

Ensayo de larga duración sobre el uso de leonardita (Mastersoil® / Maxxsoil®) y sus efectos sobre la productividad de cultivos extensivos y la calidad del suelo

Campañas 2018/19 a 2025/26



1. Introducción

La intensificación agrícola en la región Pampeana de Argentina ha generado, en las últimas décadas, un deterioro progresivo de la calidad de los suelos, evidenciado por la disminución de los contenidos de materia orgánica, el aumento de la compactación, la erosión y una marcada reducción de la biodiversidad microbiana. Estos procesos se asocian principalmente a sistemas de monocultivo, al uso intensivo de insumos de síntesis química y a la limitada adopción de prácticas de manejo orientadas a la sostenibilidad de los agroecosistemas (Pérez et al., 2019).

En este contexto, la leonardita surge como una enmienda orgánica de alto potencial para contribuir a la recuperación de la funcionalidad edáfica. Este material, derivado de la oxidación natural del lignito, se caracteriza por su elevado contenido de ácidos húmicos y fúlvicos, carbono orgánico estable y minerales asociados. Diversos estudios han demostrado que su aplicación en suelos agrícolas puede mejorar propiedades físicas (estructura, agregación y retención hídrica), químicas (disponibilidad de nutrientes y regulación del pH) y biológicas (actividad y diversidad microbiana), generando impactos positivos sobre la calidad del suelo y el funcionamiento del sistema productivo (Rodríguez y García, 2021).

Asimismo, la incorporación de enmiendas orgánicas a base de leonardita ha sido señalada como una estrategia complementaria a la fertilización química tradicional, contribuyendo a la restauración de suelos degradados sin comprometer la productividad de los cultivos extensivos (Martínez et al., 2020). En este marco, uno de los principales desafíos agronómicos actuales es identificar insumos que permitan mejorar la salud del suelo y sostener los rendimientos en el mediano y largo plazo, particularmente bajo esquemas de producción intensivos.

Dentro de este escenario, se destacan las formulaciones comerciales Mastersoil® y Maxxsoil®, desarrolladas por Suelo Sano, elaboradas a partir de leonardita de origen vegetal y con alto grado de humificación. Durante los primeros años del ensayo se utilizó Mastersoil®, formulación original del producto. Posteriormente, esta fue reformulada y concentrada, dando origen a Maxxsoil®, manteniendo la misma materia prima y el mismo principio agronómico de acción. A los efectos de este estudio, ambos productos se consideran parte de una misma línea tecnológica basada en leonardita, diferenciándose únicamente por su grado de concentración y la dosis aplicada.

Estos productos están diseñados para su aplicación directa al suelo o por vía foliar y se caracterizan por su capacidad para mejorar la estructura edáfica, favorecer la disponibilidad de nutrientes y estimular la actividad biológica del suelo. Sin embargo, la magnitud y persistencia

de estos efectos dependen en gran medida del manejo, la frecuencia de aplicación y el contexto edáfico-productivo, lo que resalta la importancia de evaluaciones de larga duración bajo condiciones reales de producción, como la que se presenta en este trabajo.

2. Objetivo del Estudio

Evaluar los efectos del uso de enmiendas orgánicas a base de leonardita (Mastersoil®/Maxxsoil®) sobre el rendimiento de los cultivos de soja, maíz y trigo, mediante ensayos conducidos durante múltiples ciclos agrícolas entre las campañas 2018/19 y 2025/26. Asimismo, analizar el efecto acumulado de su aplicación a lo largo del período experimental sobre las propiedades físicas, químicas y estructurales del suelo.

3. Materiales y Métodos

3.1. Descripción de los ensayos y tratamientos

Los ensayos se llevaron a cabo en el establecimiento Las Delicias, ubicado en el partido de Junín, provincia de Buenos Aires, bajo condiciones de producción representativas de la región Pampeana. El diseño experimental se implementó en dos módulos experimentales permanentes: Módulo 1: Monte (Coordenadas: 35°08'54.29" S; 60°16'01.58" O) y Módulo 2: Calle (Coordenadas: 34°36'30.42" S; 60°53'42.43" O). La localización de los módulos se presenta en la Figura 1.

Los ensayos se desarrollaron a lo largo de múltiples campañas agrícolas comprendidas entre 2018/19 y 2025/26, incluyendo los cultivos de maíz, soja y trigo, así como secuencias de doble cultivo. La Tabla 1 resume las campañas, cultivos evaluados y aquellas incluidas en el presente informe.

Figura 1: Detalle del sitio experimental y tratamientos.



Tabla 1. Detalle de las campañas totales, cultivos y campañas incluidas en el informe.

Campaña	Cultivo	Incluido en el informe
2018/19	Maíz, Soja	Sí
2019/20	Maíz, Soja	Sí
2020/21	Soja	Sí
2021/22	Soja	Sí
2022/23	Trigo-Soja de segunda	No
2023/24	Sorgo forrajero	No
2024/25	Soja	Sí
2025/26	Trigo-Maíz de segunda	Sí

El esquema experimental correspondió a un diseño de parcelas permanentes con tratamientos fijos, distribuidos al azar dentro de cada repetición, con tres repeticiones por tratamiento y por módulo. Cada unidad experimental tuvo una superficie de 18,9 m × 50 m, manteniéndose constante su ubicación a lo largo de las distintas campañas agrícolas.

Este diseño permitió evaluar tanto la respuesta productiva de los cultivos en cada campaña como los efectos acumulados de largo plazo derivados de la aplicación sostenida de los tratamientos.

Se evaluaron cuatro combinaciones de fertilización química y biológica, diferenciadas según cultivo. Los tratamientos aplicados para maíz, soja y trigo se detallan en las Tablas 2, 3 y 4, respectivamente.

Tabla 2. Descripción de los tratamientos para el cultivo de maíz

Tratamiento	Descripción
T1	Testigo con manejo del productor. Se aplicaron 100 kg/ha de MAP en línea.
T2	Reducción al 70% de la dosis: 70 kg/ha de MAP en línea.
T3	Igual que T2 más aplicación de Mastersoil® (24 L/ha) con pulverizador.
T4	Sólo Mastersoil® (24 L/ha). Sin aplicación de MAP.

Tabla 3. Descripción de los tratamientos para el cultivo de soja

Tratamiento	Descripción
T1	Testigo con manejo del productor. Se aplicaron 80 kg/ha de SPT.
T2	Reducción al 30% de la dosis: 14–25 kg/ha de SPT (según campaña).
T3	Igual que T2 más aplicación de Mastersoil® / Maxxsoil® (6–28 L/ha) con pulverizador.
T4	Sólo Mastersoil® / Maxxsoil® (6–28 L/ha). Sin aplicación de SPT.

Tabla 4. Descripción de los tratamientos para el cultivo de trigo

Tratamiento	Descripción
T1	Testigo con manejo del productor. Se aplicaron 100 kg/ha de mezcla 405.
T2	Reducción al 50% de la dosis: 50 kg/ha de mezcla 405.
T3	Igual que T2 más aplicación de Maxxsoil® (6 L/ha) con pulverizador.
T4	Sólo Maxxsoil® (6 L/ha). Sin aplicación de mezcla 405.

Nota: El producto formulado a base de leonardita utilizado varió a lo largo del experimento. Durante las primeras campañas se aplicó Mastersoil®, formulación original del producto, con dosis comprendidas entre 20 y 28 L ha⁻¹. En los ciclos más recientes se utilizó Maxxsoil®, formulación concentrada del mismo, con una dosis de 6 L ha⁻¹. En ambos casos, la aplicación respondió a una misma línea tecnológica basada en leonardita, ajustándose las dosis en función de la concentración del producto.

La fertilización adicional se ajustó según el cultivo, el tratamiento y la campaña, e incluyó, cuando correspondió, la aplicación de urea a razón de 150 kg ha⁻¹ en maíz y trigo.

La aplicación de los insumos se realizó previo a la siembra de cada cultivo. Las fechas de siembra se concentraron a comienzos de octubre para maíz, principios de noviembre para soja y mediados de julio para trigo.

La cosecha se efectuó entre abril y mayo para maíz y soja, según la campaña, y durante mediados de diciembre para trigo.

3.2. Determinaciones del cultivo y del suelo

3.2.1. Determinaciones del cultivo

El rendimiento de grano se cuantificó mediante cosechadora mecánica equipada con monitor de rendimiento, realizándose la medición sobre la totalidad de cada parcela experimental.

3.2.2. Determinaciones del suelo

El muestreo de suelo se realizó al finalizar la secuencia de cultivos, en octubre de 2024. En cada parcela se seleccionaron tres sitios de submuestreo al azar, a partir de los cuales se obtuvieron muestras compuestas por sitio. Las extracciones se efectuaron a dos profundidades: 0–5 cm y 5–20 cm.

Las muestras fueron secadas en estufa, posteriormente tamizadas con malla de 2 mm de diámetro y enviadas al laboratorio A & S Agroconsultora (Juan Cruz Martínez y Martín O. Petroni) para su análisis.

Las determinaciones de suelo incluyeron indicadores físicos, químicos y estructurales, seleccionados para evaluar cambios asociados al manejo de largo plazo:

Carbono orgánico del suelo (COS): determinado por combustión húmeda según el método de Walkley & Black (1934).

Índice de estabilidad de agregados (IEA): evaluado mediante tamizado en agua, utilizando el método de Douglas & Goss (1982) con modificaciones.

Densidad aparente (DAP): determinada mediante el método del cilindro, de acuerdo con Burke et al. (1986).

Infiltración: medida en campo mediante infiltrómetro de un anillo.

Resistencia mecánica a la penetración: determinada con penetrómetro manual marca Fild.

pH del suelo: medido con pehachímetro portátil.

Conductividad eléctrica (CE): evaluada mediante conductímetro de mano.

Fósforo disponible (P suelo): determinado por el método de Bray y Kurtz N°1.

3.3. Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó por cultivo, integrando múltiples campañas agrícolas cuando correspondió. En particular, se analizaron dos campañas en maíz, cinco campañas en soja y una campaña en trigo.

Para cada cultivo, los datos de rendimiento se analizaron mediante análisis de varianza (ANOVA), considerando como factores campaña, tratamiento y su interacción campaña $\times$ tratamiento. Este enfoque permitió evaluar tanto la respuesta promedio a los tratamientos como la consistencia de dicha respuesta entre campañas.

Los módulos experimentales no presentaron efectos significativos sobre la variable analizada, por lo que no fueron considerados como factor fijo en el análisis final. Las repeticiones se consideraron anidadas dentro de cada módulo, mientras que los tratamientos se consideraron anidados dentro de las repeticiones, de acuerdo con la estructura experimental del ensayo.

Cuando se detectaron efectos significativos ($p < 0,05$), las medias se compararon mediante pruebas de comparación múltiple apropiadas. Los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas fueron verificados previamente al análisis.

4. Resultados y Discusión

4.1. Rendimiento de los cultivos

4.1.1. Rendimiento del cultivo de maíz

El rendimiento del cultivo de maíz fue significativamente mayor en la campaña 2018/19 (promedio: 11.021 kg ha⁻¹) en comparación con 2019/20 (8.839 kg ha⁻¹) ($P < 0,001$; Tabla 5), evidenciando un marcado efecto ambiental entre campañas.

Asimismo, se detectaron diferencias significativas entre tratamientos ($P < 0,05$; Tabla 5, Figura 2). El tratamiento 3 (reducción de P + aplicación de Mastersoil®/ Maxxsoil®) presentó rendimientos estadísticamente superiores al tratamiento 4 (sólo Mastersoil®/ Maxxsoil®), mientras que los tratamientos 1 y 2 no mostraron diferencias significativas entre sí ni respecto de los tratamientos extremos.

La interacción campaña $\times$ tratamiento no resultó significativa ($P = 0,509$), lo que indica que los tratamientos mantuvieron su comportamiento relativo entre campañas. En este contexto, el tratamiento 3 se posicionó como el más eficiente y estable a lo largo de ambas campañas agrícolas (Figura 3), registrando rendimientos cercanos a 11.000 kg ha⁻¹ en 2018/19 y 9.500 kg ha⁻¹ en 2019/20.

Esta consistencia interanual contrasta con las mayores fluctuaciones observadas en los restantes tratamientos, que evidenciaron caídas más pronunciadas o respuestas menos estables entre campañas.

Tabla 5. Resultados del ANOVA sobre el rendimiento del cultivo de maíz.

Factor	F valor	P valor	Interpretación
Campaña	71.5	<0.001	El ambiente explicó gran parte de la variabilidad del rendimiento
Tratamiento	4.0	0.027	Los tratamientos generaron diferencias significativas de rendimiento
Campaña $\times$ Tratamiento	0.8	0.509	Los tratamientos mantuvieron su comportamiento relativo entre campañas

Figura 2. Rendimiento promedio de maíz según estrategia de fertilización en las campañas 2018/19 (módulo Monte) y 2019/20 (módulo Calle). Los valores representan medias $\pm$ desvío estándar. Tratamientos: T1, dosis plena de P; T2, reducción de dosis de P; T3, reducción de P + aplicación de Mastersoil® / Maxxsoil®; T4, aplicación exclusiva de Mastersoil® / Maxxsoil®, sin fertilización fosfatada.

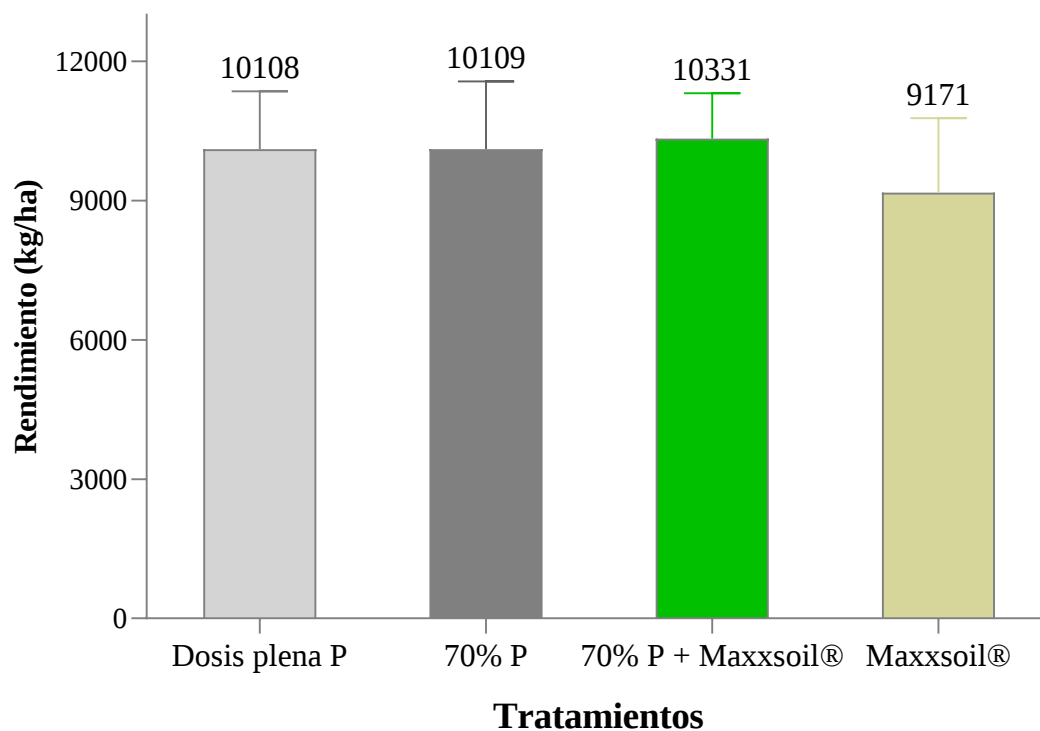
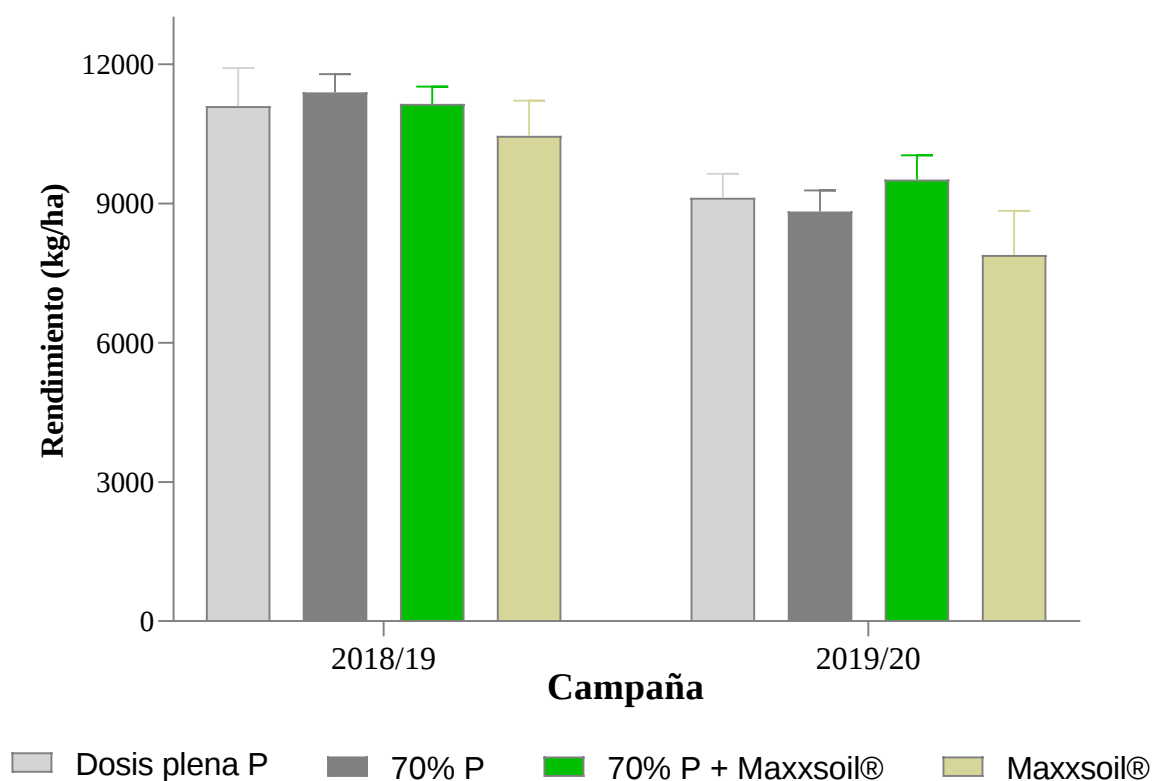


Figura 3. Rendimiento de maíz (kg ha^{-1}) por campaña (2018/19, módulo Monte; 2019/20, módulo Calle) según estrategia de fertilización. Los valores representan medias $\pm$ desvío estándar. Tratamientos: T1, dosis plena de P; T2, reducción de dosis de P; T3, reducción de P + aplicación de Mastersoil® / Maxxsoil®; T4, aplicación exclusiva de Mastersoil® / Maxxsoil®, sin fertilización fosfatada.



4.1.2. Rendimiento del cultivo de soja

Las condiciones ambientales entre campañas explicaron una proporción significativa de la variación observada en el rendimiento del cultivo de soja ($P < 0,001$; Tabla 6). Las campañas 2024/25 y 2018/19 presentaron los mayores rendimientos, mientras que 2020/21 registró el valor más bajo, reflejando un ambiente marcadamente restrictivo. Las campañas 2019/20 y 2021/22 mostraron rendimientos intermedios, claramente diferenciados del grupo de mayor productividad.

Más allá de esta marcada variabilidad interanual, se detectaron diferencias significativas entre tratamientos ($P < 0,05$; Tabla 6, Figura 4). En este contexto, el tratamiento 3 (reducción de P + aplicación de Mastersoil® / Maxxsoil®) se posicionó como el más eficiente, presentando rendimientos significativamente superiores al resto de los tratamientos.

La interacción campaña $\times$ tratamiento no resultó significativa ($P = 0,959$), lo que indica que los tratamientos mantuvieron su comportamiento relativo a lo largo de las campañas evaluadas. En particular, el tratamiento 3 mostró un desempeño consistentemente superior en todas las campañas (Figura 5), incluso bajo condiciones ambientales desfavorables como las registradas en 2020/21.

Tabla 6: Resultados del ANOVA sobre el rendimiento del cultivo de soja.

Factor	F valor	P valor	Interpretación
Campaña	138.7	<0.001	El ambiente explicó gran parte de la variabilidad del rendimiento
Tratamiento	4.0	0.013	Los tratamientos generaron diferencias significativas de rendimiento
Campaña $\times$ Tratamiento	0.4	0.959	Los tratamientos mantuvieron su comportamiento relativo entre campañas

Figura 4. Rendimiento promedio de soja (kg ha^{-1}) según estrategia de fertilización. Los valores corresponden al promedio de cinco campañas agrícolas y representan medias $\pm$ desvío estándar. Tratamientos: T1, dosis plena de P; T2, reducción de dosis de P; T3, reducción de P + aplicación de Mastersoil® / Maxxsoil®; T4, aplicación exclusiva de Mastersoil® / Maxxsoil®, sin fertilización fosfatada.

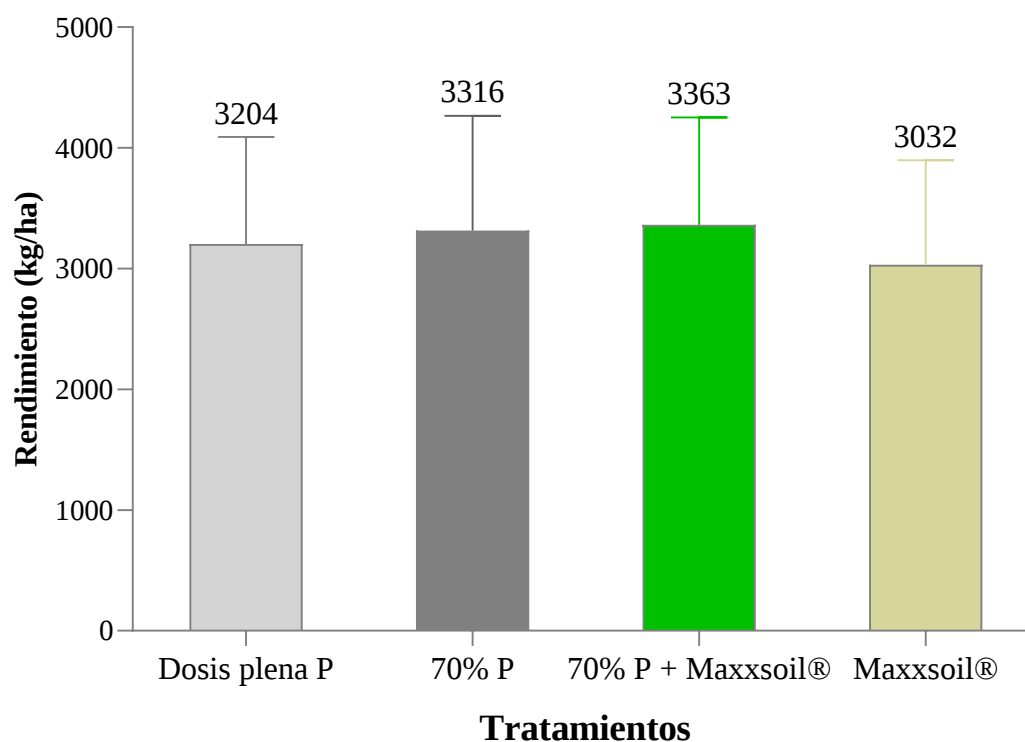
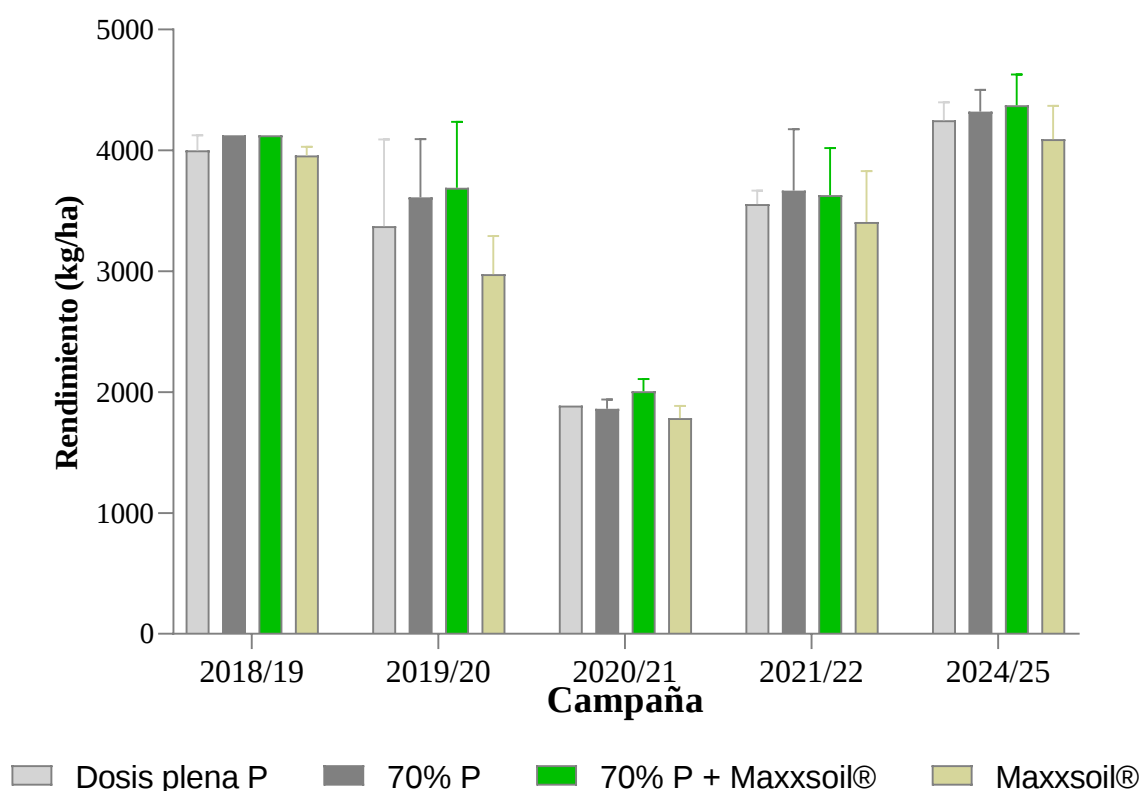


Figura 5. Rendimiento de soja (kg ha^{-1}) por campaña (2018/19 a 2024/25) según estrategia de fertilización. Los valores representan medias $\pm$ desvío estándar. Tratamientos: T1, dosis plena de P; T2, reducción de dosis de P; T3, reducción de P + aplicación de Mastersoil® / Maxxsoil®; T4, aplicación exclusiva de Mastersoil® / Maxxsoil®, sin fertilización fosfatada.



4.1.3. Rendimiento del cultivo de trigo

En el cultivo de trigo se detectaron diferencias significativas entre tratamientos en el rendimiento de grano ($P < 0,05$), evidenciando respuestas contrastantes según la estrategia de fertilización y el uso de enmienda biológica (Figura 6).

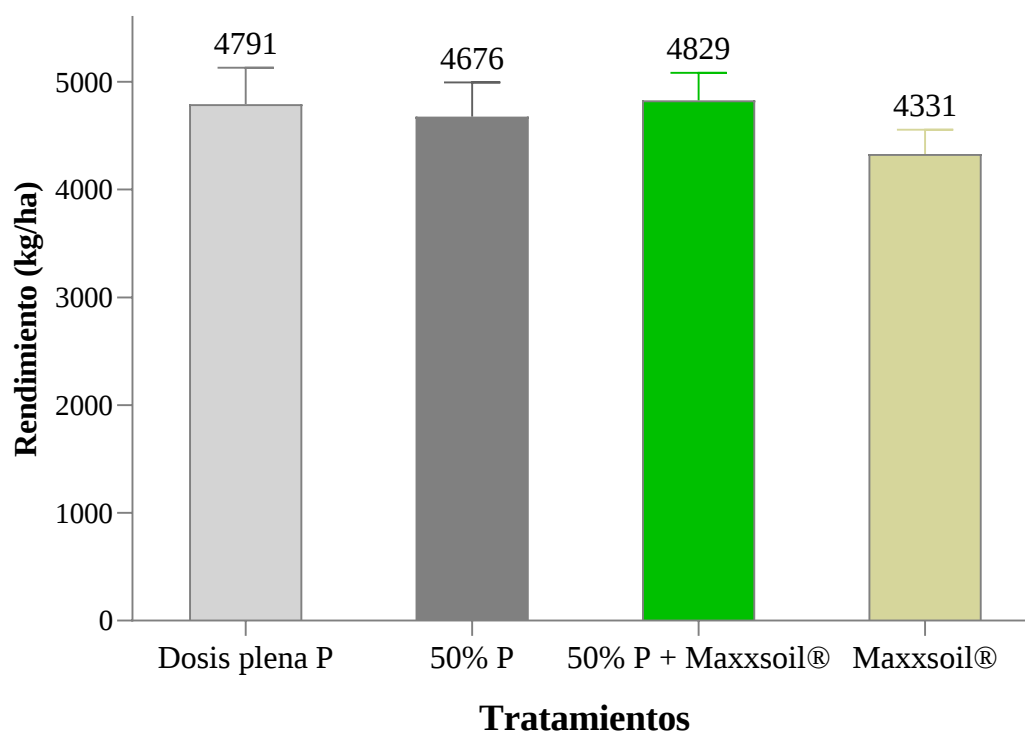
El tratamiento 3 (reducción del 50 % de la fertilización química combinada con la aplicación de Maxxsoil®) presentó el mayor rendimiento promedio del ensayo, sin diferenciarse estadísticamente del tratamiento 1, correspondiente al manejo tradicional del productor con fertilización completa. Estos resultados indican que la incorporación de Maxxsoil® permitió compensar la reducción de la dosis de fertilizante, alcanzando niveles productivos equivalentes al manejo convencional.

El tratamiento 2, con una reducción del 50 % de la fertilización sin el agregado de Maxxsoil®, mostró una leve disminución del rendimiento, aunque no se diferenció

estadísticamente del manejo del productor, lo que sugiere que, en las condiciones evaluadas, el cultivo mantuvo su productividad aun con una menor provisión de nutrientes.

En contraste, el tratamiento 4, basado exclusivamente en la aplicación de Maxxsoil® sin fertilización química, registró el menor rendimiento, diferenciándose significativamente de los tratamientos 1 y 3. Este resultado indica que, si bien el producto aporta beneficios al sistema, no resulta suficiente por sí solo para sostener el rendimiento del cultivo, sino que actúa de manera complementaria a la fertilización química.

Figura 6. Rendimiento de trigo (kg ha^{-1}) según estrategia de fertilización, correspondiente a una única campaña agrícola. Los valores representan medias $\pm$ desvío estándar. Tratamientos: T1, dosis plena de P; T2, reducción de dosis de P; T3, reducción de P + aplicación de Maxxsoil®; T4, aplicación exclusiva de Maxxsoil®, sin fertilización fosfatada.



4.1.4. Estabilidad de los rendimientos

El tratamiento 3 se destacó como la estrategia más eficiente y estable en los cultivos de soja y maíz (Tabla 7). En ambos casos, el rendimiento se mantuvo consistentemente elevado a lo largo de las campañas evaluadas, independientemente de la variabilidad ambiental, lo que evidencia una alta capacidad de adaptación del sistema productivo bajo este manejo.

En el cultivo de soja se observó una mayor variabilidad interanual, atribuible principalmente a la inclusión de un mayor número de campañas y a la ocurrencia de un ciclo marcadamente restrictivo (2020/21), que amplificó la dispersión de los datos. En contraste, el cultivo de maíz fue evaluado en un menor número de campañas, lo que se tradujo en coeficientes de variación más bajos y una estabilidad aparente más marcada.

A pesar de estas diferencias contextuales, el tratamiento 3 presentó los coeficientes de variación más bajos en ambos cultivos (25,9 % en soja y 11,1 % en maíz), consolidándose como la alternativa más robusta para maximizar simultáneamente el rendimiento promedio y la consistencia productiva frente a escenarios ambientales contrastantes.

En el caso del cultivo de trigo, la evaluación se realizó en una única campaña, por lo que no fue posible cuantificar la estabilidad interanual mediante indicadores de variabilidad. No obstante, los resultados obtenidos mostraron que el tratamiento 3 alcanzó rendimientos equivalentes al manejo del productor, aun bajo un esquema de reducción del 50 % de la fertilización, lo que sugiere un comportamiento consistente con el observado en maíz y soja en términos de eficiencia del uso de insumos.

Tabla 7. Comparación de estabilidad en los rendimientos de soja y maíz

Tratamiento	CV Soja (%)	CV Maíz (%)	Interpretación
T1	27.0	13.8	Mucho más estable en maíz que en soja
T2	27.6	17.9	Moderadamente estable en maíz, muy sensible en soja
T3	25.9	11.1	El más estable en ambos cultivos
T4	28.7	19.8	El menos estable en ambos cultivos

4.1.5. Síntesis

El tratamiento 3, basado en la reducción de la dosis de fertilización química combinada con la aplicación de Mastersoil® / Maxxsoil®, se consolidó como la estrategia más eficiente y estable en los cultivos de maíz y soja, integrando altos rendimientos con una menor variabilidad interanual.

En el cultivo de trigo, si bien la información corresponde a una única campaña, el desempeño del tratamiento 3 fue equivalente al manejo tradicional del productor, aun con una reducción significativa de la fertilización, reforzando la hipótesis de que las enmiendas a base de leonardita mejoran la eficiencia del uso de nutrientes cuando se aplican de manera complementaria a la fertilización química.

En conjunto, los resultados obtenidos en los tres cultivos extensivos evaluados indican que la estrategia de reducción de fertilización combinada con Mastersoil® / Maxxsoil® constituye una alternativa agronómica robusta, capaz de optimizar la productividad, reducir el riesgo productivo y mejorar la eficiencia del sistema en escenarios de variabilidad ambiental.

4.2. Propiedades del suelo

Los resultados presentados reflejan el efecto acumulado de los tratamientos aplicados de manera continua desde el inicio de la campaña 2018/19 hasta el comienzo de la campaña 2024/25, correspondientes al análisis de suelo realizado previo a la siembra de la campaña 2024/25.

4.2.1. Efecto significativo del Módulo

Se detectaron diferencias significativas entre módulos ($P < 0,05$) en un conjunto amplio de variables edáficas, independientemente del tratamiento aplicado. Las variables influenciadas por el ambiente fueron:

- Carbono orgánico del suelo (COS) en ambos estratos
- pH superficial
- Conductividad eléctrica (CE) en superficie y profundidad
- Fósforo disponible (P suelo) en el estrato 0–5 cm
- Índice de estabilidad de agregados (IEA) superficial
- Infiltración

Estas diferencias reflejan contrastes estructurales y funcionales entre los ambientes Monte y Calle, probablemente asociados a variaciones en textura, historia de uso, cobertura vegetal y

dinámica hídrica. La sensibilidad de estas variables al contexto edáfico resalta la importancia de considerar el ambiente como factor clave en la interpretación de los efectos de manejo.

Desde un punto de vista agronómico, el ambiente Monte presentó mayores contenidos de carbono orgánico, mejor estabilidad estructural e infiltración, mientras que el ambiente Calle mostró valores superiores de conductividad eléctrica, pH superficial y fósforo disponible (Tabla 8). Estos atributos edáficos contrastantes condicionan la respuesta del suelo a las prácticas de manejo implementadas.

Tabla 8. Indicadores edáficos promedio por módulo (Calle y Monte). Valores promedio obtenidos previo al inicio de la campaña 2024/25.

Variable	Monte	Calle
COS 0-5 cm (%)	2,1	2,0
COS 5-20 cm (%)	1,1	0,7
CE 0-5 cm ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	417	775
CE 5-20 cm ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	412	848
P suelo 0-5 cm (mg kg^{-1})	8,9	10,1
IEA 0-5 cm (%)	38,5	29,8
Infiltración (cm h^{-1})	3,2	1,7

4.2.2. Efecto significativo de los tratamientos

Se observaron diferencias significativas entre tratamientos ($P < 0,05$), independientemente del módulo, en las siguientes variables:

- pH superficial
- Fósforo disponible (P suelo) en 0–5 cm y 5–20 cm
- Índice de estabilidad de agregados (IEA) en profundidad
- Resistencia a la penetración

La aplicación de Mastersoil® / Maxxsoil®, tanto de manera individual como en combinación con fertilización fosfatada reducida, generó efectos acumulativos positivos sobre la calidad química y estructural del suelo. En particular, se evidenciaron mejoras en:

- la regulación del pH superficial (Figura 7),
- la disponibilidad de fósforo en ambos estratos (Figuras 8 y 9),
- la estabilidad de agregados en profundidad (Figura 10),
- la resistencia mecánica a la penetración (Figura 11).

El tratamiento 3 (reducción de la dosis de fertilización combinada con Mastersoil® / Maxxsoil®) fue el que mostró la mayor eficacia en la mejora integral de las propiedades edáficas, consolidándose como una estrategia agronómica promisoría para el manejo sustentable del suelo.

Figura 7. pH del suelo en el estrato superficial (0–5 cm), determinado previo al inicio de la campaña 2024/25, luego de seis años de aplicación continua de los tratamientos. Los valores representan medias $\pm$ desvío estándar. Tratamientos: T1, dosis plena de P; T2, reducción de dosis de P; T3, reducción de P + aplicación de Mastersoil® / Maxxsoil®; T4, aplicación exclusiva de Mastersoil® / Maxxsoil®, sin fertilización fosfatada. Las diferencias observadas corresponden a variaciones de baja magnitud, pero consistentes.

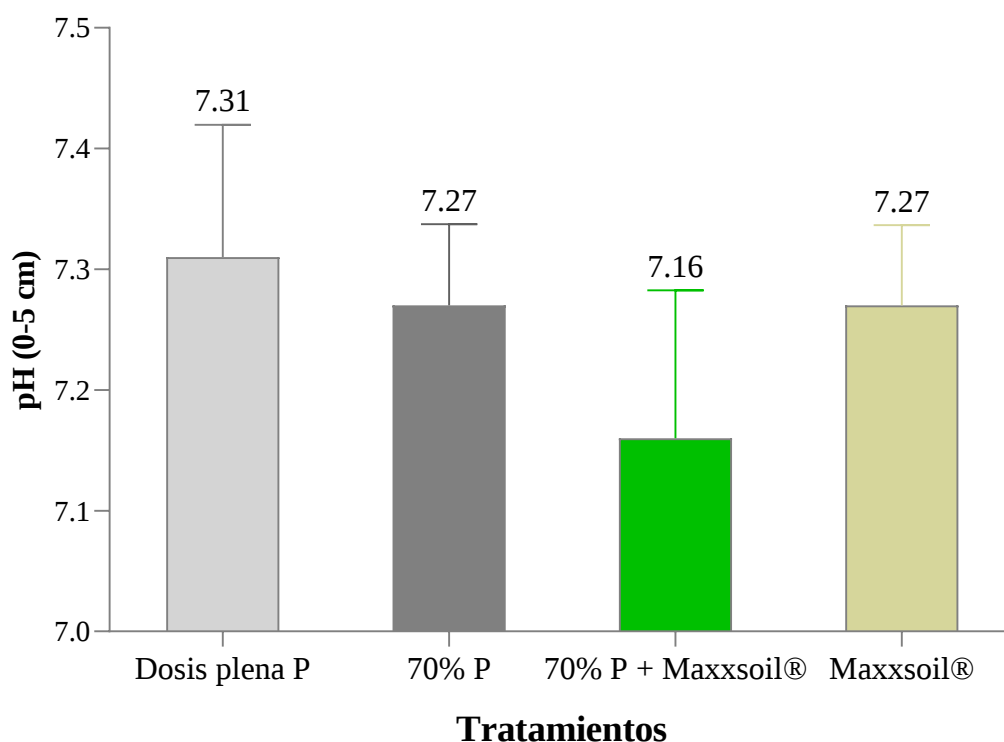


Figura 8. Fósforo disponible del suelo en el estrato superficial (0–5 cm), determinado previo al inicio de la campaña 2024/25, luego de seis años de aplicación continua de los tratamientos. Los valores representan medias $\pm$ desvío estándar. Tratamientos: T1, dosis plena de P; T2, reducción de dosis de P; T3, reducción de P + aplicación de Mastersoil® / Maxxsoil®; T4, aplicación exclusiva de Mastersoil® / Maxxsoil®, sin fertilización fosfatada.

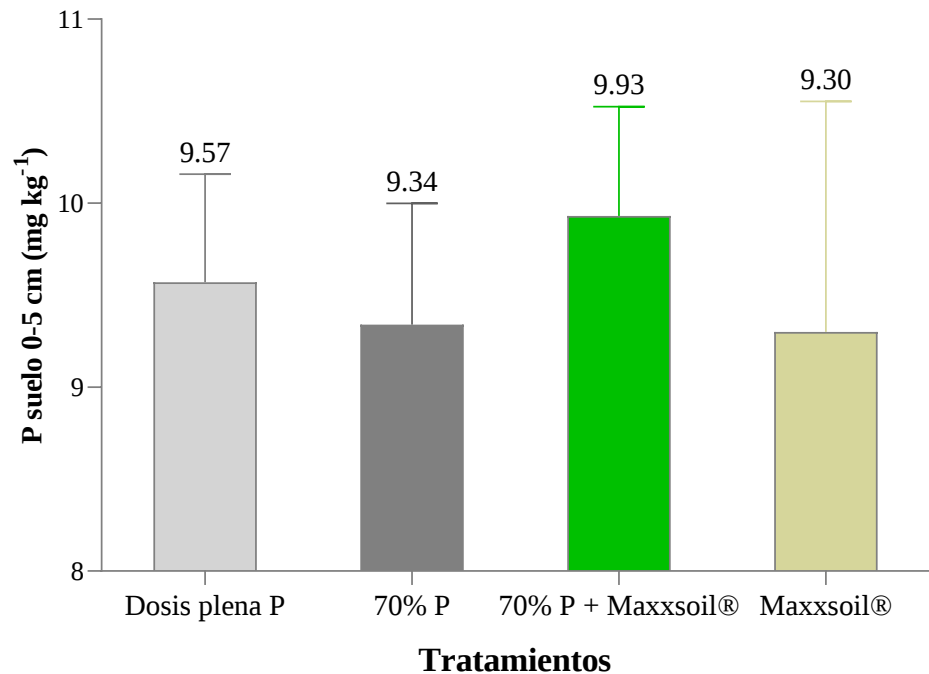


Figura 9. Fósforo disponible del suelo en el estrato profundo (5-20 cm), determinado previo al inicio de la campaña 2024/25, luego de seis años de aplicación continua de los tratamientos. Los valores representan medias $\pm$ desvío estándar. Tratamientos: T1, dosis plena de P; T2, reducción de dosis de P; T3, reducción de P + aplicación de Mastersoil® / Maxxsoil®; T4, aplicación exclusiva de Mastersoil® / Maxxsoil®, sin fertilización fosfatada.

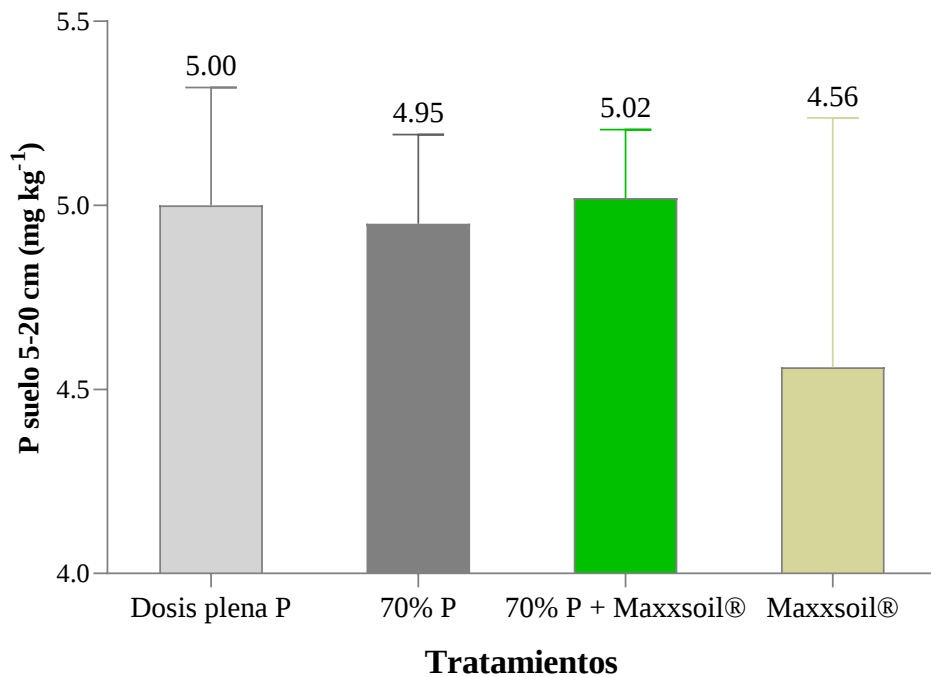


Figura 10. Índice de estabilidad de agregados (IEA) en el estrato profundo (5-20 cm), determinado previo al inicio de la campaña 2024/25, luego de seis años de aplicación continua de los tratamientos. Los valores representan medias $\pm$ desvío estándar. Tratamientos: T1, dosis plena de P; T2, reducción de dosis de P; T3, reducción de P + aplicación de Mastersoil® / Maxxsoil®; T4, aplicación exclusiva de Mastersoil® / Maxxsoil®, sin fertilización fosfatada.

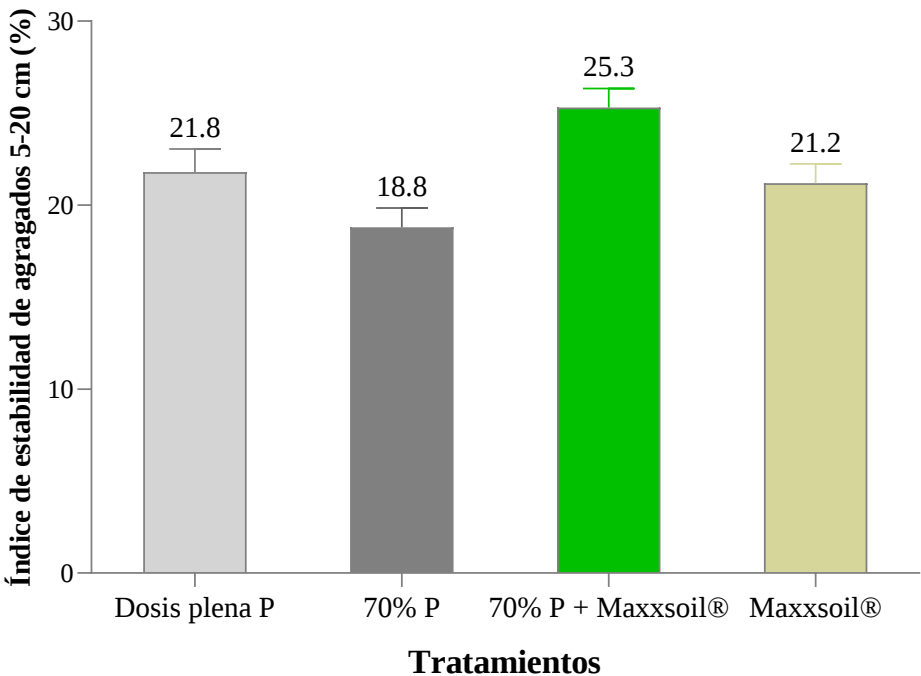
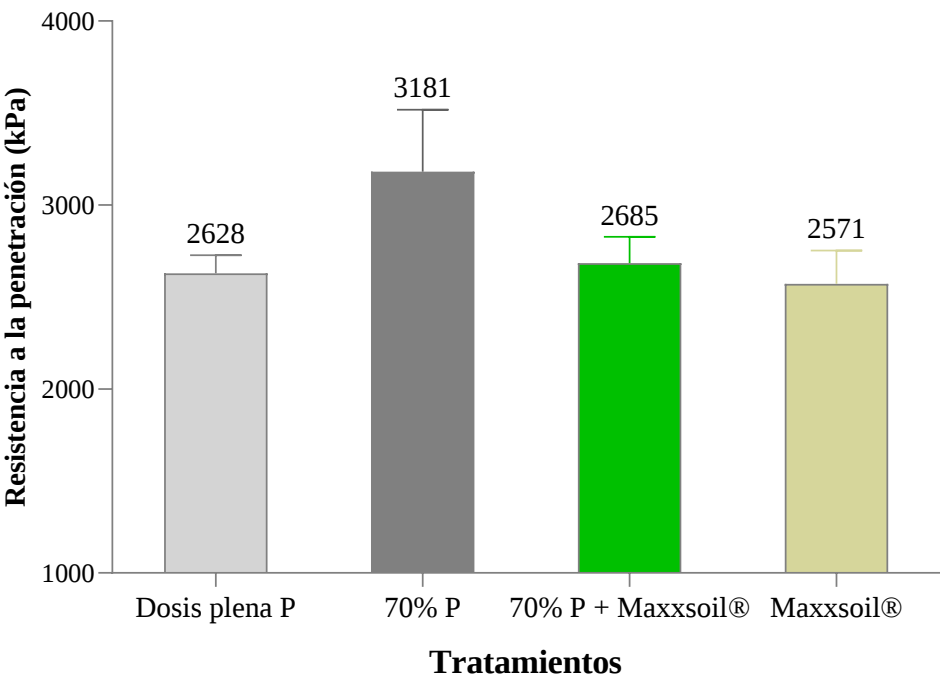


Figura 11: Resistencia a la penetración, determinada previo al inicio de la campaña 2024/25, luego de seis años de aplicación continua de los tratamientos. Los valores representan medias $\pm$ desvío estándar. Tratamientos: T1, dosis plena de P; T2, reducción de dosis de P; T3, reducción de P + aplicación de Mastersoil® / Maxxsoil®; T4, aplicación exclusiva de Mastersoil® / Maxxsoil®, sin fertilización fosfatada.



4.2.3. Interacción significativa Módulo × Tratamiento

Las siguientes variables edáficas presentaron efectos significativos de interacción entre ambiente (Módulo) y tratamiento ($P < 0,05$), evidenciando una respuesta dependiente del contexto edáfico: COS en ambos estratos, IEA superficial e infiltración.

La magnitud del efecto fue más marcada en el ambiente Monte, donde los tratamientos (en particular aquellos que incluyeron la aplicación de Mastersoil® / Maxxsoil®) potenciaron la acumulación de materia orgánica en ambos estratos (Figura 12) y mejoraron la funcionalidad estructural e hídrica del suelo (Figura 13). En contraste, en el ambiente Calle, las diferencias entre tratamientos fueron menos pronunciadas, lo que sugiere una menor sensibilidad de estas variables al manejo bajo ese contexto edáfico.

Para una mejor comprensión de la interacción entre ambiente y manejo, las Figuras 12 y 13 muestran cómo la aplicación de Mastersoil® / Maxxsoil® modula la acumulación de carbono orgánico y la funcionalidad estructural e hídrica del suelo en contextos edáficos contrastantes.

Figura 12. Carbono orgánico del suelo (%) en el estrato superficial (0–5 cm) y subsuperficial (5–20 cm), determinado previo al inicio de la campaña 2024/25, luego de seis años de aplicación continua de los tratamientos, en los ambientes Calle y Monte. Los valores representan medias $\pm$ desvío estándar. Tratamientos: T1, dosis plena de P; T2, reducción de dosis de P; T3, reducción de P + aplicación de Mastersoil® / Maxxsoil®; T4, aplicación exclusiva de Mastersoil® / Maxxsoil®, sin fertilización fosfatada.

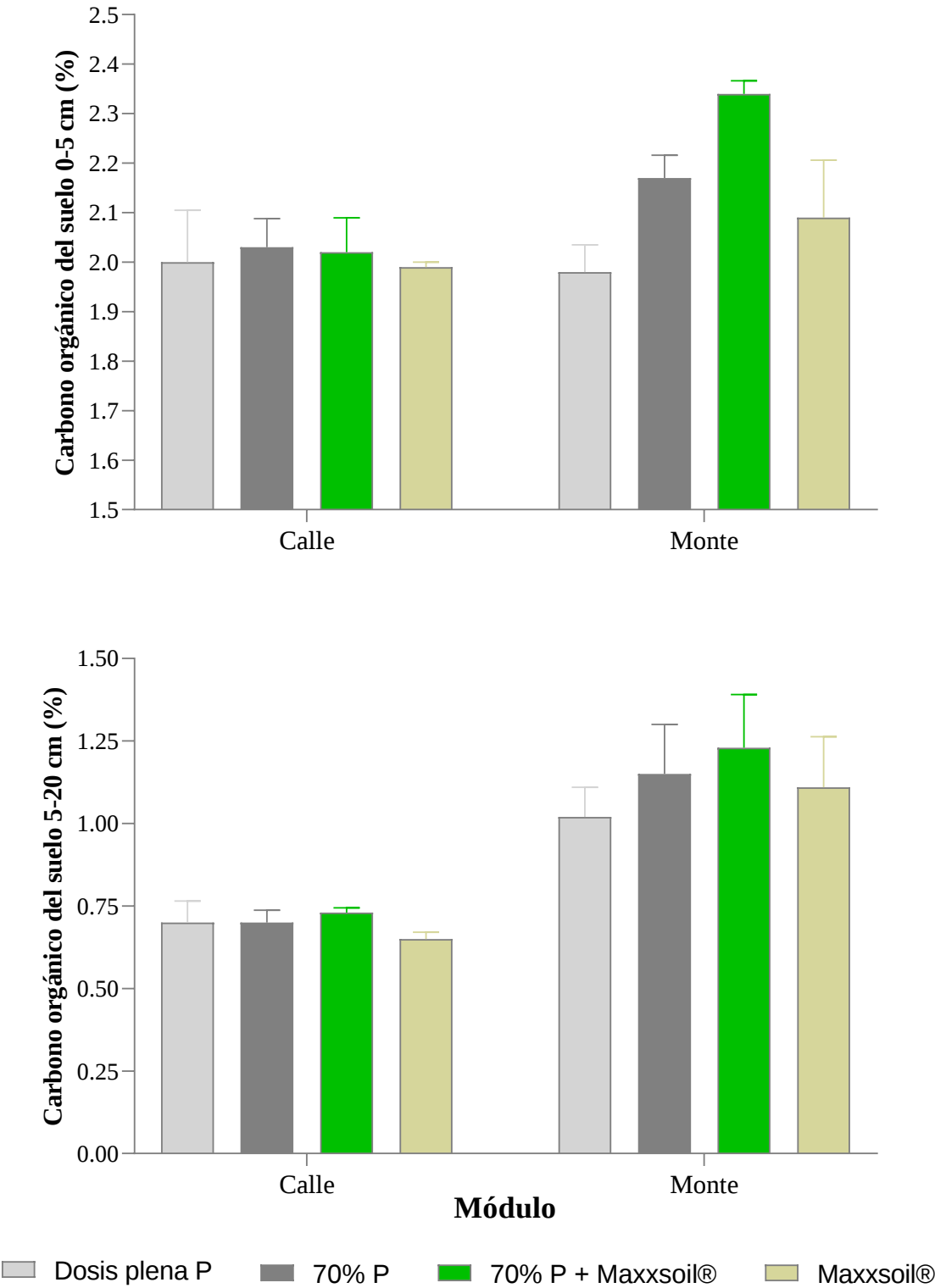
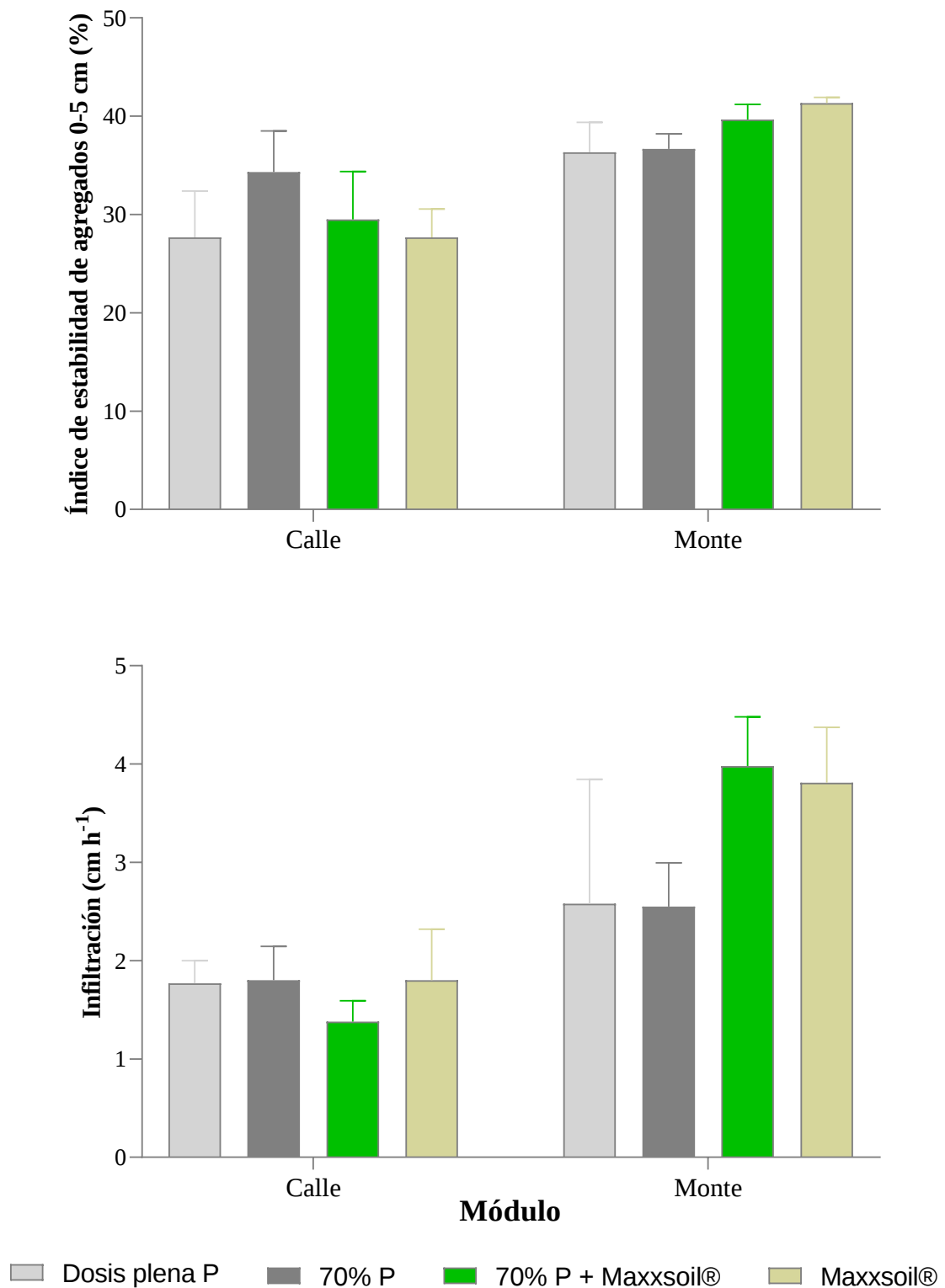


Figura 13. Índice de estabilidad de agregados en superficie e infiltración del suelo, determinados previo al inicio de la campaña 2024/25, luego de seis años de aplicación continua de los tratamientos, en los módulos Calle y Monte. Los valores representan medias $\pm$ desvío estándar. Tratamientos: T1, dosis plena de P; T2, reducción de dosis de P; T3, reducción de P + aplicación de Mastersoil® / Maxxsoil®; T4, aplicación exclusiva de Mastersoil® / Maxxsoil®, sin fertilización fosfatada.



4.2.4. Variables sin efecto significativo

Las siguientes propiedades no mostraron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos, módulos ni su interacción ($P > 0,05$):

- Densidad aparente en 0–5 cm y 5–20 cm
- pH en profundidad (5–20 cm)

Estas variables se mantuvieron estables durante el período evaluado, lo que sugiere una baja sensibilidad a los manejos aplicados en los estratos considerados, particularmente en profundidad, donde los cambios suelen manifestarse de manera más gradual.

4.2.5. Síntesis de los efectos de la leonardita sobre las propiedades físicas, químicas y estructurales del suelo

La aplicación de enmiendas a base de leonardita (Mastersoil® / Maxxsoil®), tanto de manera individual como en combinación con fertilización fosfatada reducida, generó efectos acumulativos positivos sobre un conjunto de propiedades químicas, físicas y estructurales del suelo, evidenciando su contribución al mejoramiento integral de la calidad edáfica.

4.2.5.1. Propiedades químicas

La aplicación de Mastersoil® / Maxxsoil® mostró impactos favorables sobre la materia orgánica del suelo (COS) y la disponibilidad de fósforo, con respuestas diferenciadas según el ambiente.

- En ambos estratos evaluados (0–5 y 5–20 cm), los tratamientos que incluyeron Mastersoil® / Maxxsoil® incrementaron los contenidos de COS, siendo este efecto más marcado en el ambiente Monte.
- La disponibilidad de fósforo se vio favorecida por la aplicación de Mastersoil® / Maxxsoil®, alcanzando —e incluso superando levemente— los niveles observados bajo fertilización completa. Este efecto fue particularmente evidente en profundidad, donde la combinación con fertilización reducida (T3) permitió mantener o mejorar los niveles de fósforo disponible de manera sostenida.
- Se observó una leve reducción del pH superficial, lo que sugiere un efecto acidificante moderado, sin implicancias negativas para el sistema productivo en las condiciones evaluadas.

4.2.5.2. Propiedades físicas

La aplicación de Mastersoil® / Maxxsoil® contribuyó a mejorar la funcionalidad física del suelo, especialmente en relación con el movimiento del agua y la resistencia mecánica.

- Los tratamientos T3 y T4 presentaron las mayores tasas de infiltración, indicando una mejora en la porosidad funcional del suelo, particularmente en ambientes con mayor estabilidad estructural, como Monte.

- En cuanto a la resistencia a la penetración, los tratamientos que incluyeron Mastersoil® / Maxxsoil® mostraron valores inferiores, lo que sugiere una reducción de la compactación superficial y una mejora en las condiciones físicas para el crecimiento radicular.

4.2.5.3. Propiedades estructurales

El impacto más consistente de la aplicación de leonardita se observó sobre la estructura del suelo, evaluada a través del índice de estabilidad de agregados (IEA).

- Mastersoil® / Maxxsoil® favoreció la formación y persistencia de agregados estables, mejorando la estructura tanto en superficie como en profundidad.

- El tratamiento T3 fue el más efectivo, registrando incrementos significativos del IEA en ambos estratos, con una respuesta particularmente marcada en el ambiente Monte.

4.2.5.4. Síntesis integradora

En conjunto, los resultados indican que Mastersoil® / Maxxsoil® actuó como un mejorador edáfico integral, con efectos positivos sobre la fertilidad química, la funcionalidad física y la estabilidad estructural del suelo. Su aplicación, especialmente en combinación con fertilización fosfatada reducida (T3), se consolidó como una estrategia agronómica eficaz para promover la sustentabilidad del sistema productivo, mejorar la calidad del suelo y potenciar su resiliencia frente a condiciones ambientales contrastantes.

5. Conclusiones

Este ensayo de larga duración demuestra que la incorporación sistemática de enmiendas a base de leonardita (Mastersoil® / Maxxsoil®) redefine el rol del manejo nutricional tradicional, desplazándolo desde un enfoque centrado exclusivamente en la reposición de nutrientes hacia una estrategia integral de construcción de sistemas productivos más eficientes, estables y resilientes.

Los resultados confirman que Mastersoil® / Maxxsoil® no reemplaza a la fertilización química, sino que amplifica su eficiencia. En particular, la combinación con dosis reducidas de fósforo (tratamiento T3) emerge como un punto de equilibrio agronómico donde se maximiza la productividad sin aumentar la dependencia de insumos externos. Este hallazgo posiciona a la leonardita como una herramienta clave para optimizar el uso de fertilizantes en escenarios de creciente presión económica y ambiental.

Más allá del nivel de rendimiento alcanzado, el principal aporte de la estrategia basada en leonardita reside en su capacidad para reducir la vulnerabilidad del sistema frente a la variabilidad ambiental. La consistencia observada en distintos cultivos, campañas y ambientes indica que el beneficio no es coyuntural, sino estructural, asociado a un funcionamiento más robusto del sistema suelo–cultivo. En este sentido, Mastersoil® / Maxxsoil® actúa como un factor de estabilidad productiva, especialmente relevante en contextos de incertidumbre climática.

El efecto acumulado sobre las propiedades químicas, físicas y estructurales del suelo evidencia que la aplicación sostenida de leonardita construye capital edáfico. Las mejoras observadas no responden a un efecto puntual, sino a un proceso progresivo que fortalece la fertilidad, la estructura y la funcionalidad del suelo, sentando las bases para una productividad sostenida en el tiempo. Esta dinámica posiciona al producto no solo como un insumo, sino como una inversión agronómica de mediano y largo plazo.

En conjunto, los resultados de este estudio indican que Mastersoil® / Maxxsoil® potencia la eficiencia del sistema productivo cuando se integra a esquemas de manejo integrados y eficientes, basados en el uso complementario y optimizado de los insumos, el ajuste al ambiente y la construcción progresiva de la calidad del suelo. Su aplicación sistemática permite reducir la dependencia de fertilización química sin comprometer la productividad, mejorar la estabilidad productiva interanual y fortalecer la resiliencia del sistema suelo–cultivo, contribuyendo al desarrollo de sistemas agrícolas más eficientes, más sustentables y mejor preparados para los desafíos productivos actuales y futuros.

Equipo de trabajo

El presente estudio fue desarrollado mediante el trabajo articulado entre Suelo Sano, profesionales independientes y el ámbito académico, integrando actividades de campo, análisis técnico y formación de recursos humanos.

Dirección y coordinación general del proyecto

Ing. Agr. Roberto Moroso

Fundador de Suelo Sano

Trabajo de campo y recolección de datos

Las actividades de implementación de los ensayos, seguimiento a campo y recolección de datos fueron realizadas por profesionales independientes tercerizados, entre los que se destacan:

Ing. Agr. Diego Ipucha (MP 3664)

Ing. Agr. Ezequiel Colaneri (MP 4132)

Ing. Agr. Carina Marder (MP 82-4-0607)

Ing. Agr. Lucas Senigaglia (MP 4200)

Ing. Agr. Franco Beccacece (MP 2971)

Parte de la información generada en el marco de estos ensayos corresponde a trabajos finales de grado para la obtención del título de Ingeniero Agrónomo en la Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires (UNNOBA), desarrollados por Diego Ipucha y Ezequiel Colaneri, bajo condiciones experimentales coincidentes con las aquí descriptas.

Recopilación de datos, análisis estadístico, interpretación de resultados y redacción del informe técnico

Ing. Agr. Dra. María de los Ángeles Rossini (CONICET – UNNOBA)

Nota de responsabilidades

El presente informe técnico se elaboró a partir de ensayos de larga duración coordinados por Suelo Sano, bajo la dirección del Ing. Agr. Roberto Moroso, con ejecución del trabajo de campo y recolección de datos realizada por profesionales independientes tercerizados.

La recopilación de la información, el análisis estadístico, la interpretación de los resultados y la redacción del informe fueron realizados por la Ing. Agr. Dra. María de los Ángeles Rossini (CONICET – UNNOBA), quien asume la responsabilidad técnica del contenido y de las conclusiones aquí presentadas, en el marco de criterios agronómicos y científicos.

Las conclusiones y recomendaciones incluidas en este informe se basan en las condiciones específicas de los ensayos descriptos y no sustituyen el asesoramiento profesional particular, por lo que su aplicación debe ser evaluada considerando las características propias de cada ambiente, sistema productivo y contexto de manejo. El uso de la información contenida en este documento es responsabilidad del lector.

6. Referencias

- Martínez Carretero, E., y Dalmasso, A. (2020). Restauración de ambientes degradados: aspectos teóricos y prácticos en tierras secas de Argentina.
- Pérez, M., et al. (2019). Comparación de indicadores de la desertificación en la Región Pampeana y en la frontera de expansión agropecuaria en la República Argentina. Instituto de Suelos, INTA.
- Rodríguez, L. y García, M. (2021). La leonardita en la agricultura: solución natural para una agricultura eficiente y sostenible.