



Estancia Ralicó

Modelado preliminar del Cambio en el Carbono Orgánico del Suelo

Contenido

1.	Introducción	2
1.1.	Descripción del sitio de estudio.....	2
1.2.	Descripción del modelo RothC y variables de entrada requeridas	3
2.	Objetivos y alcances	4
2.1.	Objetivo general	4
2.2.	Objetivos particulares	4
3.	Metodología	4
3.1.	Obtención de variables de entrada para el modelo	4
3.2.	Delimitación de zonas homogéneas	6
3.3.	Obtención de publicaciones revisadas por pares para calibración/validación del modelo	7
3.4.	Calibración y validación del modelo	8
3.5.	Simulaciones de la captura de carbono en Ralicó	9
4.	Resultados	9
4.1.	Obtención de variables de entrada para el modelo	9
4.2.	Delimitación de zonas homogéneas	11
4.3.	Obtención de publicaciones	15
4.4.	Calibración y validación del modelo	17
4.5.	Simulaciones de la captura de carbono en Ralicó	18
5.	Conclusiones y recomendaciones	21
6.	Referencias	22
7.	Material suplementario	24
7.1.	Fotos del muestreo a campo	25

Preparó

Revisó

Aprobó

Dr. Fabio Daniel Trinco

REVISIONES

Rev.

Fecha

Modificaciones



1. Introducción

El carbono orgánico del suelo (COS) es un indicador clave de la salud del suelo y posee un gran potencial para la captura de carbono en sistemas agropecuarios. La adopción de prácticas regenerativas en ganadería combinadas con subdivisión de lotes, con un pastoreo rotativo, y con siembra de alfalfa y de verdeos de invierno tiene el potencial de aumentar el secuestro de carbono, lo que puede traducirse en beneficios ambientales y económicos, incluyendo la generación de créditos de carbono en el Mercado Voluntario de Carbono.

1.1. Descripción del sitio de estudio

Estancia Ralicó posee 15 mil hectáreas aproximadamente, ubicada en el sur oeste de la provincia de Córdoba. Las principales coberturas del suelo son bosque de caldén, zonas convertidas a agricultura o alfalfa, lagunas y la zona del casco. En el relevamiento del año 2025 se observa que el bosque posee uso ganadero, con zonas con pastoreo continuo (extensivo) y otras con pastoreo rotativo. Los otros usos que predominan son agrícola, alfalfa o verdeos (Figura 1).

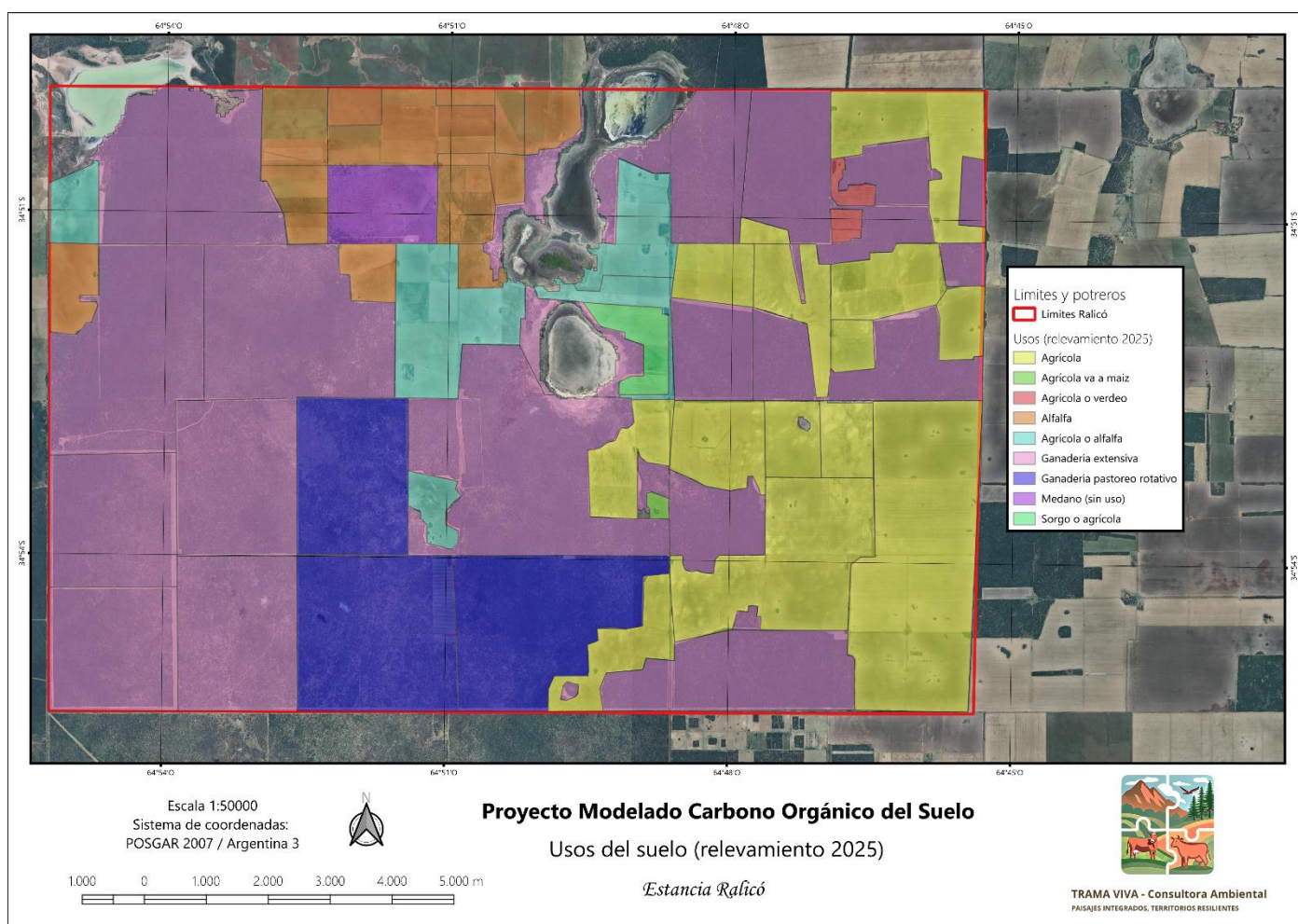


Figura 1: Mapa de usos del suelo Estancia Ralicó

El proyecto para la generación de créditos de carbono tiene como objetivo incrementar el contenido de COS a lo largo de por lo menos 20 años. Se espera obtener un incremento en el contenido del COS a partir de la implementación de las siguientes prácticas SSM (Sustainable Soil Management):

- 1) Una modificación en el manejo ganadero del establecimiento, pasando de pastoreo continuo a pastoreo rotativo en la zona de bosque.
- 2) Transición y permanencia de ciertos lotes a alfalfa y a ser manejados con pastoreo rotativo.

El uso ganadero histórico consistió en el pastoreo continuo y selectivo (ganado). El modelo de ganadería utilizado en ausencia del proyecto se caracterizaba por el uso tanto de vegetación nativa (bosque de caldén) como lotes implantados con alfalfa bajo un esquema de pastoreo continuo.

Desde abril de 2022 se ha iniciado una transición a un pastoreo rotativo en algunas zonas del bosque de caldén como en algunos lotes de alfalfa. Estas son las actividades que hacen que el proyecto sea elegible para certificar la captura de carbono bajo el estándar VCS, ya que reducen las emisiones netas de gases de efecto invernadero (GHG) en pastizales al aumentar las existencias de carbono en los suelos.

El objetivo del presente informe es generar un modelado preliminar de las potenciales capturas de carbono a partir de la implementación de prácticas SSM. Para ello se propone la utilización del modelo RothC - Modelo de Carbono Rothamsted (Coleman et al., 2024) - para estimar las capturas de carbono en el suelo. Este modelo ha mostrado su utilidad en sistemas ganaderos y agrícolas en diversas regiones (Gottschalk et al., 2012; Jebari et al., 2021; Jordon & Smith, 2022; Liu et al., 2011; Prudil et al., 2023; Studdert et al., 2011).

1.2. Descripción del modelo RothC y variables de entrada requeridas

“El carbono orgánico del suelo se divide en cuatro compartimentos activos y una pequeña cantidad de materia orgánica inerte (IOM). Los cuatro compartimentos activos son el material vegetal descomponible (DPM), el material vegetal resistente (RPM), la biomasa microbiana (BIO) y la materia orgánica humificada (MHU). Cada compartimento se descompone mediante un proceso de primer orden con su propia velocidad característica. El compartimento IOM es resistente a la descomposición. La estructura del modelo se muestra en la Figura 2.” (Coleman et al., 2024)

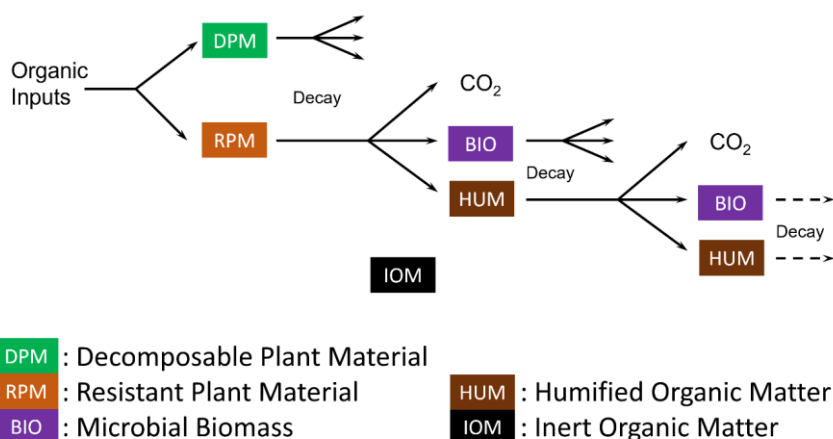


Figura 2: Estructura del modelo de Carbono Rothamsted. Figura tomada de Coleman et al. (2024)

El modelo RothC requiere las siguientes variables de entrada para simular el contenido de carbono en el suelo (Coleman et al., 2024):

- ✓ Precipitación mensual (mm)
- ✓ Evapotranspiración mensual (mm)
- ✓ Temperatura promedio de cada mes (°C)
- ✓ Contenido de arcilla (%)
- ✓ Relación DPM/RPM (relación material vegetal descomponible / resistente)
- ✓ Períodos de suelo desnudo (x meses)
- ✓ Aportes mensuales de residuos vegetales (t C ha-1)
- ✓ Aportes mensuales de abonos (t C ha-1)



2. Objetivos y alcances

2.1. Objetivo general

Modelar el Carbono Orgánico del Suelo (COS) de manera preliminar a lo largo del proyecto con un modelo RothC previamente calibrado para establecer la línea base y evaluar el impacto potencial del manejo regenerativo sobre el COS.

2.2. Objetivos particulares

1. Obtención de variables de entrada para el modelo
2. Delimitación de zonas homogéneas: Delimitar zonas homogéneas según requerimientos de la metodología VM0053. Recopilar y organizar todas las variables de entrada necesarias para la corrida del modelo RothC.
3. Obtención de publicaciones revisadas por pares para calibración/validación del modelo
4. Calibración y validación del modelo: Se seguirá la metodología propuesta por FAO (2022) y adaptada según requerimientos de la certificadora VERRA: Se calibrará el modelo utilizando trabajos previos y existentes de pastoreo rotativo en la misma zona climática del proyecto.
5. Simulación de la captura de carbono: Se simulará con el modelo ya calibrado para cada zona homogénea delimitada y utilizando las variables de entrada obtenidas.

3. Metodología

3.1. Obtención de variables de entrada para el modelo

3.1.1. Datos climáticos

Datos climáticos que se obtendrán de TerraClimate (Abatzoglou et al., 2018), quienes han estimado a escala global variables climáticas, con una resolución espacial y temporal alta. De este trabajo y con la información de la localización de la estancia Ralicó se obtendrán las variables:

- a) Precipitación mensual (mm)
- b) Evapotranspiración mensual (mm)
- c) Temperatura promedio de cada mes (°C)

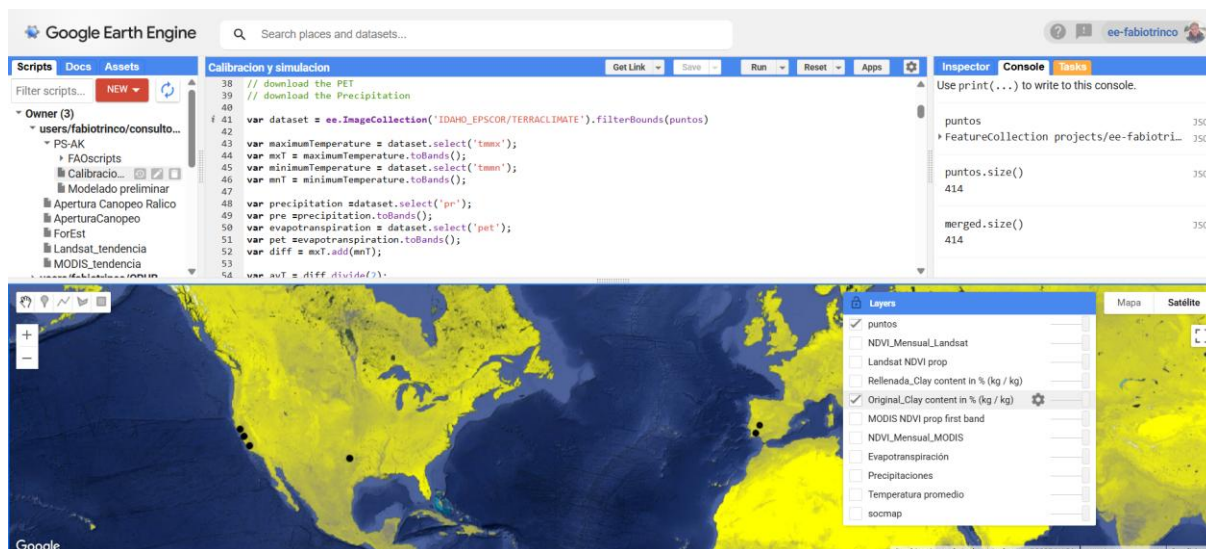


Figura 3: Interfaz de usuario de Google Earth Engine® utilizada para la extracción de datos climáticos (precipitación, temperatura, evapotranspiración) y contenido de arcilla para la calibración del modelo RothC. Esta herramienta permitió obtener datos espacialmente explícitos para cada sitio de estudio.

3.1.2. Contenido de arcilla (%)

Se utilizarán las muestras de campo existentes para este estudio tomadas en el año 2022

3.1.3. Relación DPM/RPM (relación material vegetal descomponible / resistente)

Se utilizarán los valores recomendados por los autores Coleman et al. (2024):

- Para pastizales y matorrales no mejorados, se utiliza una relación de 0,67.
- Para la mayoría de los cultivos agrícolas y pasturas mejorados, utilizamos una relación DPM/RPM de 1,44, es decir, el 59 % del material vegetal es DPM y el 41 % es RPM.

3.1.4. Períodos de suelo desnudo (meses)

Se asumirá un período de 2 meses de suelo descubierto y 10 meses cubierto bajo un manejo de pastoreo continuo. Para pastoreo rotativo se asumen 12 meses de suelo cubierto.

3.1.5. Aportes mensuales de residuos vegetales (t C ha⁻¹)

Se estimarán los aportes mensuales de residuos vegetales a partir de la productividad forrajera del campo a partir de información de campo indicada por agrónomo a cargo, tanto para alfalfa como para monte. Con información de la productividad aérea de biomasa se estimará *Cinput*s para el modelo, utilizando la siguiente ecuación:

$$C_{input} \left(\frac{tnC}{ha} \right) = ANPP \times (fsb + frs) \times fc + RZ \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

$$fsb = 1 - \alpha \times \beta \quad (\text{Ecuación 3.2})$$

$$RZ \left(\frac{tnC}{ha} \right) = ANPP \times frs \times frz \times fc \quad (\text{Ecuación 3.3})$$

Donde:

ANPP = productividad primaria neta aérea en toneladas de Materia Seca/ha

fsb = fracción de materiales vegetales sobre el suelo (factor de retención de rastrojos)

RZ = entradas de C debito a la rizodeposición (Liu et al., 2011)



α = tasa de ingesta (Liu et al., 2011)

β = digestibilidad (Jacobo et al., 2020)

frs = relación raíces/tallos en la madurez, que depende del tipo de crecimiento del pasto (Liu et al., 2011)

fc = fracción del contenido de C del material de entrada (Skjemstad et al., 2004)

frz = factor rizodeposición/raíces (Pausch & Kuzyakov, 2018)

3.2. Delimitación de zonas homogéneas

Debido a que el comportamiento de COS varía con el ambiente, suelo y manejo, se procedió a diferenciar zonas homogéneas según las principales variaciones que se observaron en la estancia Ralicó. Para ello se procedió en primer lugar a caracterizar la zona de monte ya que se observó variabilidad en cuanto a la densidad de canopeo arbóreo. Para ello se procedió a dividir de manera preliminar la zona boscosa según su apertura de canopeo, estimada a través de la banda roja del sensor Sentinel 2 (Figura 4). Luego se definieron al azar puntos de muestreo estratificados por apertura de canopeo, donde se realizó el muestreo (ver Fotos del muestreo a campo en Material suplementario). El relevamiento a campo se sistematizó en una tabla (ver ejemplo en Figura 5). Las abreviaturas utilizadas para las especies se detallan en el material suplementario (Tabla 5). Luego, mediante trabajo en gabinete, se realizó una estimación de la apertura de canopeo real del bosque basada en las fotos tomadas a campo. Finalmente se analizó de forma conjunta otras variables como precipitación, suelos, topografía, etc. a través de un Análisis Multidimensional No Métrico - NMDS por sus siglas en inglés (Oksanen, 2015) - para conocer la variabilidad de los ambientes y así definir las zonas homogéneas en las que finalmente se dividió a la zona de bosque.

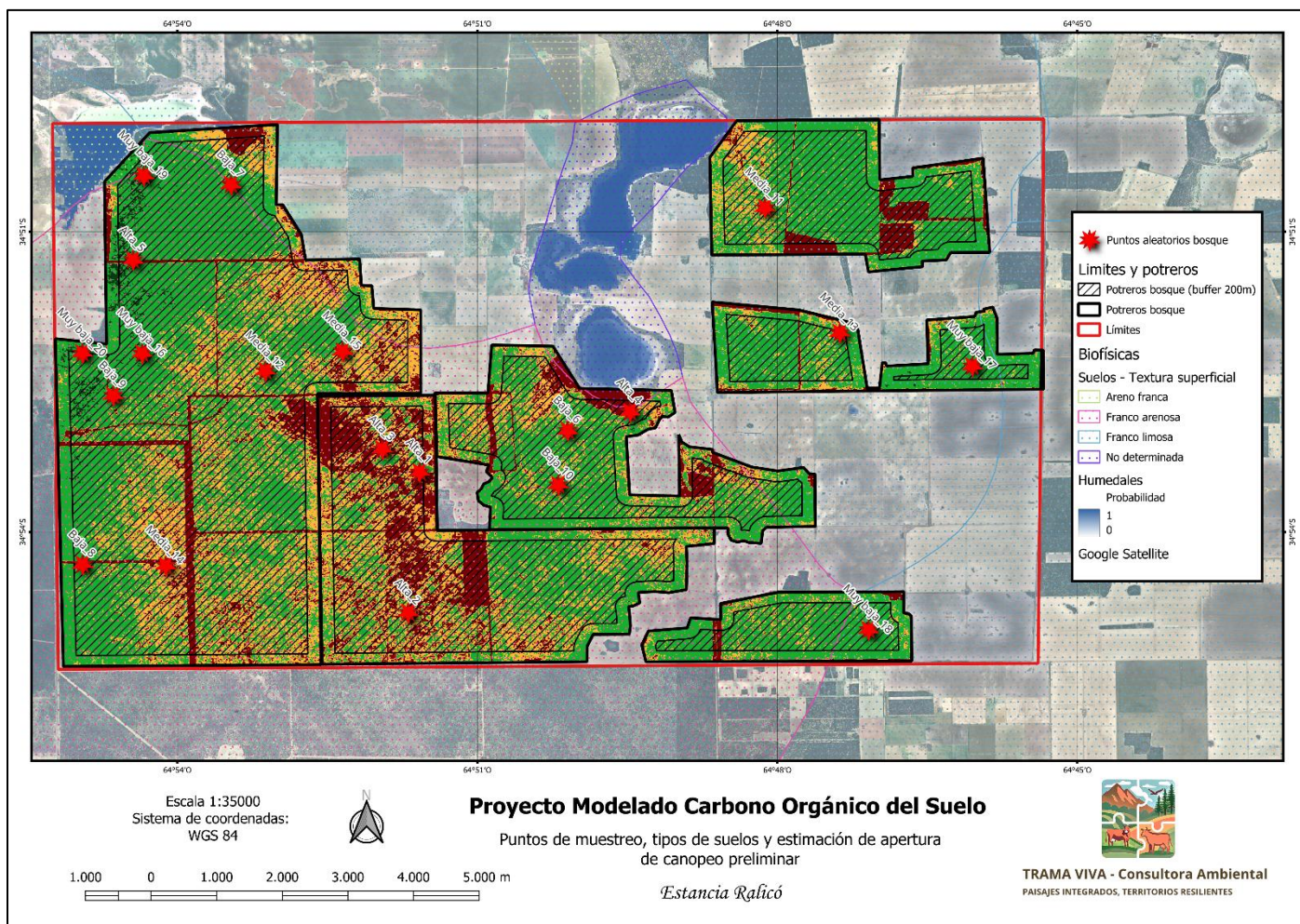


Figura 4: Puntos de muestreo, tipos de suelos y estimación de apertura de canopy preliminar

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Fecha	Hora	transecta	ApCanop_categ	ori_desdeN	distancia	0-10cmA	0-10cmB	0-10cmC	10-50cmA	10-50cmB	10-50cmC	50-200cmA	50-200cmB	50-200cmC
2	29/10/2025	10:00	Baja7_camino	Baja	252	20	clemon								
3	29/10/2025	10:00	Baja7_camino	Baja	252	40	clemon								
4	29/10/2025	10:00	Baja7_camino	Baja	252	60	m								
5	29/10/2025	10:00	Baja7_camino	Baja	252	80	setlei								
6	29/10/2025	10:00	Baja7_camino	Baja	252	100	m			clemon					
7	29/10/2025	10:00	Baja7_camino	Baja	252	320	stibra	dispi							
8	29/10/2025	10:00	Baja7_camino	Baja	252	340	m								
9	29/10/2025	10:00	Baja7_camino	Baja	252	360	clemon			clemon					
10	29/10/2025	10:00	Baja7_camino	Baja	252	380	clemon			stibra					
11	29/10/2025	10:00	Baja7_camino	Baja	252	400	m			celehr					
12	29/10/2025	10:00	Baja7_camino	Baja	252	620	m			stibra	conmic				
13	29/10/2025	10:00	Baja7_camino	Baja	252	640	m			celehr					
14	29/10/2025	10:00	Baja7_camino	Baja	252	660	m			celehr					
15	29/10/2025	10:00	Baja7_camino	Baja	252	680	m			setlei					
16	29/10/2025	10:00	Baja7_camino	Baja	252	700	schfas			schfas					
17	29/10/2025	11:03	MuyBaja19_camino	Muy baja	69	20	m								
18	29/10/2025	11:03	MuyBaja19_camino	Muy baja	69	40	setlei								
19	29/10/2025	11:03	MuyBaja19_camino	Muy baja	69	60	setlei								
20	29/10/2025	11:03	MuyBaja19_camino	Muy baja	69	80	setlei								
21	29/10/2025	11:03	MuyBaja19_camino	Muy baja	69	100	m						celehr	geodec	
22	29/10/2025	11:03	MuyBaja19_camino	Muy baja	69	320	brobre						schfas		
23	29/10/2025	11:03	MuyBaja19_camino	Muy baja	69	340	setlei			brobre			schfas		
24	29/10/2025	11:03	MuyBaja19_camino	Muy baja	69	360	setlei								
25	29/10/2025	11:03	MuyBaja19_camino	Muy baja	69	380	setlei						celehr		
26	29/10/2025	11:03	MuyBaja19_camino	Muy baja	69	400	clemon						geodec	celehr	
27	29/10/2025	11:03	MuyBaja19_camino	Muy baja	69	620	m						celehr		
28	29/10/2025	11:03	MuyBaja19_camino	Muy baja	69	640							celehr		
29	29/10/2025	11:03	MuyBaja19_camino	Muy baja	69	660				brobre			celehr		
30	29/10/2025	11:03	MuyBaja19_camino	Muy baja	69	680	bowinc			ammvis			celehr		
31	29/10/2025	11:03	MuyBaja19_camino	Muy baja	69	700	m						celehr		
32	29/10/2025	11:00	MuyBaja20	Muy baja	113	20	brobre								

Figura 5: Tabla sistematización de datos de campo

3.3. Obtención de publicaciones revisadas por pares para calibración/validación del modelo

Se procedió a recopilar bibliografía existente sobre el efecto del pastoreo rotativo sobre el carbono orgánico del suelo. Basado en información ambiental del sitio y de manejo, se realizó una búsqueda bibliográfica sobre el impacto del pastoreo rotativo en ecosistemas semi-áridos. Asimismo, luego de la primer recopilación, se

filtraron los trabajos para que coincidan con la zona climática definida según el IPCC (Reddy et al., 2019) que corresponde a la Estancia Ralicó. Dicha zona climática es *Warm Temperate Dry* (cálido templado seco, Figura 6). Por lo tanto se ha procedido a buscar datos de calibración pertenecientes a la misma zona climática.

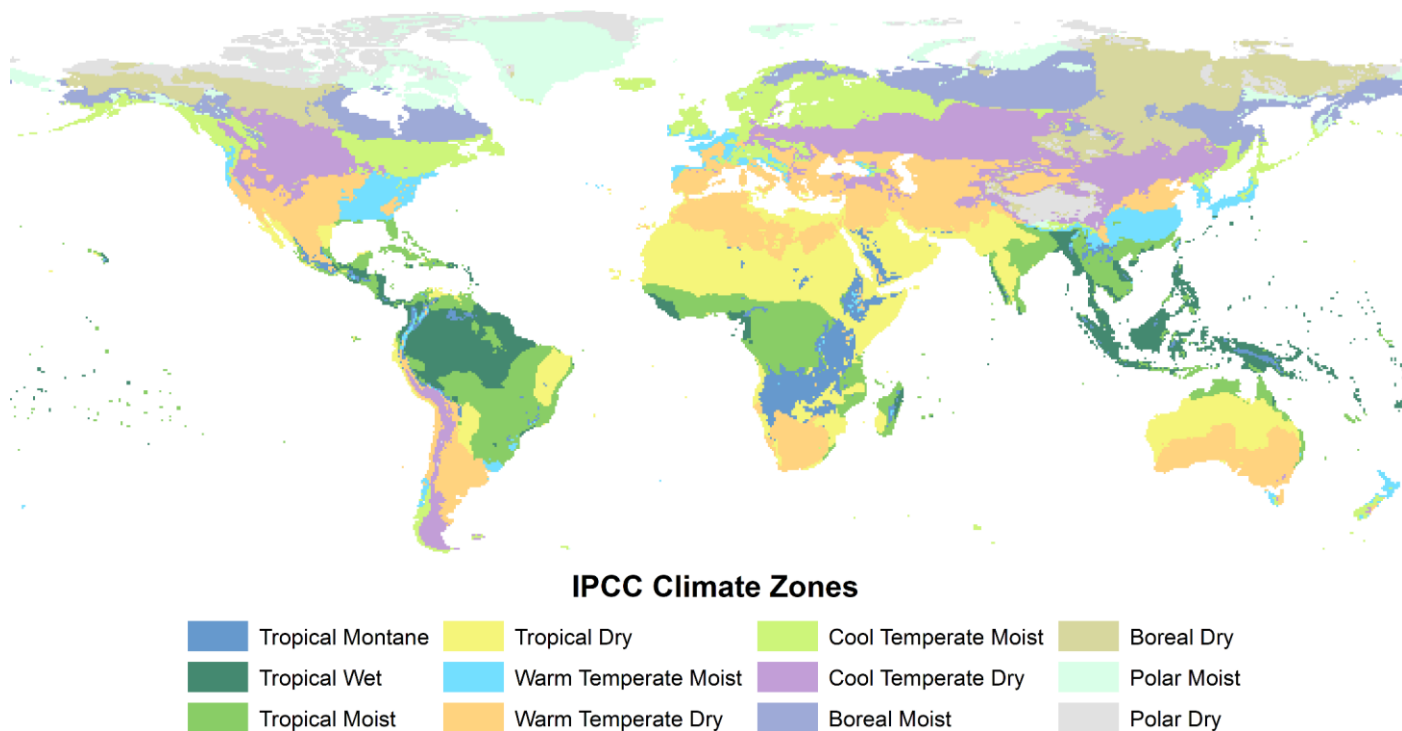


Figura 6: Zonas climáticas definidas por el IPC (Reddy et al., 2019).

3.4. Calibración y validación del modelo

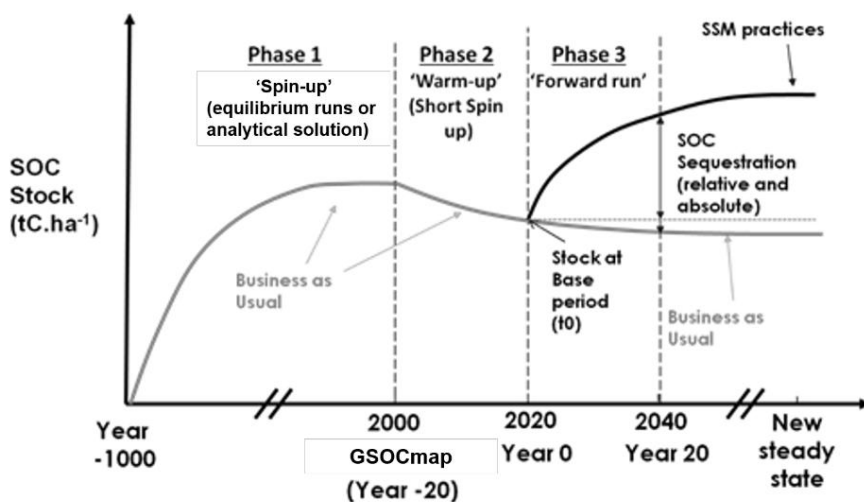


Figura 7: Modelado por RothC recomendado según FAO (2022)

El modelado RothC se basó en las recomendaciones explicitadas en FAO (2022) (Figura 7). La calibración del modelo RothC se basó en datos empíricos obtenidos de estudios revisados por pares que evaluaron el impacto del pastoreo rotativo en ecosistemas de la misma zona climática que Ralicó (Warm Temperate Dry, según IPCC). Se seleccionaron 18 publicaciones científicas que cumplieran con los criterios de representatividad en cuanto a clima, vegetación (pastura mejorada o pastizal natural) y manejo ganadero.

Se ha desarrollado un código específico ejecutado en R® (versión 4.5.0) para calibrar el modelo RothC, ajustando los parámetros de entrada de modo que el modelo reproduzca los valores observados de COS en cada



estudio. Esta calibración permitió establecer coeficientes de ajuste para las condiciones locales de esta zona climática, diferenciando entre la situación de línea base (pastoreo continuo) y la situación con proyecto (pastoreo rotativo). La fortaleza de este tipo de modelos es que toman en cuenta las condiciones locales de clima y suelo de cada sitio para modelar el efecto de la práctica, lo que luego, al aplicarlo al campo Ralicó, también tomara como base sus condiciones locales de clima y suelo.

El código estima primeramente valores de materia orgánica inerte (IOM), material vegetal descomponible (DPM), material vegetal resistente (RPM), biomasa microbiana (BIO) y materia orgánica humificada (MHU) (ver Figura 2) para obtener un valor de C_{eq} (Carbono en equilibrio) con la situación inicial previa a la aplicación de las prácticas de manejo, según lo recomienda la FAO (2022). Finalizado este período de “*SpinUp*”, se modela un período “*WarmUp*” de 10 años hasta llegar al valor inicial de contenido de carbono observado en cada una de las publicaciones, así igualmente en las simulaciones con los datos medidos en el campo Ralicó (Figura 7). Con esta configuración, se inició la calibración. La calibración de los parámetros se realizó de modo iterativo, buscando maximizar el ajuste de los parámetros para que el efecto observado en cada uno de los estudios sea lo más parecido posible al efecto modelado por las simulaciones (es decir, minimizando el error de predicción).

3.5. Simulaciones de la captura de carbono en Ralicó

Finalmente se procede a modelar el efecto de las prácticas en el período “*Forward*”. Para ello se utiliza el modelo calibrado sin modificar ningún parámetro, del mismo modo que lo requiere Verra. El período simulado es de 20 años a partir de la muestra inicial de suelo.

4. Resultados

4.1. Obtención de variables de entrada para el modelo

Se han obtenido satisfactoriamente las variables de entrada tanto para las publicaciones de calibración/validación así como para las simulaciones en Ralicó.

4.1.1. Datos de COS y arcilla para iniciar las simulaciones

En cuanto a las variables de suelo de Ralicó, se han utilizado dos muestras de suelo del informe realizado el 12/8/2022: lote 3b y lote 24 (Figura 8).

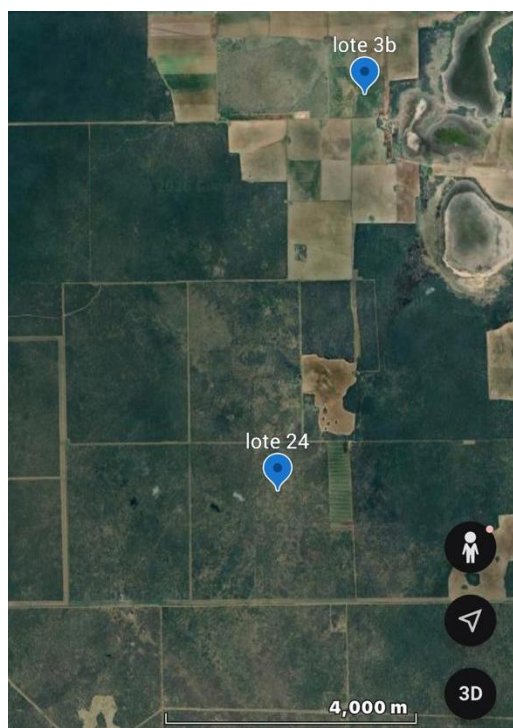


Figura 8: Ubicación aproximada de las muestras de suelo utilizadas para las simulaciones en Ralicó

Lotes de alfalfa:

- Estimado con el lote 3b
- COS inicial = 17,72 tnC/ha (0-20 cm)
- Arcilla: 5,79%

Lotes de bosque:

- Estimado con el lote 24
- COS inicial = 42,02 tnC/ha (0-20 cm)
- Arcilla: 11,79%

4.1.2. Escenarios de simulación y estimación de Cinputs

En cuanto a las estimaciones de los valores de Cinputs para el modelado, se han realizado los siguientes cálculos basados en los valores recibidos de productividad de materia seca de lotes de alfalfa y de bosque.

Lotes de alfalfa

Variable	Valor	Unidad	Descripción / Fórmula
ANPP	10000	kg MS/ha.año	Dato de entrada - Modificable por el usuario
alpha	0,65	adimensional	Tasa de ingesta (Liu et al., 2011)
beta	0,68	adimensional	Digestibilidad (Jacobo et al., 2020)
frs	0,6	adimensional	Relación raíz a tallo (pasturas perennes)
fc	0,45	adimensional	Fracción de contenido de carbono
frz	0,5	adimensional	Factor de rizodeposición/raíces
fsb	0,558	adimensional	Fracción de rastrojo: $=1-(\alpha*\beta)$
RZ	1,35	t C/ha.año	Rizodeposición: $=(ANPP/1000)*frs*frz*fc$
Cinput Total	6,561	t C/ha.año	Aporte total de Carbono: $=(ANPP/1000)*(fsb+frs)*fc+RZ$



Lotes de bosque:

Variable	Valor	Unidad	Descripción / Fórmula
ANPP	1336	kg MS/ha.año	Dato de entrada - Modificable por el usuario
alpha	0,5	adimensional	Tasa de ingesta (Liu et al., 2011)
beta	0,55	adimensional	Digestibilidad (Jacobo et al., 2020)
frs	1,8	adimensional	Relación raíz a tallo (pasturas perennes)
fc	0,45	adimensional	Fracción de contenido de carbono
frz	0,5	adimensional	Factor de rizodeposición/raíces
fsb	0,725	adimensional	Fracción de rastrojo: $=1-(\alpha*\beta)$
RZ	0,54108	t C/ha.año	Rizodeposición: $=(ANPP/1000)*frs*frz*fc$
Cinput Total	2,05911	t C/ha.año	Aporte total de Carbono: $=(ANPP/1000)*(fsb+frs)*fc+RZ$

En particular para los lotes de alfalfa, partiendo de una productividad de 10.000 kg MS/ha año, se han realizado simulaciones bajo los siguientes escenarios:

- Escenario conservador: se asume una productividad del 50% e implantación de alfalfa cada 4 años, con 1 año intermedio de producción de Sorgo
- Escenario promedio: se asume una productividad del 75% e implantación de alfalfa cada 6 años, con 1 año intermedio de producción de Sorgo
- Escenario optimista: se asume una productividad del 100% e implantación de alfalfa cada 8 años, con 1 año intermedio de producción de Sorgo

4.2. Delimitación de zonas homogéneas

En primer lugar, con las fotografías del canopeo arbóreo se calibró un modelo para estimar el valor real de apertura a partir de las 10 bandas del sensor Sentinel 2. Los resultados se muestran en la Figura 9, Figura 10 y Figura 11.

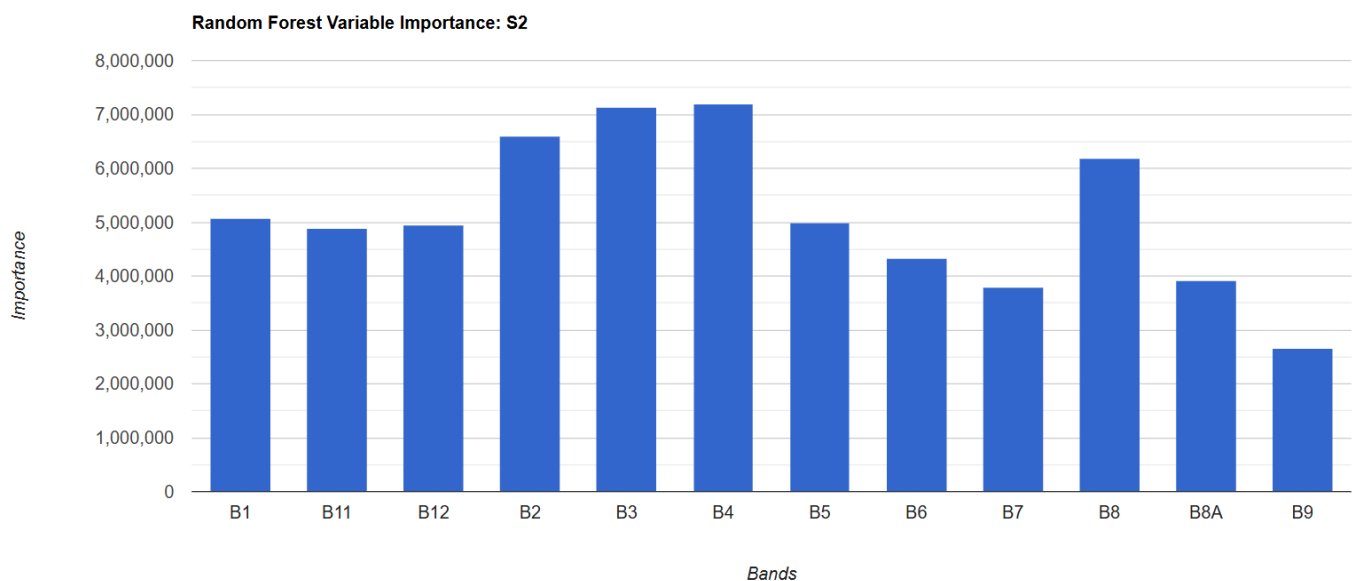


Figura 9: Importancia de las variables en predecir la apertura de canopeo medida a campo

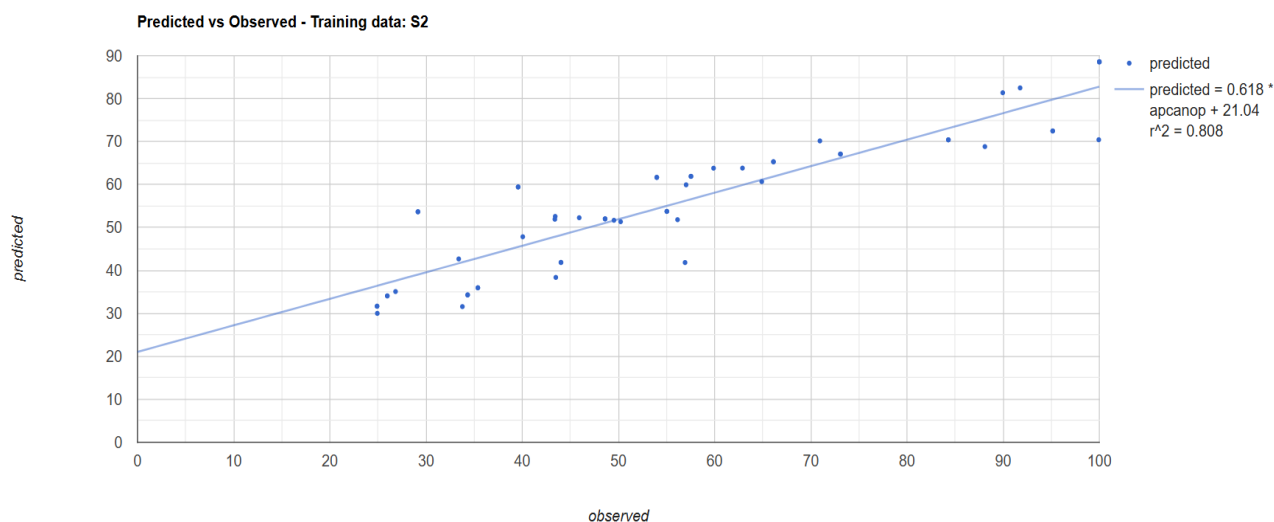


Figura 10: Relación entre observados y predichos por el modelo de apertura de canopy

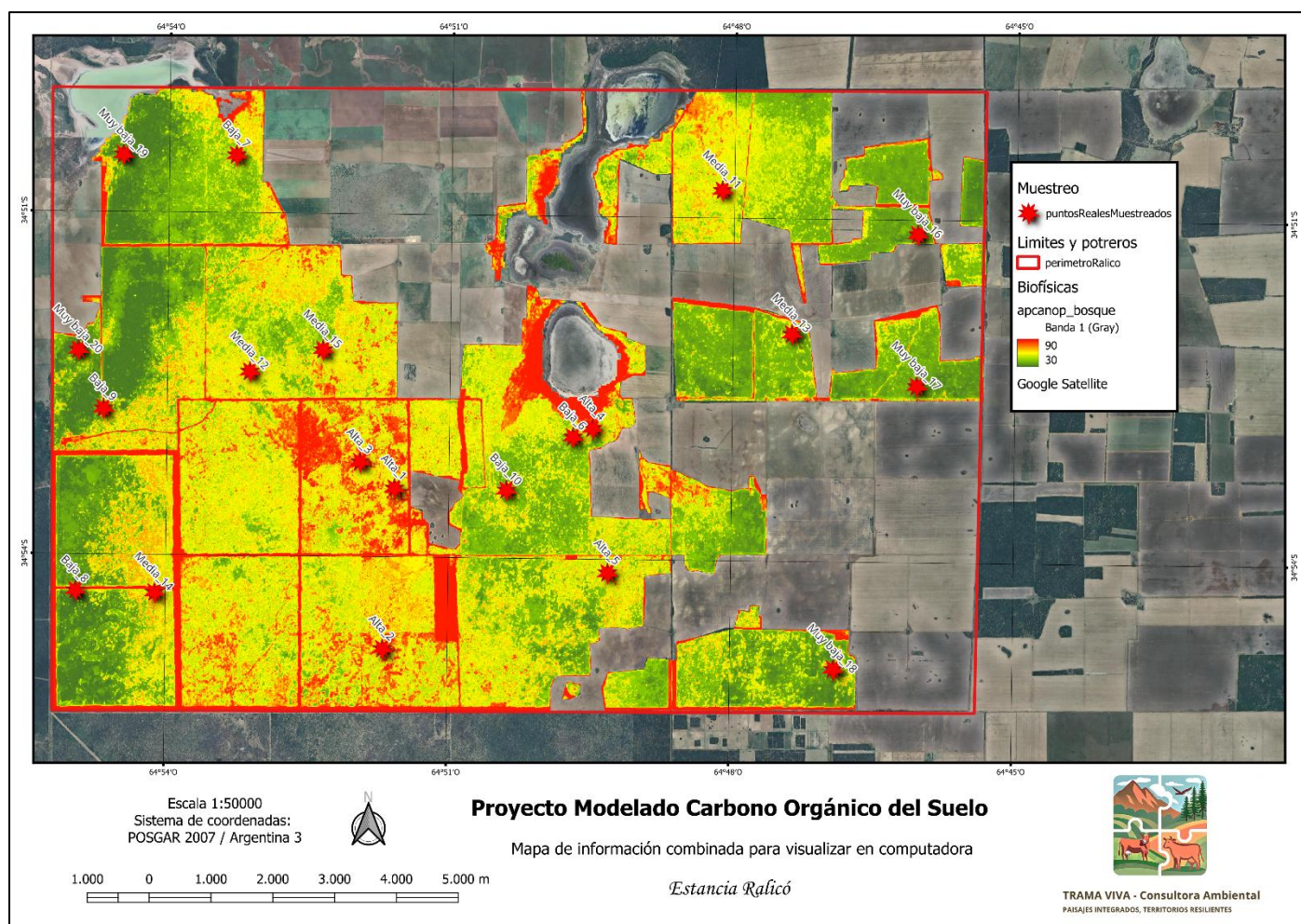


Figura 11: Mapa final con la apertura de canopy estimada para cada pixel Sentinel 2

El análisis NMDS mostró un agrupamiento débil de las variables ambientales en dos ejes de ordenamiento. Con el ordenamiento inicial de especies dentro del NMDS se han ubicado las variables ambientales (flechas azules) y la apertura de canopy (isolíneas verdes). El resultado se muestra en la Figura 12. Luego se han agregado isolíneas de precipitación (Figura 13) y se han generado clústeres según comunidades vegetales (Figura 14). Las abreviaturas utilizadas para las especies se detallan en el material suplementario (Tabla 5).

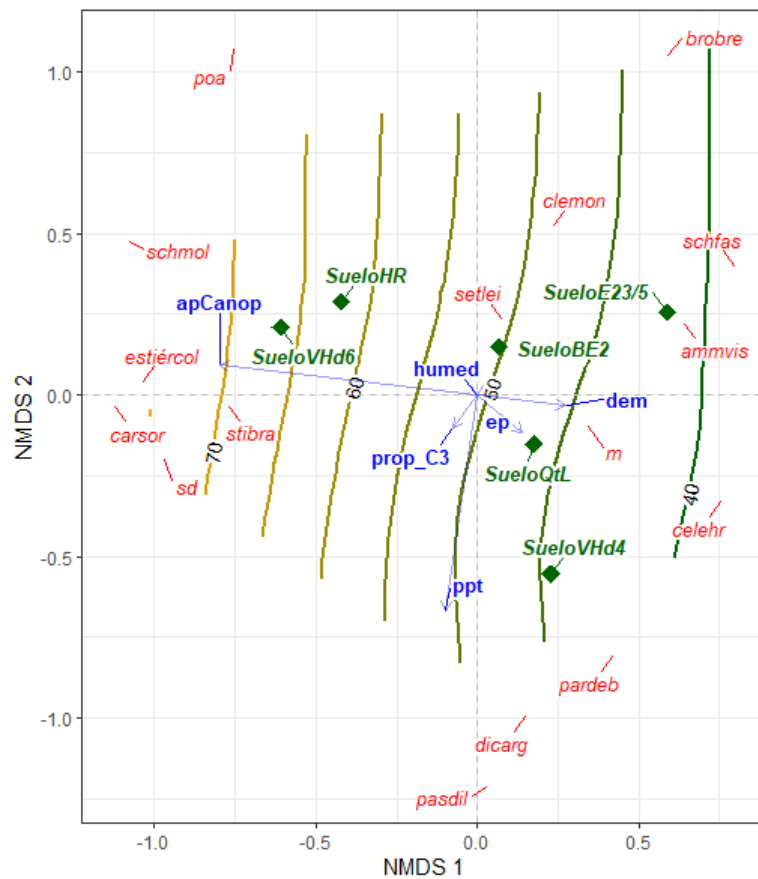


Figura 12: NMDS con isolíneas de apertura de canopeo

Interacción: Estructura del Bosque vs. Precipitación

NMDS con isolíneas superpuestas

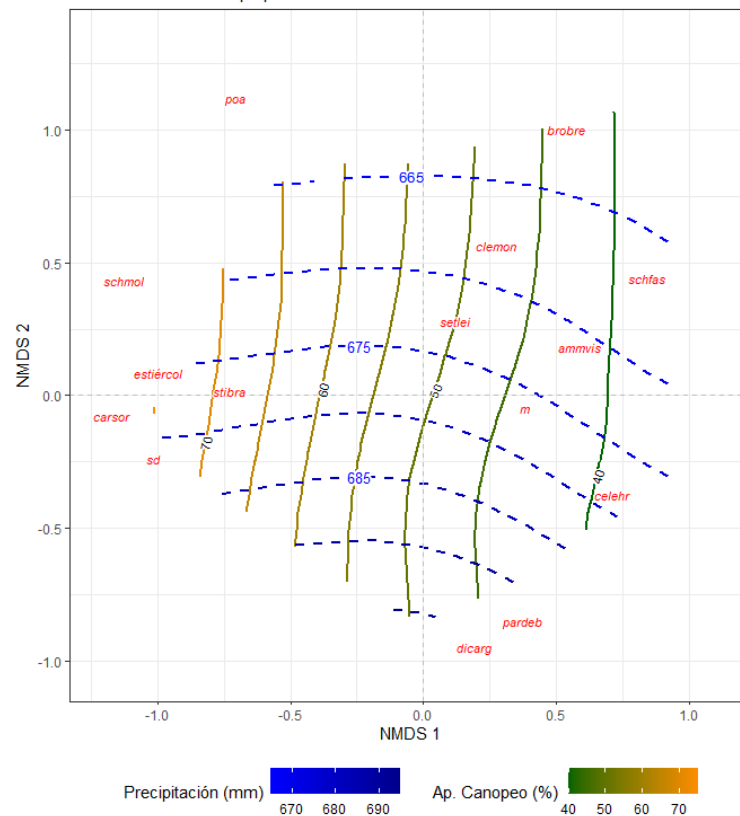


Figura 13: NMDS con isolíneas de apertura de canopeo y precipitación

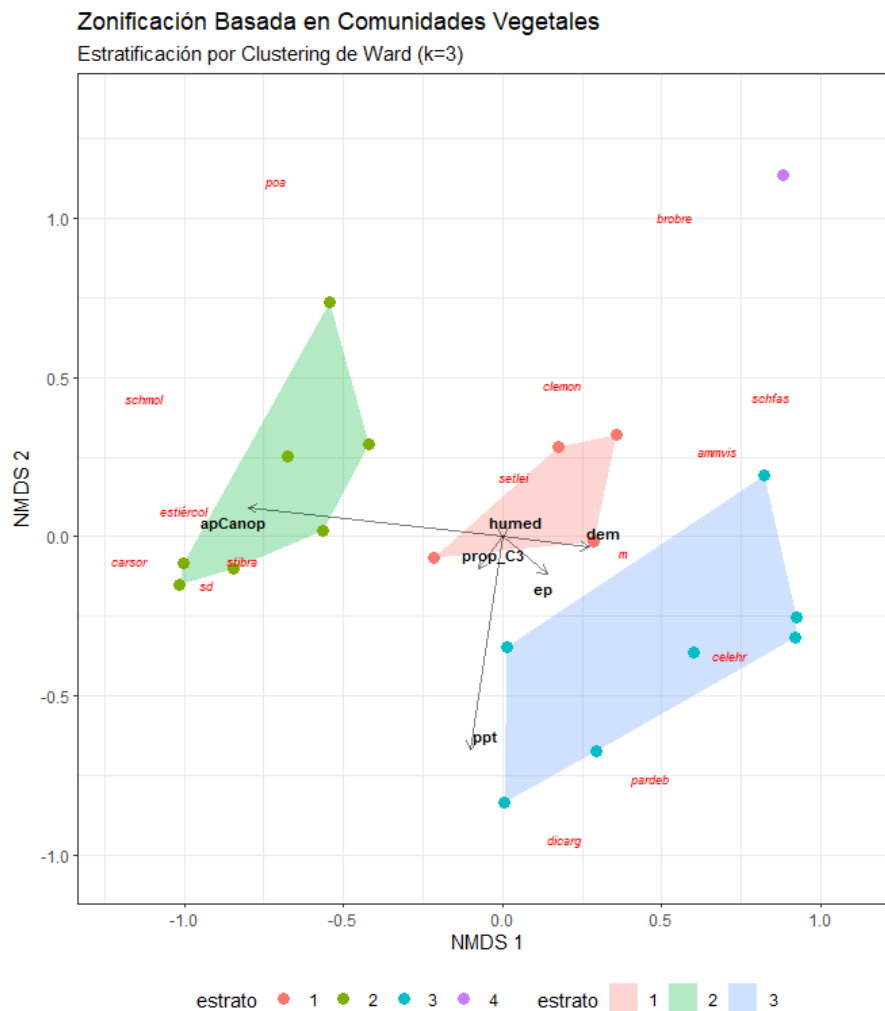


Figura 14: Agrupamiento por clústers

Finalmente, se decidió agrupar zonas homogéneas por apertura de canopy: Zona 1: 0-45 %; Zona 2: 45-60 %; Zona 3: 60-100 %. Esta decisión se basó en la simplificación de variables a medir en caso de una futura auditoría y a que además los grandes grupos vegetales quedaban separados en buena medida (Figura 14). Utilizando estas medidas de separación se dividió a la zona de bosque en 3 clases, y se aplicó un suavizado, según muestra la Figura 15.

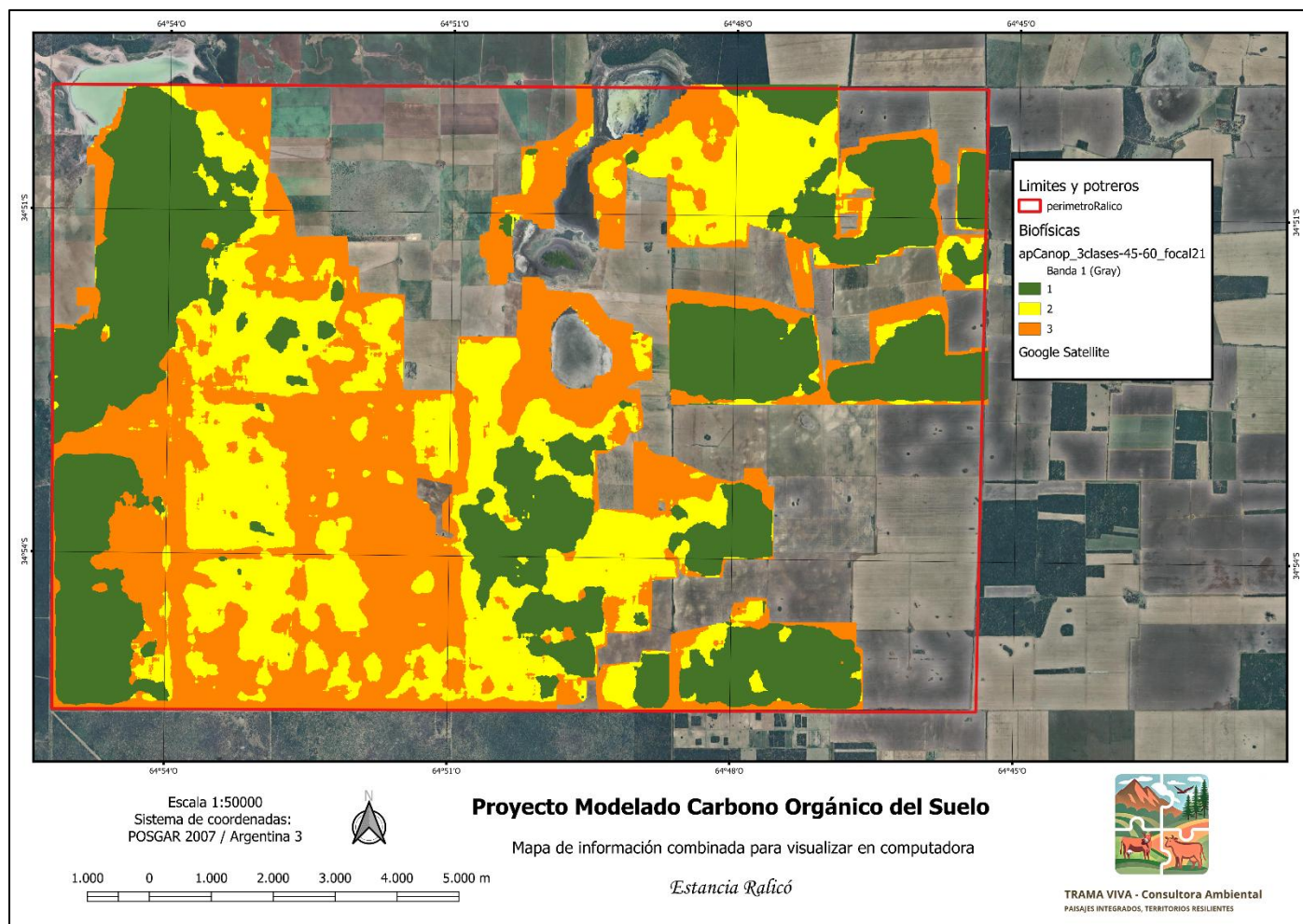


Figura 15: Delimitación final de zonas homogéneas dentro del bosque

4.3. Obtención de publicaciones

Se han encontrado datos de pastoreo rotativo de 13 publicaciones recientes revisadas por pares, de manejos ganaderos sobre pastizales o pasturas en región climática Warm Temperate Dry, correspondiente a la región climática de Ralico. La delimitación de las zonas climáticas y la ubicación de los estudios hallados se muestra en la Figura 16. Las publicaciones halladas que cumplen con los requisitos previamente nombrados se muestran en la Tabla 1.

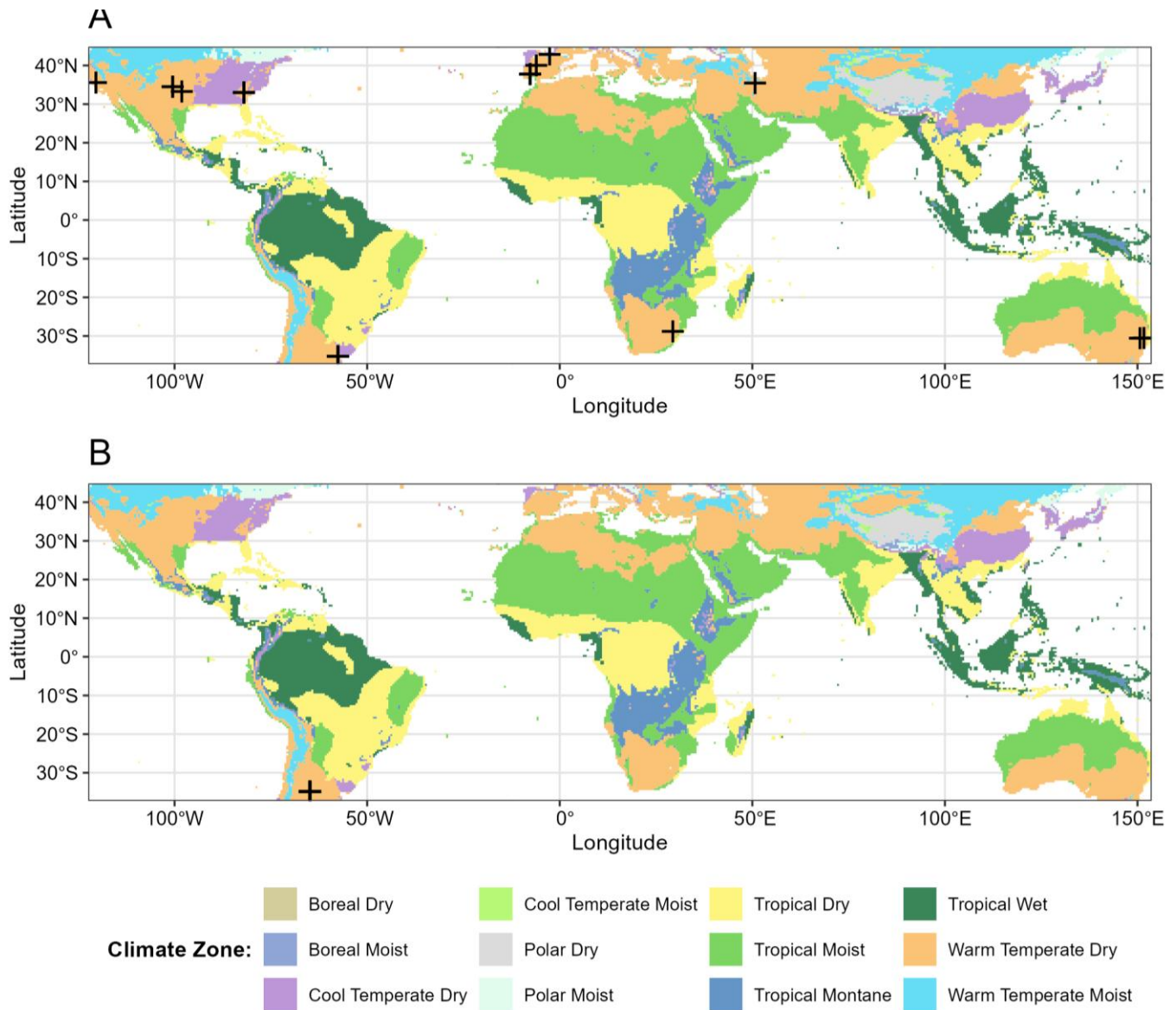


Figura 16: Ubicación de las publicaciones de calibración y validación (arriba). Ubicación de estancia Ralicó (abajo)

Tabla 1: Publicaciones halladas para calibración y validación según ambiente

Ambiente	Referencia
Pasturas implantadas	Machmuller et al. (2015)
	Ishaq et al. (2025)
	Cowie et al. (2013)
	Stanley et al. (2025)
	Kim et al. (2022)
Pastizales naturales	Teague et al. (2011)
	Vecchio et al. (2018)
	Basili & Sanchez (2018)
	Carrascosa (2025)
	Díaz de Otálora et al. (2021)
	Abdalla et al. (2022)
	Zarekia et al. (2012)
	Lodge & King (2006)



4.4. Calibración y validación del modelo

En la Tabla 2 se observan las métricas de calibración. Se observa que el desvío promedio es menor a 3 y 1 tnC/ha para los ambientes pasturas implantadas y pastizales naturales, respectivamente. En relación con la precisión (estimado a través de RMSE) se observan valores entre 7 y 4 tnC/ha. En la Figura 17 y Figura 18 se observan los resultados de calibración, para los ambientes pasturas implantadas y pastizales naturales, respectivamente.

Tabla 2: Métricas de validación. RMSE= Raíz del Error Cuadrático Medio

Ambiente	Pasturas implantadas	Pastizales naturales
Estudios (n)	3	10
Observaciones (n)	6	12
RMSE (tnC/ha)	6.46	4.43
Cobertura 90%	1.00	0.83
Desvío promedio (tnC/ha)	2.21	-0.21

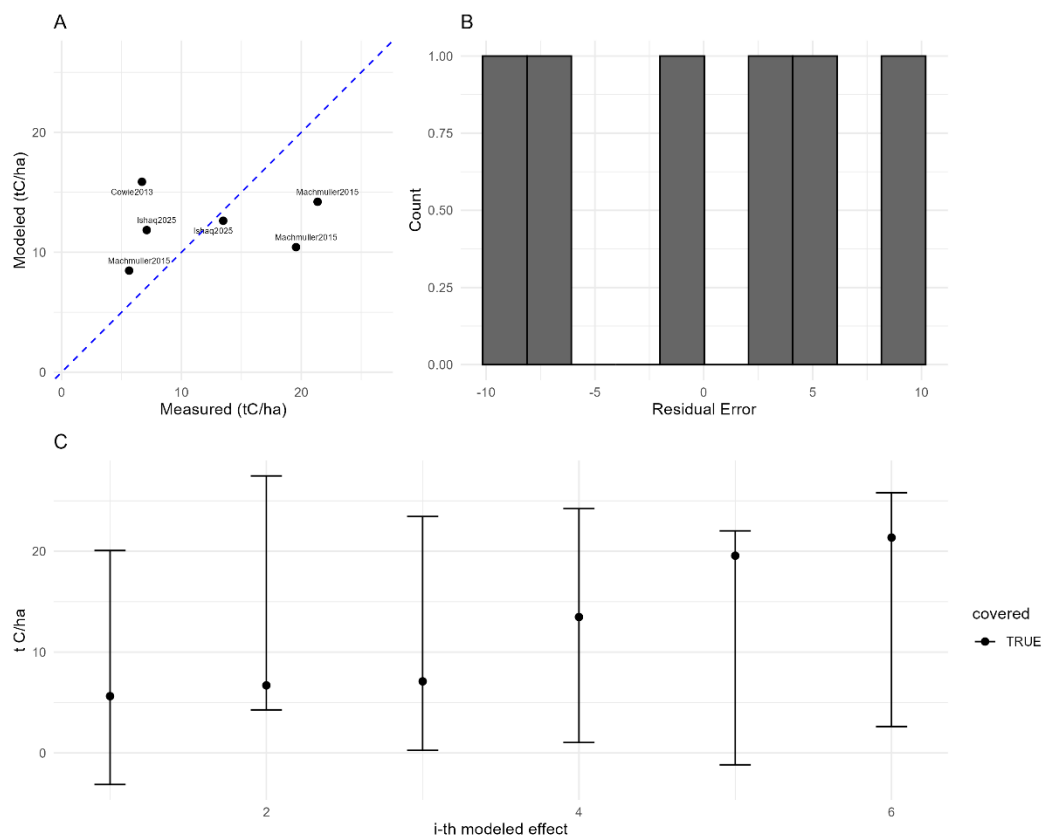


Figura 17: Resultado de validación para pastoreo rotativo en pasturas implantadas. Panel A: efecto medido vs. Efecto modelado. Panel B: cuenta de los errores residuales. Panel C: Efectos medidos (puntos) e intervalo de predicción del 90% (barras con bigotes)

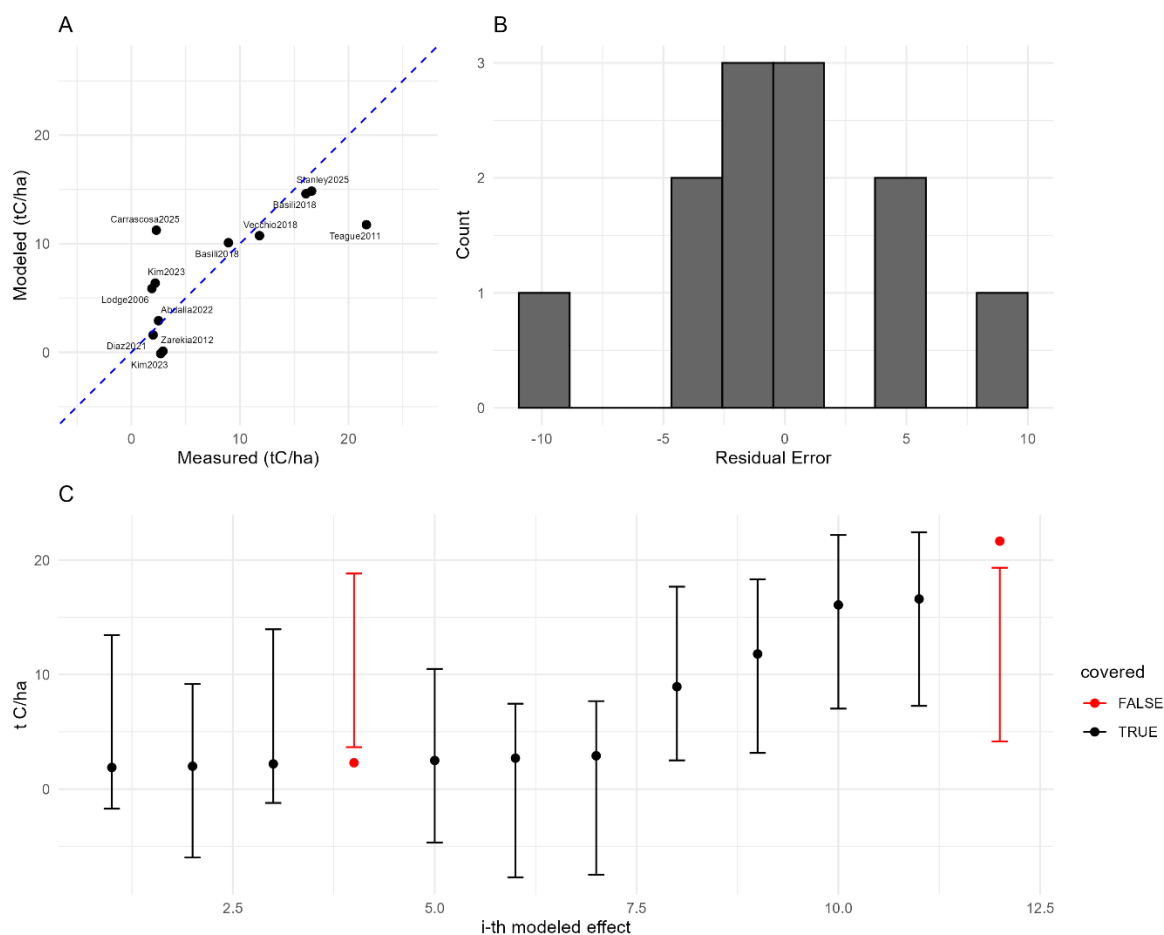


Figura 18: Resultado de validación para pastoreo rotativo en pastizales naturales. Panel A: efecto medido vs. Efecto modelado. Panel B: cuenta de los errores residuales. Panel C: Efectos medidos (puntos) e intervalo de predicción del 90% (barras con bigotes)

4.5. Simulaciones de la captura de carbono en Ralicó

La selección de las zonas de simulación en las que se espera captura de COS se basa en los supuestos de:

- Las zonas agrícolas no presentan un manejo diferencial que pueda capturar carbono
- Las zonas cerradas de bosque no presentarán captura debido a su baja intensidad de uso histórico
- Las zonas abiertas de bosque responderán de manera similar a los experimentos realizados en un pastizal natural, y las zonas de alfalfa responderán de manera similar a los experimentos realizados en pasturas implantadas
- Las zonas intermedias de bosque mostrarán la mitad de captura que las zonas abiertas debido a un menor uso histórico por el ganado
- Las zonas indicadas como alfalfa se mantendrán bajo uso de alfalfa durante los 20 años de la simulación
- El clima es estable y similar a los últimos 20 años (2002-2022) durante las simulaciones a futuro

Estas zonas donde se espera captura de carbono se muestran en la Figura 19. Los resultados de simulación se muestran a continuación en las siguientes tablas y figuras.

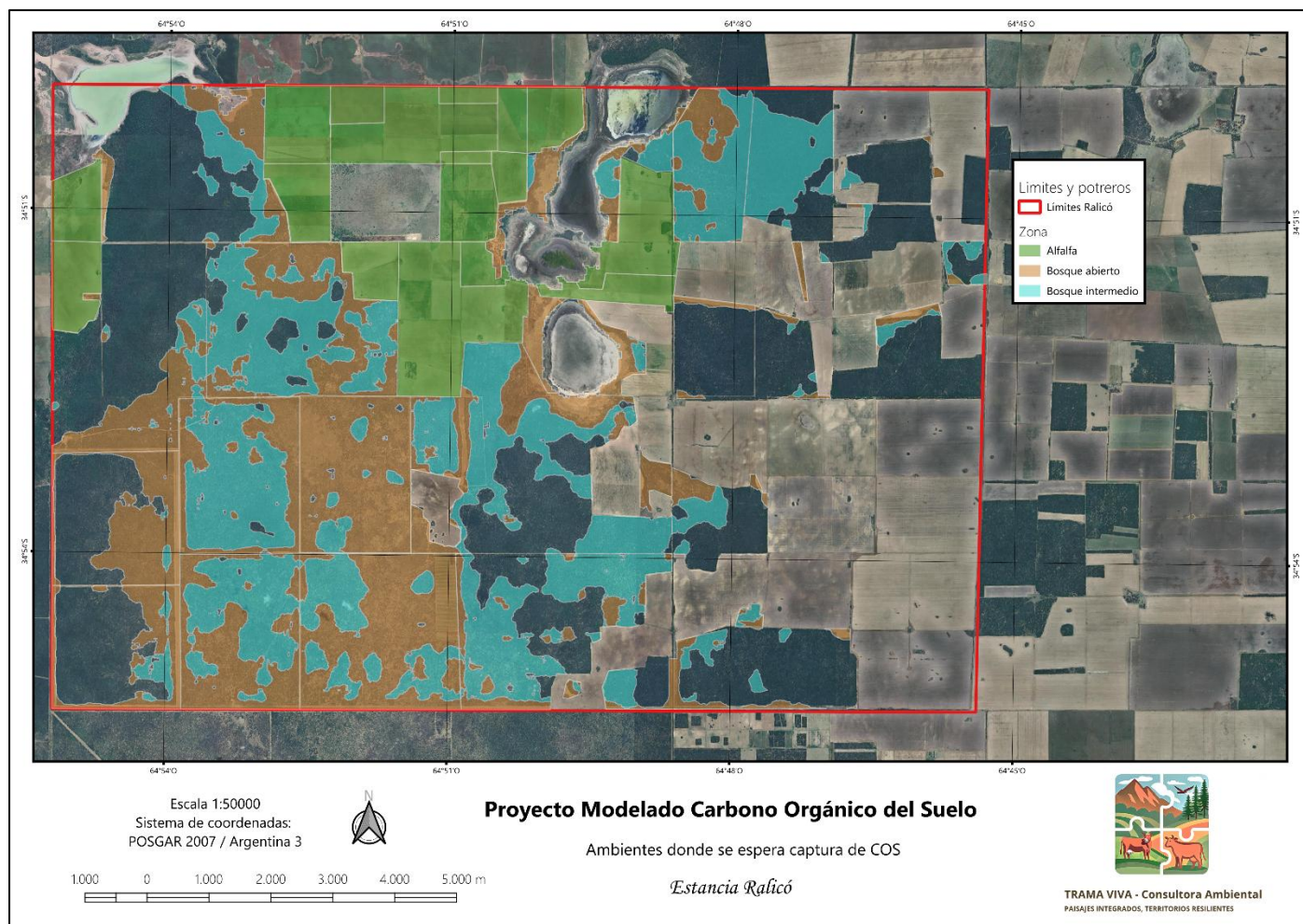


Figura 19: Ubicación de zonas donde se espera captura de COS

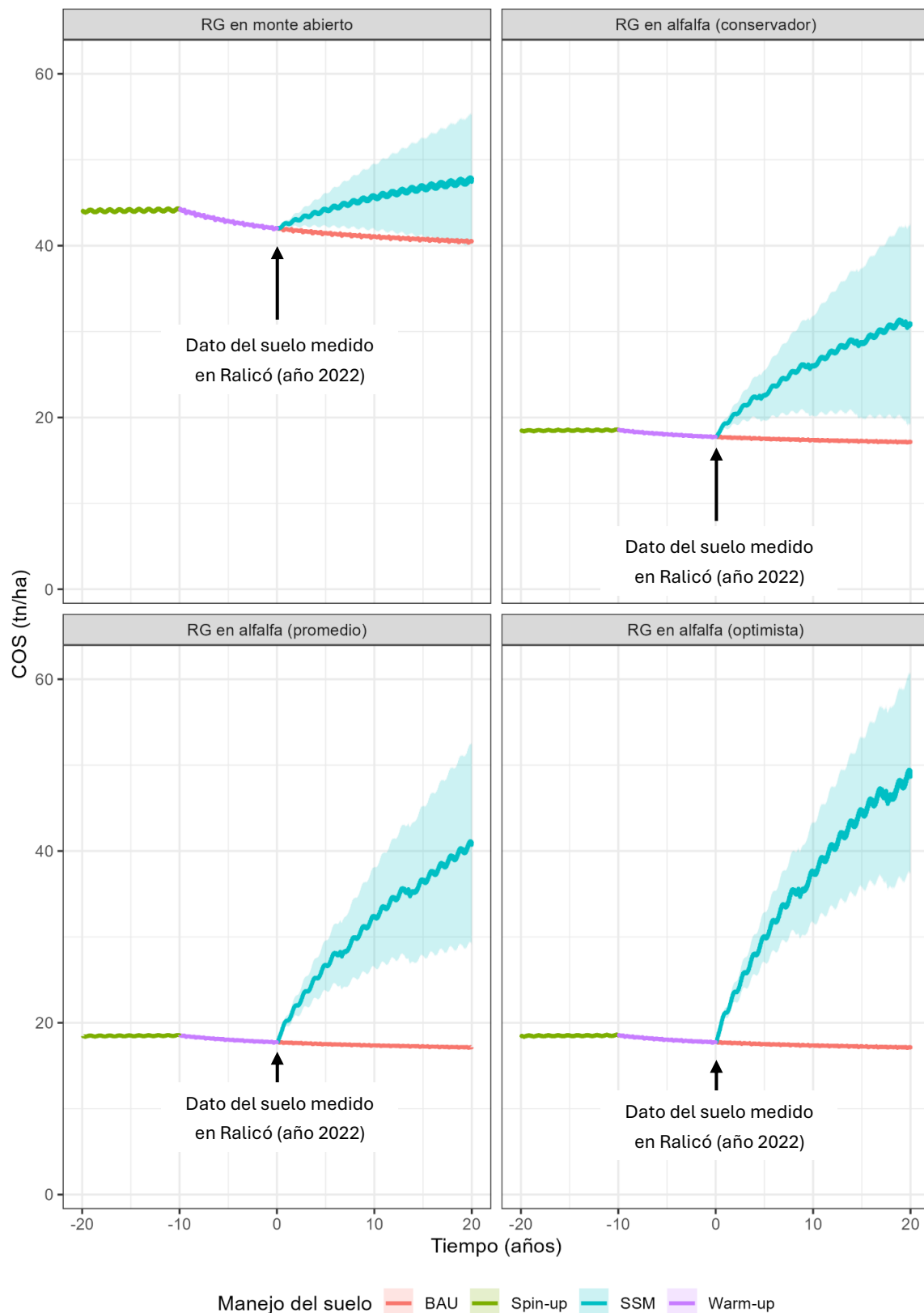


Figura 20: Modelado del carbono orgánico del suelo (COS) para cada zona homogénea. BAU= Business as usual (pastoreo continuo); SSM= Sustainable Soil Management (pastoreo rotativo); Spin-up: Período de inicialización; Warm-up: Período de calentamiento. La zona celeste muestra el intervalo de predicción del 90%.

Tabla 3: Diferencia de carbono orgánico del suelo (tn/ha) para pastoreo rotativo (RG) en diferentes ambientes. Se muestran además tres escenarios para lotes de alfalfa: uno conservador, uno promedio y uno optimista.

Año	RG en monte abierto		RG en monte intermedio		RG en alfalfa (conservador)		RG en alfalfa (promedio)		RG en alfalfa (optimista)	
0	42.02	0%	42.02	0%	17.74	0%	17.74	0%	17.74	0%
1	42.59	11%	42.31	11%	19.30	12%	20.25	11%	21.17	11%
2	42.59	11%	42.31	11%	20.41	20%	22.02	18%	23.60	19%
3	43.46	29%	42.74	29%	21.43	28%	23.67	26%	25.84	26%
4	43.84	37%	42.93	37%	22.39	36%	25.22	32%	27.96	33%
5	43.84	37%	42.93	37%	22.59	37%	26.68	39%	29.96	39%
6	43.84	37%	42.93	37%	23.68	45%	28.07	45%	31.85	45%
7	43.84	37%	42.93	37%	24.54	52%	28.30	46%	33.65	51%
8	43.84	37%	42.93	37%	25.34	58%	29.91	53%	35.35	56%
9	45.45	69%	43.73	69%	26.10	64%	31.15	58%	35.47	57%
10	45.71	74%	43.87	74%	26.03	63%	32.33	63%	37.49	63%
11	45.96	79%	43.99	79%	26.96	70%	33.44	68%	39.04	68%
12	46.20	84%	44.11	84%	27.66	76%	34.50	72%	40.50	73%
13	46.42	88%	44.22	88%	28.31	81%	35.52	77%	41.89	77%
14	46.63	92%	44.32	92%	28.94	86%	35.25	76%	43.22	82%
15	46.83	96%	44.42	96%	28.69	84%	36.54	81%	44.49	86%
16	47.01	100%	44.52	100%	29.51	90%	37.50	85%	45.71	90%
17	47.01	100%	44.52	100%	30.10	94%	38.40	89%	46.87	93%
18	47.01	100%	44.52	100%	30.66	99%	39.27	93%	46.27	91%
19	47.01	100%	44.52	100%	31.19	103%	40.10	97%	47.84	96%
20	47.01	100%	44.52	100%	30.82	100%	40.89	100%	48.98	100%

Tabla 4: Resultados del modelado del carbono orgánico del suelo (COS) en tn/ha por zona homogénea. BAU= Business as usual (pastoreo continuo); SSM= Sustainable Soil Management (pastoreo rotativo; Δ SOC = Diferencia entre SSM y SOC inicial

Practica	SOC inicial	SOC final a los 20 años		Δ SOC	Area	Δ SOC x Area
		BAU	SSM			
Zona	tn C/ha	tn C/ha	tn C/ha	tn C/ha	ha	tn C
Pastoreo rotativo en monte abierto	42,02	40,45	46,99	4,97	2.870	14.264
Pastoreo rotativo en monte intermedio	42,02	40,45	43,72	2,49	2.724	6.769
RG en alfalfa (escenario conservador)	17,74	17,14	29,84	12,1	1.801	21.792
RG en alfalfa (escenario promedio)	17,74	17,14	38,76	21,02	1.801	37.857
RG en alfalfa (escenario optimista)	17,74	17,14	46,47	28,73	1.801	51.743
Suma todas las zonas: escenario conservador						42.825
Suma todas las zonas: escenario promedio						58.890
Suma todas las zonas: escenario optimista						72.776

5. Conclusiones y recomendaciones

A partir del trabajo realizado surgen las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- ✓ Los datos iniciales de suelo son insuficientes para conocer con precisión el potencial de captura real del campo, por lo que los resultados mostrados deben tomarse con precaución. Deberá ampliarse la caracterización inicial del suelo para obtenerse mejores estimaciones
 - Se recomienda intensificar el muestreo de suelo para conocer con mayor precisión el estado inicial del campo y su potencial de captura de COS
- ✓ El suelo muestreado de alfalfa posee un bajo valor de COS y la productividad de materia seca de alfalfa recibida fue alta, por lo que el potencial de captura es muy alto en el escenario optimista. Esto no sucederá en la realidad si los valores iniciales del COS del suelo son más altos o si la productividad de alfalfa es más baja
 - Se recomienda medir la productividad de materia seca de alfalfa y en zona de bosque abierto directamente a campo



6. Referencias

- Abatzoglou, J. T., Dobrowski, S. Z., Parks, S. A., & Hegewisch, K. C. (2018). TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958-2015. *Scientific Data*, 5. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.191>
- Abdalla, K., Mutema, M., Chivenge, P., Everson, C., & Chaplot, V. (2022). Grassland rehabilitation significantly increases soil carbon stocks by reducing net soil CO₂ emissions. *Soil Use and Management*, 38(2), 1250–1265. <https://doi.org/10.1111/sum.12790>
- Basili, C. J., & Sanchez, S. S. (2018). *Universidad Nacional de La Plata*.
- Carrascosa, A. (2025). *Supplement of Improved management increases soil mineral-protected organic carbon storage via plant-microbial-nutrient mediation in semi-arid grasslands*. 11, 911–937. <https://doi.org/10.5194/soil-11-911-2025-supplement>
- Coleman, K., Prout, J. M., Milne, A. E., Coleman, K., Prout, J., & Milne, A. (2024). *RothC-A model for the turnover of carbon in soil Model Description*.
- Cowie, A. L., Lonergan, V. E., Rabbi, S. M. F., Fornasier, F., MacDonald, C., Harden, S., Kawasaki, A., & Singh, B. K. (2013). Impact of carbon farming practices on soil carbon in northern New South Wales. *Soil Research*, 51(7–8), 707–718. <https://doi.org/10.1071/SR13043>
- Díaz de Otálora, X., Epelde, L., Arranz, J., Garbisu, C., Ruiz, R., & Mandaluniz, N. (2021). Regenerative rotational grazing management of dairy sheep increases springtime grass production and topsoil carbon storage. *Ecological Indicators*, 125. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107484>
- FAO. (2022). Global soil organic carbon sequestration potential map (GSOCseq v1.1) - Technical manual. In *Global soil organic carbon sequestration potential map (GSOCseq v1.1) - Technical manual*. FAO. <https://doi.org/https://doi.org/10.4060/cb2642en>
- Gottschalk, P., Smith, J. U., Wattenbach, M., Bellarby, J., Stehfest, E., Arnell, N., Osborn, T. J., Jones, C., & Smith, P. (2012). How will organic carbon stocks in mineral soils evolve under future climate? Global projections using RothC for a range of climate change scenarios. *Biogeosciences*, 9(8), 3151–3171. <https://doi.org/10.5194/bg-9-3151-2012>
- Ishaq, H. K., Grilli, E., D'Ascoli, R., Mastrocicco, M., Rutigliano, A. F., Marzaioli, R., Strumia, S., Coppola, E., Malrieu, I., Silva, F., & Castaldi, S. (2025). Soil quality under rotational and conventional grazing in Mediterranean areas at desertification risk. *Journal of Environmental Management*, 373. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123822>
- Jacobo, E. J., Cadaviz, N., Vecchio, M. C., & Rodriguez, A. M. (2020). Estimation of the balance of greenhouse gases in livestock production systems in the Salado river basin. *AgriScientia*, 37(1), 15–32. <https://doi.org/10.31047/1668.298x.v37.n1.27514>
- Jebari, A., Alvaro-Fuentes, J., Pardo, G., Almagro, M., & Del Prado, A. (2021). Estimating soil organic carbon changes in managed temperate moist grasslands with RothC. *PLoS ONE*, 16(8 August). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0256219>



- Jordon, M. W., & Smith, P. (2022). Modelling soil carbon stocks following reduced tillage intensity: A framework to estimate decomposition rate constant modifiers for RothC-26.3, demonstrated in north-west Europe. *Soil and Tillage Research*, 222. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105428>
- Kim, J., Ale, S., Kreuter, U. P., Teague, W. R., Delgrosso, S. J., & Dowhower, S. L. (2022). *Evaluating the Impacts of Alternative Grazing Management Practices on Soil Carbon Sequestration and Soil Health Indicators 2 3 Srinivasulu Ale*.
- Liu, D. L., Chan, K. Y., Conyers, M. K., Li, G., & Poile, G. J. (2011). Simulation of soil organic carbon dynamics under different pasture managements using the RothC carbon model. *Geoderma*, 165(1), 69–77. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.07.005>
- Lodge, G. M., & King, K. L. (2006). Soil microbial biomass, labile and total carbon levels of grazed sown and native pastures in northern New South Wales. *Australian Journal of Agricultural Research*, 57(8), 837–845. <https://doi.org/10.1071/AR05337>
- Machmuller, M. B., Kramer, M. G., Cyle, T. K., Hill, N., Hancock, D., & Thompson, A. (2015). Emerging land use practices rapidly increase soil organic matter. *Nature Communications*, 6. <https://doi.org/10.1038/ncomms7995>
- Oksanen, J. (2015). Multivariate Analysis of Ecological Communities in R: Vegan Tutorial. In *R package version, 2.0-1*.
- Pausch, J., & Kuzyakov, Y. (2018). Carbon input by roots into the soil: Quantification of rhizodeposition from root to ecosystem scale. In *Global Change Biology* (Vol. 24, Number 1, pp. 1–12). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1111/gcb.13850>
- Prudil, J., Pospíšilová, L., Dryšlová, T., Barančíková, G., Smutný, V., Sedlák, L., Ryant, P., Hlavinka, P., Trnka, M., Halas, J., Koco, Š., Takáč, J., Boturová, K., Dušková, S., Neudert, L., & Rábek, M. (2023). Assessment of carbon sequestration as affected by different management practices using the RothC model. *Plant, Soil and Environment*, 69(11), 532–544. <https://doi.org/10.17221/291/2023-PSE>
- Reddy, S., Panichelli, L., Michael Waterworth, R., Federici, S., Green, C., Jonckheere, I., Kahuri, S., Alexander Kurz, W., de Ligt, R., Pierre Ometto, J., Petersson, H., Takahiro, E., Paul, T., Tullis, J., Somogyi, Z., Pandya, M., Theoto Rocha, M., & Suzuki, K. (2019). *CONSISTENT REPRESENTATION OF LANDS*.
- Skjemstad, J. O., Spouncer, L. R., Cowie, B., & Swift, R. S. (2004). Calibration of the Rothamsted organic carbon turnover model (RothC ver. 26.3), using measurable soil organic carbon pools. *Australian Journal of Soil Research*, 42(1), 79–88. <https://doi.org/10.1071/SR03013>
- Stanley, P., Roche, L., & Bowles, T. (2025). Amping up soil carbon: soil carbon stocks in California rangelands under adaptive multi-paddock and conventional grazing management. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 23(1). <https://doi.org/10.1080/14735903.2025.2461826>
- Studdert, G. A., Monterubbianesi, M. G., & Domínguez, G. F. (2011). Use of RothC to simulate changes of organic carbon stock in the arable layer of a Mollisol of the southeastern Pampas under continuous cropping. *Soil and Tillage Research*, 117, 191–200. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.10.006>
- Teague, W. R., Dowhower, S. L., Baker, S. A., Haile, N., DeLaune, P. B., & Conover, D. M. (2011). Grazing management impacts on vegetation, soil biota and soil chemical, physical and hydrological



properties in tall grass prairie. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 141(3–4), 310–322.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.03.009>

Vecchio, M. C., Golluscio, R. A., Rodríguez, A. M., & Taboada, M. A. (2018). Improvement of Saline-Sodic Grassland Soils Properties by Rotational Grazing in Argentina. *Rangeland Ecology and Management*, 71(6), 807–814. <https://doi.org/10.1016/j.rama.2018.04.010>

Zarekia, S., Jafari, M., Arzani, H., Javadi, S. A., & Jafari, A. A. (2012). Grazing effects on some of the physical and chemical properties of soil. *World Applied Sciences Journal*, 20(2), 205–212.
<https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2012.20.02.1624>

7. Material suplementario

7.1. Tabla de especies relevadas

Tabla 5: Especies relevadas a campo

Abreviatura	Nombre vulgar	Nombre científico	Vía Fotosintética
ammvis	visnaga	<i>Ammi visnaga</i>	C3
bidpil	romerillo	<i>Bidens pilosa</i>	C3
bowinc	bowlesia	<i>Bowlesia incana</i>	C3
brobre	cebadilla	<i>Bromus brevis</i>	C3
carsor	carex	<i>Carex soraria</i>	C3
celehr	tala	<i>Celtis ehrenbergiana</i>	C3
clemon	clematis	<i>Clematis montevidensis</i>	C3
conmic	piquillin	<i>Condalia microphylla</i>	C3
dicarg	oreja de ratón	<i>Dichondra argentea</i>	C3
disspi	pasto puna	<i>Distichlis spicata</i>	C4
erygil	lagaña de perro	<i>Erythrostemon gilliesii</i>	C3
foevul	hinojo	<i>Foeniculum vulgare</i>	C3
geodec	chañar	<i>Geoffroea decorticans</i>	C3
jodrho	sombra de toro	<i>Jodina rhombifolia</i>	C3
m	mantillo		
pardeb	parietaria	<i>Parietaria debilis</i>	C3
pasdil	pasto plomo	<i>Paspalum dilatatum</i>	C4
poa	poa	<i>Poa ligularis</i>	C3
schfas	moradillo	<i>Schinus fasciculatus</i>	C3
schmol	molle	<i>Schinus molle</i>	C3
sd	suelo desnudo		
setlei	setaria	<i>Setaria leiantha</i>	C4
stibra	stipa	<i>Stipa brachytricha</i>	C3



7.2. Fotos del muestreo a campo





