. y Midgley, P.M. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

- Jandl, R., Vesterdal, L., Olsson, M., y col. (2007). Carbon sequestration and forest management. CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources, 2(17), 1-16. doi: 10.1079/PAVSNR20072017.
- Lal, R. (2004). Carbon sequestration in dryland ecosystems. Environmental management, 33(4), 528-544. DOI: 10.1007/s00267-003-9110-9.
- Ledesma, S. G., Sione, S. M. J., Oszust, J. D. y col. (2021). Estimación del contenido y captura potencial de carbono en la biomasa arbórea de bosques nativos del Espinal (Entre Ríos, Argentina). Revista FAVE – Ciencias Agrarias, 20(1), 331-345. DOI: 10.14409/fa.v20i1.10274
- Lewis, J.P. y Collantes, M.B. (1973). El Espinal Periestépico, Ciencia e Investigación, 29, 360-377.
- Malhi, Y., Baldocchi, D. D. y Jarvis, P. G. (1999). The carbon balance of tropical, temperate and boreal forest. Plant, Cell and Environment, 22, 715-740. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.1999.00453.x>.
- Martínez-Mena, M., Alvarez Rogel, J., Castillo, V. y col. (2002). Organic carbon and nitrogen losses influenced by vegetation removal in a semiarid mediterranean soil. Biogeochemistry, 61, 309-321. DOI: 10.1023/A:1020257208048.
- Mi, J., Li, J., Chen, D. y col. (2015). Predominant control of moisture on soil organic carbon mineralization across a broad range of arid and semiarid ecosystems on the Mongolia plateau. Landscape Ecol 30, 1683–1699. <https://doi.org/10.1007/s10980-014-0040-0>
- Nanni, A. S., Piquer Rodríguez, M., Rodríguez, D y col. (2020). Presiones sobre la conservación asociadas al uso de la tierra en las ecorregiones terrestres de la Argentina. Ecología Austral, 30(2), 304–320. <https://doi.org/10.25260/EA.20.30.2.0.1056>
- Nelson, D.W. y Sommers, L.E. 1996. Total Carbon, Organic Carbon, and Organic Matter. En: Sparks, D.L. (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods. ASA, SSSA, CSSA, Madison, Wi, pp. 961-1010.

- Nosetto, M., Balducci, E., Gaitán, J. y col. (2023). Cambios en el stock de COS en bosques nativos y su relación con factores ambientales. Libro de resúmenes. XXX Reunión Argentina de Ecología. Bariloche, Argentina.
- Noy-Meir, I., Mascó, M., Giorgis, M. A., y col. (2012). Estructura y diversidad de dos fragmentos de bosque de Espinal en Córdoba, un ecosistema amenazado. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*, 47(1-2), 119-133.
- Osinaga, N. A., Álvarez, C. R. y Taboada, M. A. (2018). Effect of deforestation and subsequent land use management on soil carbon stocks in the South American Chaco. *Soil*, 4, 251-257. <https://doi.org/10.5194/soil-4-251-2018>
- Oyarzabal M., Clavijo, J., Oakley, L., y col. (2018). Unidades de vegetación de la Argentina. *Ecología Austral*, 28, 040-063. <https://doi.org/10.25260/EA.18.28.1.0.399>
- Paul, K. I., Roxburgh, S. H., Chave, J., y col (2016). Testing the generality of above-ground biomass allometry across plant functional types at the continent scale. *Global Change Biology*, 22, 2106–2124. <https://doi.org/10.1111/gcb.13201>
- Peri, P., Maradei, D., Lupi, A., Tato Vázquez, C., Gyenge, J.; Gatica, G., Sandoval, M., y Gaute, M. (2022). Reporte Nacional. Estimación de las reservas de carbono orgánico del suelo con plantaciones forestales y otros usos de la tierra, en distintas regiones de Argentina. <https://repositorio.inta.gob.ar/xmlui/handle/20.500.12123/12650>
- Post, W. M. y Kwon, K. C. (2000). Soil Carbon Sequestration and Land-Use Change Processes and Potential. *Global Change Biology*, 6, 317-327. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2486.2000.00308.x>
- Sabattini, J.A., Sabattini, R.A., Cian, J.C. y Sabattini, I.A. (2021). Carbon stock in subtropical native forests in a south american protected area. *Nature Conservation Research*, 6(2), 66–79. <https://dx.doi.org/10.24189/ncr.2021.027>.
- Schauberger, S. y Walker, A. (2019). openxlsx: Read, write and edit XLSX files. R package version 4.1.4.
- Secretaría de Gobierno de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. (2019). Segundo Inventario Nacional de Bosques Nativos: manual de campo. <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/bosques/segundo-inventario-nacionalbosques-nativos>.

Servicio Meteorológico Nacional, período 1981-2010. Estadísticas climatológicas normales.  
<https://www.smn.gob.ar/estadisticas>.

Sione, S. M. J., Wilson, M. G., Andrade, H. J., y col. (2018) Carbono almacenado en la biomasa arbórea de los bosques nativos del Espinal (Argentina). Resúmenes comunicaciones orales- UMS 2018, p 32.

Sione, S.M.J., Andrade, H.J., Wilson, M.G., Rosenberger, L.J., Sasal, M.C., Ledesma, S.G. y Gabioud, E.A. (2021). Reducción de emisiones de carbono por deforestación evitada en bosques del Espinal (Entre Ríos, Argentina). Colombia Forestal, 24 (2), 39-51

Sione, S., Wilson, M., Ledesma, S., Oszust, J., Rosenberger, J., Gabioud, E. y Cattaneo Hildt, M. (2023). Relación entre las reservas de carbono en árboles y suelos de bosques semixerofíticos del Espinal. Actas del VIII Congreso Forestal latinoamericano y V Congreso Forestal Argentino. ISBN 978-987-46815-7-7.

Schimel, D. S., Braswell, B. H., Holland, E. A., McKeown, R., Ojima, D. S., Painter, T. H., ... y Townsend, A. R. (1994). Climatic, edaphic, and biotic controls over storage and turnover of carbon in soils. Global biogeochemical cycles, 8(3), 279-293.

Viglizzo, E. F., Frank, F. C., Carreño, L. V., Jobbagy, E. G., Pereyra, H., Clatt, J., ... y Ricard, M. F. (2011). Ecological and environmental footprint of 50 years of agricultural expansion in Argentina. Global change biology, 17(2), 959-973.

Villarino, S. H., Studdert, G. A., Baldassini, P., y col. (2017). Deforestation impacts on soil organic carbon stocks in the Semiarid Chaco Region, Argentina. Science of the Total Environment, 575, 1056-1065. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.175>.

Wickham, H., Henry, L. (2019). tidy: Tidy Messy Data. R package version 1.0.0.

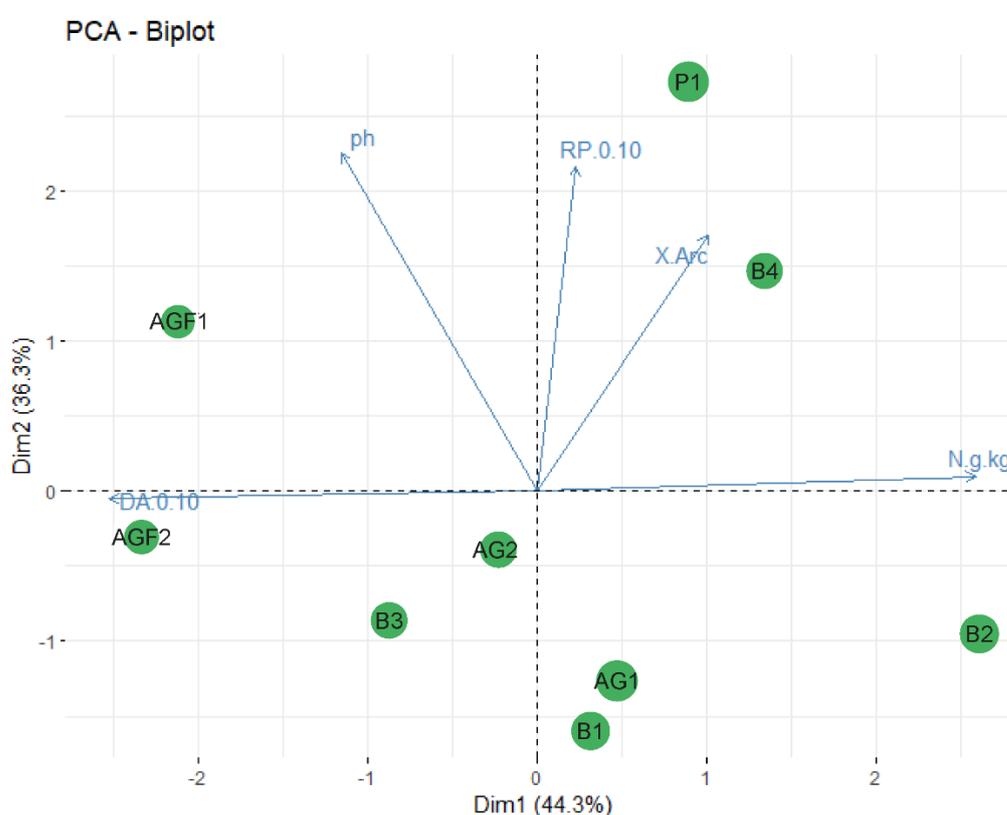
Wickham, H., François, R., Henry, L., Müller, K., Vaughan, D. (2023). `_dplyr: A Grammar of Data Manipulation_`. R package version 1.1.0, <<https://CRAN.Rproject.org/package=dplyr>>.

Zeballos, S. R., Giorgis, M. A., Cabido, M. R., y col. (2020) The lowland seasonally dry subtropical forest in central Argentina: vegetation types and a call for conservation. Vegetation Classification and Survey, 1(1), 87–102. doi: 10.1127/VCS/2019/38013

## Anexo I

### Gradiente de propiedades del suelo y C almacenado en suelo.

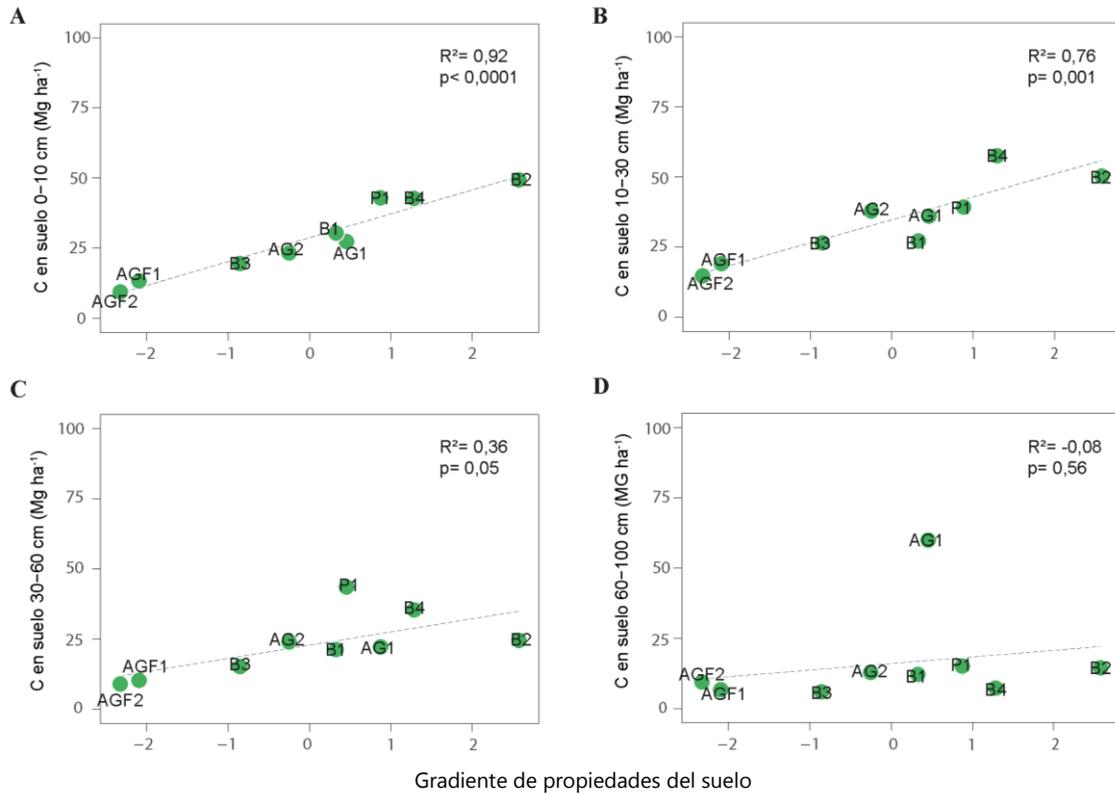
Se llevó a cabo un análisis de componentes principales (ACP) considerando las propiedades del suelo (0-10 cm): pH, Nitrógeno total ( $\text{g kg}^{-1}$ ), densidad aparente ( $\text{DA} = \text{g cm}^{-3}$ ), resistencia a la penetración, arcilla (%). Las dimensiones 1 y 2 del PCA explican el 80,6% de la variabilidad observada, correspondiendo el 44,3% al eje 1, que determina el gradiente. De esta forma, las variables con mayor peso en la configuración del gradiente son el N total y la DA (**Figura 9**).



**Figura 9: Biplot del análisis de componentes principales (ACP):** Referencias: DA: densidad aparente. ph: pH del suelo. RP: resistencia a la penetración. X.Arc: porcentaje de arcilla. N.g.kg: Nitrógeno total. B: Bosques bajo uso ganadero, AG: Agrícola (Granos), AG: Agrícola (Granos), AGF: Agrícola (Granos), AGF: Agrícola (Granos y Forraje), P: Pastura.

Las regresiones obtenidas utilizando el gradiente de características del suelo fueron estadísticamente significativas para el reservorio de C de 0-10 cm, cuyo ajuste fue de  $R^2 = 0,92$  ( $p < 0,0001$ ), al igual que para la profundidad de 10-30 cm, la cual presentó un  $R^2 = 0,76$  ( $p = 0,001$ ). No así para mayores profundidades, donde se obtuvo un  $R^2 = 0,36$  ( $p = 0,051$ ) para la profundidad de 30-60 cm, mientras que en los 60-100 cm el ajuste no fue significativo ( $p > 0,05$ ) (**Figura 10**).

El análisis realizado entre el C almacenado en la profundidad de 1 m y el gradiente de propiedades del suelo también fue estadísticamente significativo y presentó un ajuste de  $R^2= 0,70$  ( $p= 0,003$ ) (**Figura 11**). Lo mismo ocurrió con el stock de C ecosistémico total, con un valor de  $R^2= 0,83$  ( $p= 0,0003$ ) (**Figura 12**).



**Figura 10: Regresión lineal entre el carbono almacenado en suelo (Mg/ha) y el gradiente de propiedades del suelo.** 10A: C almacenado a los 0-10 cm de profundidad. 10B: C almacenado a los 10-30 cm de profundidad. 10C: C almacenado a los 30-60 cm de profundidad. 10D: C almacenado a los 60-100 cm de profundidad. Referencias: B: Bosques bajo uso ganadero, AG: Agrícola (Granos), AGF: Agrícola (Granos y Forraje), P: Pastura.

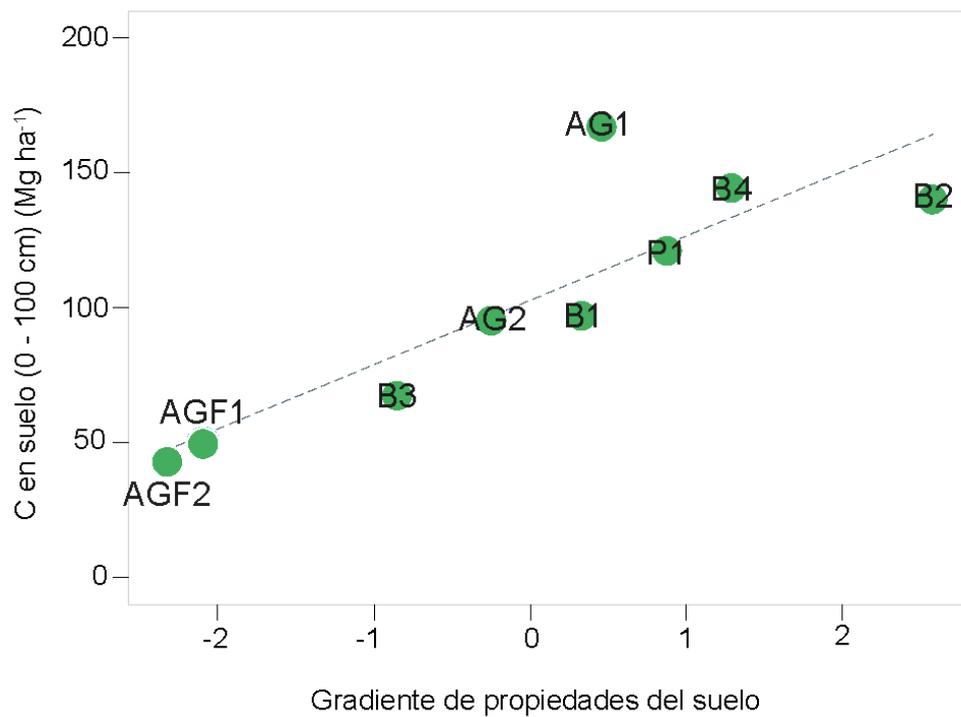


Figura 11: Regresión lineal entre el carbono almacenado en 1 m de profundidad del suelo (Mg/ha) y el gradiente propiedades del suelo. Referencias: B: Bosques bajo uso ganadero, AG: Agrícola (Granos), AGF: Agrícola (Granos y Forraje), P: Pastura.

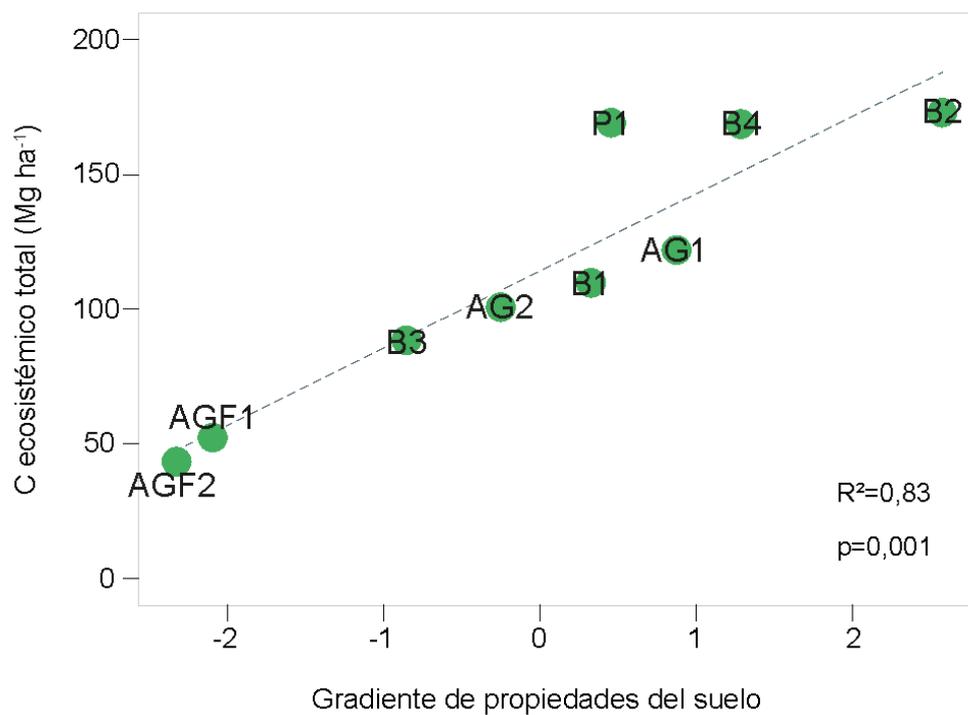


Figura 12: Regresión lineal entre el carbono almacenado en el ecosistema (Mg/ha) (incluyendo todos los compartimientos de vegetación y suelo) y el gradiente de propiedades del suelo. Referencias: B: Bosques bajo uso ganadero, AG: Agrícola (Granos), AGF: Agrícola (Granos y Forraje), P: Pastura.

Fotos de los sitios



*Ilustración 1: Bosque 1.*



*Ilustración 2: Bosque 2.*



*Ilustración 3: Bosque 3.*



*Ilustración 4: Bosque 4.*