

Artículo Original
Original Article

EFFECTOS DEL USO DE LA TIERRA EN LOS MICRONUTRIENTES DEL SUELO: EVIDENCIAS DE 30 AÑOS DE MANEJO EN AGRICULTURA FAMILIAR PARAGUAYA

EFFECTS OF LAND USE ON SOIL MICRONUTRIENTS: EVIDENCE FROM 30 YEARS OF MANAGEMENT IN PARAGUAYAN FAMILY FARMING

Carlos Alcides Villalba Algarin

Instituto Paraguayo de Tecnología Agraria, Centro de Investigación Capitán Miranda, Departamento de Suelos. Itapúa, Paraguay.

Orcid: <https://orcid.org/0009-0000-5498-1594>

Marcos Fabian Sanabria Franco

Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Agrarias. San Lorenzo, Paraguay.

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7820-9037>

Francisco Vallejos Mernes

Instituto Paraguayo de Tecnología Agraria, Centro de Investigación Hernando Bertoni. Caacupé, Paraguay.

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8291-1777>

María Magdalena Busto Saldivar

Instituto Paraguayo de Tecnología Agraria, Centro de Investigación Hernando Bertoni. Caacupé, Paraguay.

Universidad Nacional del Este, Facultad de Ingeniería Agronómica. Minga Guazú, Paraguay.

Orcid: <https://orcid.org/0009-0003-1501-9708>

Autor corresponsal: Carlos Alcides Villalba Algarin: carlos.villalba@ipta.gov.py

Cómo citar este artículo:

Villalba Algarin CA, Sanabria Franco MF, Vallejos Mernes F, Busto Saldivar MM. Efectos del uso de la tierra en los micronutrientes del suelo: evidencias de 30 años de manejo en agricultura familiar Paraguaya. Rev. Soc. cient. Parag. 2026;31:e3126.

RESUMEN

La calidad química del suelo depende, entre otros factores, del mantenimiento adecuado de los micronutrientes. La deficiencia de estos elementos compromete la calidad y productividad de los cultivos agrícolas. En este estudio, se evaluó el efecto de tres usos de la tierra sobre el contenido de micronutrientes del suelo tras 30 años de manejo en un sistema de agricultura familiar de Edelira, Itapúa, Paraguay. Se consideraron como usos de la tierra el bosque nativo (BN), como referencia, la producción de granos con abonos verdes bajo siembra directa (PG+Av) y la producción de yerba mate con abonos verdes bajo siembra directa (YM+Av). Para cada escenario, se muestrearon cinco puntos dentro de áreas homogéneas de 100 m² a profundidades de 0-10 y 10-30 cm, y se determinó el pH, y contenido de cobre (Cu), manganeso (Mn), hierro (Fe) y zinc (Zn). En 0-10 cm, las áreas productivas presentaron valores de pH y contenidos de micronutrientes comparables a los observados en BN, lo que indica una condición química superficial semejante entre usos. A 10-30 cm, PG+Av presentó los menores contenidos de Mn y Zn, evidenciando una respuesta diferenciada de estos elementos. En conjunto, los resultados indican que los sistemas conservacionistas contribuyeron al mantenimiento de los micronutrientes únicamente en la capa superficial del suelo, aunque Mn y Zn mostraron mayor sensibilidad a las diferencias de uso en profundidad. Estos resultados ilustran la importancia del monitoreo de micronutrientes, especialmente en sistemas de producción de granos bajo manejo prolongado.

Palabras clave: fertilidad del suelo; nutrientes; sistemas agrícolas conservacionistas; usos del suelo.

ABSTRACT

Soil chemical quality depends, among other factors, on the adequate maintenance of micronutrients. Deficiencies in these elements can compromise the quality and productivity of agricultural crops. In this study, the effect of three land uses on soil micronutrient content was evaluated after 30 years of management in a family farming system in Edelira, Itapúa, Paraguay. The evaluated land uses included native forest (NF) as a reference, grain production with green manures under no-till (GP+GM), and yerba mate production with green manures under no-till (YM+GM). For each scenario, five sampling points were established within homogeneous areas of 100 m² at depths of 0–10 and 10–30 cm to determine pH and the contents of copper (Cu), manganese (Mn), iron (Fe), and zinc (Zn). At the 0–10 cm depth, productive areas exhibited pH values and micronutrient contents comparable to those observed in NF, indicating a similar topsoil chemical condition across land uses. At 10–30 cm, GP+GM showed

the lowest contents of Mn and Zn, indicating a distinct response of these elements to land use at greater depth. Overall, the results indicate that conservation systems contributed to maintaining micronutrients only in the topsoil layer, although Mn and Zn showed greater sensitivity to land-use differences with depth. These results illustrate the importance of monitoring micronutrients, especially in grain production systems under prolonged management.

Keywords: soil fertility; nutrients; conservation agricultural systems; soil use.

INTRODUCCIÓN

La actividad agrícola en el Paraguay posee relevancia social, económica y territorial, y constituye una base importante para la producción de alimentos y la permanencia de numerosas familias en el medio rural ^(1,2). Dentro de este escenario, la agricultura familiar ocupa un lugar destacado por su participación en la producción agropecuaria y por su contribución a la dinámica económica local. De acuerdo con el VI Censo Agropecuario Nacional 2022, el país registró 291.497 fincas agropecuarias, de las cuales 264.175 corresponden a unidades de menos de 50 ha, lo que representa 90,6% del total ⁽³⁾. Asimismo, estas unidades son protagonistas en la provisión de canastas alimentarias diversificadas en las mesas paraguayas ⁽¹⁾. En consecuencia, el desarrollo de prácticas agrícolas sustentables orientadas al fortalecimiento de este sector constituye un aspecto estratégico para la seguridad alimentaria y la sostenibilidad nacional.

En las últimas décadas, la agricultura familiar paraguaya ha atravesado cambios importantes en su organización productiva. En distintos contextos, sistemas antes más vinculados a cultivos de autoconsumo, como mandioca, yerba mate, maní, poroto, maíz y hortalizas, pasaron a incorporar con mayor intensidad rubros de carácter comercial, como la soja ^(2,4-6). Esta transformación reconfiguró no solo la estructura de la producción, sino también las formas de uso de la tierra y las demandas impuestas al suelo. Por ello, evaluar cómo estos cambios inciden sobre la fertilidad del suelo constituye un paso necesario para entender la evolución de estos sistemas productivos ^(1,7).

Dentro de los componentes de la fertilidad del suelo, los micronutrientes también merecen atención, aunque con frecuencia reciben menor énfasis que los macronutrientes en las estrategias de manejo ⁽⁸⁾. A pesar de ser requeridos en menores cantidades, estos elementos cumplen funciones esenciales en el metabolismo vegetal, al participar en procesos asociados a la actividad enzimática, la fotosíntesis, la respiración y la regulación celular ^(9,10). En los cultivos destinados a la cosecha de grano, la exportación de biomasa genera una constante remoción de micronutrientes del sistema, lo que refuerza la necesidad de comprender su dinámica en suelos sometidos a manejo agrícola prolongado ⁽¹¹⁾. Por ello, su monitoreo resulta fundamental para diseñar estrategias sostenibles de fertilización según el uso de la tierra.

A su vez, la dinámica de los micronutrientes en el suelo no depende solo de la extracción generada por los cultivos, sino también de las condiciones edáficas que controlan su retención, solubilidad y distribución en el perfil. Factores como el pH, la materia orgánica, la textura, la humedad, las condiciones redox y la presencia de óxidos de hierro y aluminio influyen directamente en su comportamiento y disponibilidad para las plantas ^(7,12,13). Por ello, distintos usos de la tierra y formas de manejo pueden generar ambientes contrastantes para la conservación o transformación de estos elementos en el suelo ⁽¹⁴⁾. En sistemas agrícolas de largo plazo, comprender esa relación resulta fundamental para interpretar cambios en el contenido de micronutrientes en el suelo.

En Paraguay, la información sobre micronutrientes del suelo aún es limitada, particularmente bajo usos de la tierra de largo plazo en sistemas de agricultura familiar. La evidencia científica disponible sobre el efecto de estos usos sobre la dinámica y distribución de los micronutrientes a lo largo del perfil del suelo es aún escasa, especialmente luego de varias décadas de manejo agrícola continuo. En este escenario, el objetivo de este estudio fue investigar el efecto de distintos usos de la tierra sobre el contenido de micronutrientes en el suelo después de 30 años de manejo.

METODOLOGÍA

Sitio del estudio y tratamientos

El estudio se condujo en una finca de productor clasificada como agricultura familiar, ubicada en la localidad de Edelira, departamento de Itapúa, Paraguay (26°42'5,86" S; 55°19'51,66" O). El clima es clasificado como subtropical húmedo (Cfa) según el sistema Köppen-Geiger ⁽¹⁵⁾. La temperatura media anual es de 21,6 °C y la precipitación media anual es

de 1.950 mm ⁽⁷⁾. El suelo corresponde a un Ultisol de textura arcillosa fina ⁽¹⁶⁾, y el área presenta relieve ligeramente ondulado (~3% de pendiente).

Se evaluaron tres tipos de usos de la tierra predominantes en la región (Figura 1): (i) Bosque nativo (BN), como referencia, con vegetación característica del Bosque Atlántico del Alto Paraná y mínima intervención antrópica; (ii) Producción de granos con rotación de abonos verdes bajo siembra directa (PG+Av), establecida en 1992 y manejada hasta el presente estudio, que utilizó como cultivos de grano maíz (*Zea mays* L.) y soja (*Glycine max* L.) en rotación con 8 especies de plantas de cobertura adaptadas a la región, entre ellas kumanda yvyra'í (*Cajanus cajan*), mucuna negra (*Mucuna pruriens*), mucuna ceniza (*Mucuna deeringiana*), canavalia (*Canavalia ensiformis*), crotalaria (*Crotalaria juncea*), avena negra (*Avena strigosa* Schreb.) y nabo forrajero (*Raphanus sativus* L.), implantadas en verano o en invierno según la especie; y (iii) producción de yerba mate asociada a plantas de cobertura bajo siembra directa (YM+Av), también establecida en 1992, en la que las plantas de cobertura citadas anteriormente se sembraron en rotación entre las hileras del cultivo de yerba mate (*Ilex paraguariensis*) para mantener la cobertura del suelo y sostener el manejo conservacionista.

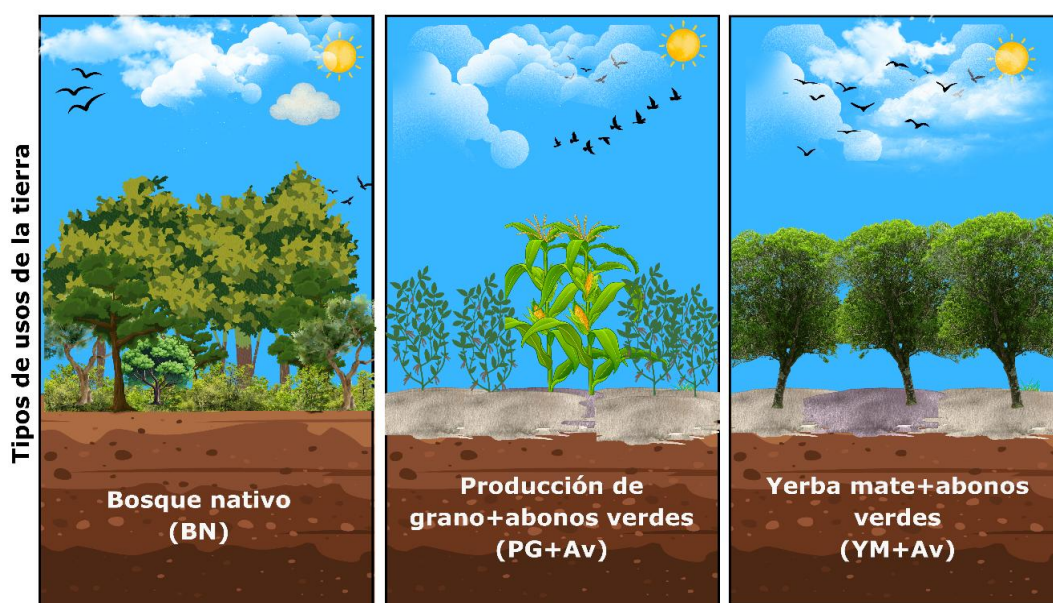


Figura 1. Representación esquemática de los tratamientos: bosque nativo (BN), producción de grano + abonos verdes (PG+Av) y yerba mate + abonos verdes (YM+Av), bajo manejo conservacionista. Fuente: Elaboración propia (2026).

Principales prácticas agronómicas en las áreas agrícolas

En las áreas PG+Av y YM+Av, el manejo de maíz, soja y yerba mate siguió prácticas estándar regionales, con labores y calendarios ajustados a cada zafra y al estado fenológico de los cultivos. La aplicación de productos fitosanitarios se realizó únicamente cuando fue necesario durante cada ciclo, de acuerdo con la evolución del cultivo y de las condiciones locales, priorizando intervenciones puntuales y oportunas. En el caso de las plantas de cobertura, no recibieron fertilización ni tratamientos fitosanitarios; se acamaron antes de la maduración de los granos y los residuos permanecieron en la superficie, conformando una cobertura continua del suelo.

Muestreo de suelo y análisis laboratoriales

El muestreo de suelo se realizó en septiembre de 2022 en zonas representativas y homogéneas de cada tipo de uso de la tierra. En áreas de 100 m² de cada tipo de uso se seleccionaron cinco puntos aleatorios bien distribuidos (repeticiones), y en cada punto se extrajeron muestras deformadas a dos profundidades (0-10 y 10-30 cm) mediante una sonda tubular. Las muestras se almacenaron en bolsas plásticas rotuladas y se trasladaron de inmediato al Laboratorio del Departamento de Suelos del Centro de Investigación Hernando Bertoni (Caacupé) para su procesamiento.

En laboratorio, la preparación de las muestras comprendió secado al aire, molienda y tamizado a 2,00 mm. El pH del suelo se determinó en agua con una relación suelo:solución 1:2,5 (p/v), utilizando un medidor digital (Digimed DM-22). Los micronutrientes cobre (Cu), manganeso (Mn), hierro (Fe) y zinc (Zn) se extrajeron con Mehlich-1 y las concentraciones se obtuvieron por espectrofotometría de absorción atómica (PerkinElmer AAnalyst 400). Todos estos análisis siguieron los procedimientos recomendados por Raij et al. ⁽¹⁷⁾.

Análisis estadístico

Los análisis estadísticos y la elaboración de figuras se realizaron en R (v. 4.4.1), utilizando los paquetes tidyverse, agricolae y ggplot2. La normalidad de los residuos se verificó mediante la prueba de Shapiro-Wilk. Para cada profundidad evaluada, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) para determinar el efecto de los usos de la tierra sobre el pH y los contenidos de Cu, Mn, Fe y Zn. Cuando se detectaron diferencias significativas ($p < 0,05$), las medias se compararon mediante la prueba de Duncan al 5 %. Los resultados se expresaron como medias $\pm$ error estándar, incluyendo letras de agrupamiento para facilitar la comparación entre tratamientos dentro de cada profundidad.

RESULTADOS

Tras 30 años de manejo, los tipos de uso de la tierra no afectaron el pH del suelo en ninguna de las profundidades evaluadas (Figura 2). En 0-10 cm, el pH osciló entre 4,8 y 5,6, mientras que en 10-30 cm varió entre 5,0 y 5,5. En ambas capas, los valores medios fueron similares entre los usos de la tierra, lo que indicó una acidez comparable en las profundidades evaluadas.

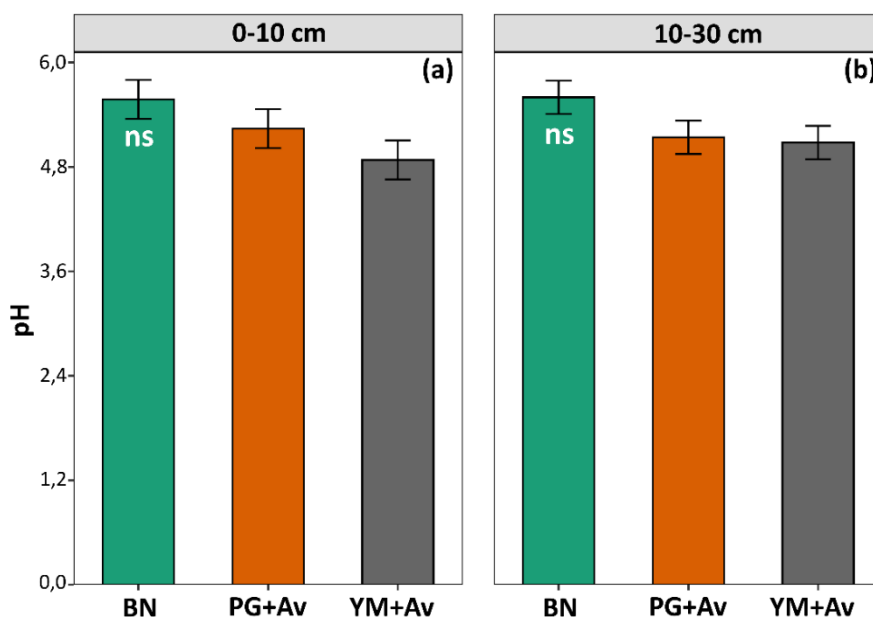


Figura 2. Potencial de hidrógeno (pH) del suelo en 0-10 cm (a) y 10-30 cm (b) según uso de la tierra en Edelira, Itapúa (Paraguay). Tratamientos: BN (Bosque nativo), PG+Av (Producción de grano con rotación de abonos verdes bajo siembra directa) y YM+Av (Yerba mate asociado abonos verdes bajo siembra directa). Las barras representan la media; las líneas verticales indican el error estándar ($n = 5$). ns indica diferencias no significativas entre tratamientos dentro de cada profundidad (Duncan, $p < 0,05$).

Fuente: Elaboración propia (2026).

Los contenidos de Cu y Mn mostraron comportamientos distintos en las profundidades del suelo evaluado (Figura 3-4). El Cu no fue afectado por los tipos de uso de la tierra en ninguna de las profundidades evaluadas, con medias generales de $0,72 \text{ mg dm}^{-3}$ en 0-10 cm y $1,38 \text{ mg dm}^{-3}$ en 10-30 cm. Para Mn, tampoco se detectó efecto en la capa superficial, donde los valores oscilaron entre $6,46$ y $6,55 \text{ mg dm}^{-3}$ (Figura 4a). En 10-30 cm, los usos de la tierra sí afectaron su contenido, con BN y YM+Av presentando valores similares entre sí y superiores a PG+Av (Figura 4b).

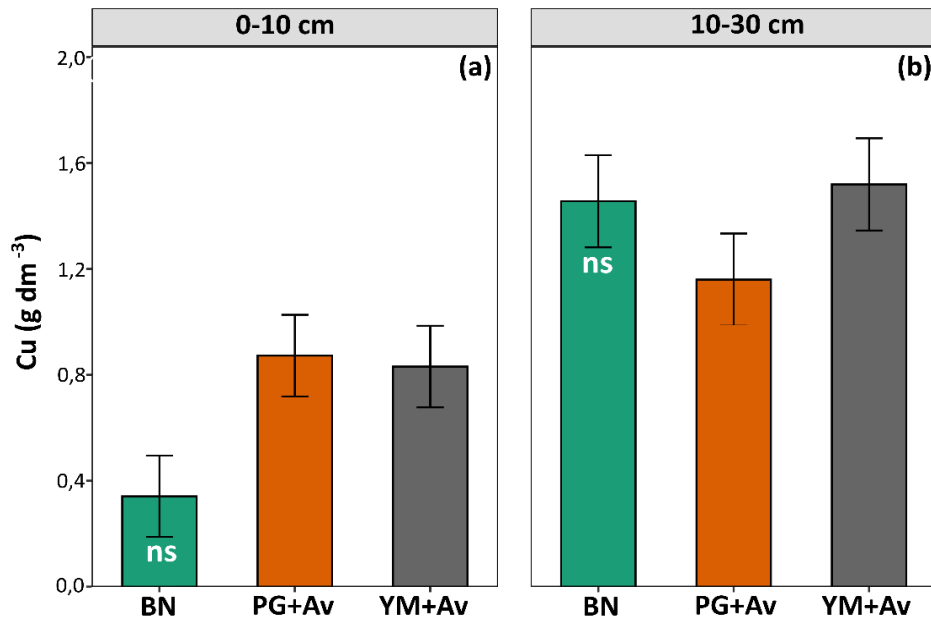


Figura 3. Cobre (Cu, mg dm⁻³) del suelo en 0-10 cm (a) y 10-30 cm (b) según uso de la tierra en Edelira, Itapúa (Paraguay). Tratamientos: BN (Bosque nativo), PG+Av (Producción de grano con rotación de abonos verdes bajo siembra directa) y YM+Av (Yerba mate asociado abonos verdes bajo siembra directa). Las barras representan la media; las líneas verticales indican el error estándar (n = 5). ns indica diferencias no significativas entre tratamientos dentro de cada profundidad (Duncan, p < 0,05). Fuente: Elaboración propia (2026).

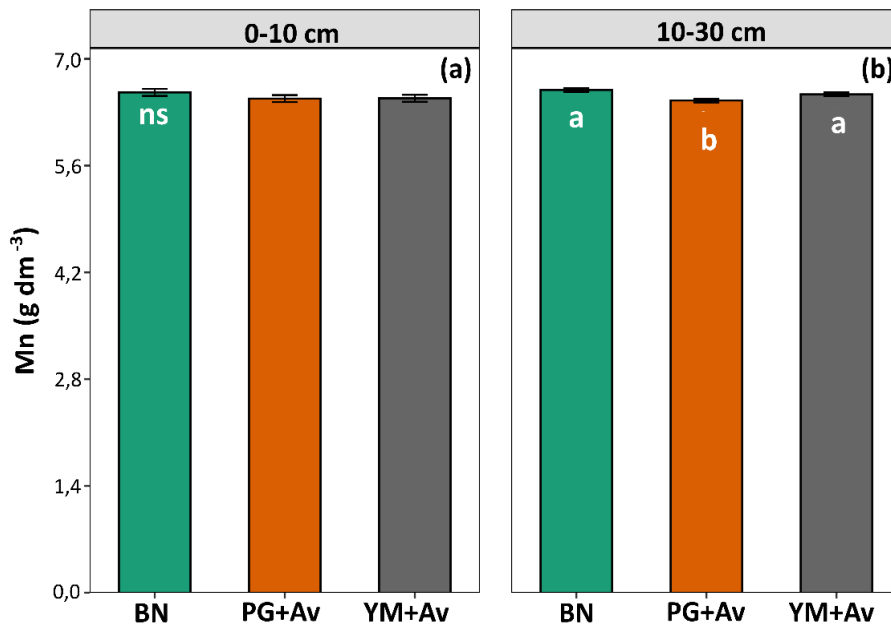


Figura 4. Manganeso (Mn, mg dm⁻³) del suelo en 0-10 cm (a) y 10-30 cm (b) según uso de la tierra en Edelira, Itapúa (Paraguay). Tratamientos: BN (Bosque nativo), PG+Av (Producción de grano con rotación de abonos verdes bajo siembra directa) y YM+Av (Yerba mate asociado abonos verdes bajo siembra directa). Las barras representan la media; las líneas verticales indican el error estándar (n = 5). Letras distintas señalan diferencias significativas entre tratamientos dentro de cada profundidad y ns no significativa (Duncan, p < 0,05). Fuente: Elaboración propia (2026).

Fe y Zn mostraron distribuciones contrastantes con la profundidad del suelo (Figura 5-6). El Fe presentó menores concentraciones en 0-10 cm que en 10-30 cm, sin efecto de los tipos de uso de la tierra en ninguna de las profundidades evaluadas. En 0-10 cm, los valores variaron entre 3,03 y 3,56 mg dm⁻³, mientras que en 10-30 cm oscilaron entre 5,06

y $6,28 \text{ mg dm}^{-3}$. En cambio, el Zn presentó mayores concentraciones en 0-10 cm que en 10-30 cm. En la capa de 0-10 cm no se detectó efecto de los tipos de uso de la tierra, mientras que en 10-30 cm sí se observó respuesta a los tratamientos, con valores de $0,80 \text{ mg dm}^{-3}$ en BN, $0,75 \text{ mg dm}^{-3}$ en YM+Av y $0,37 \text{ mg dm}^{-3}$ en PG+Av, siendo BN y YM+Av estadísticamente similares entre sí y superiores a PG+Av.

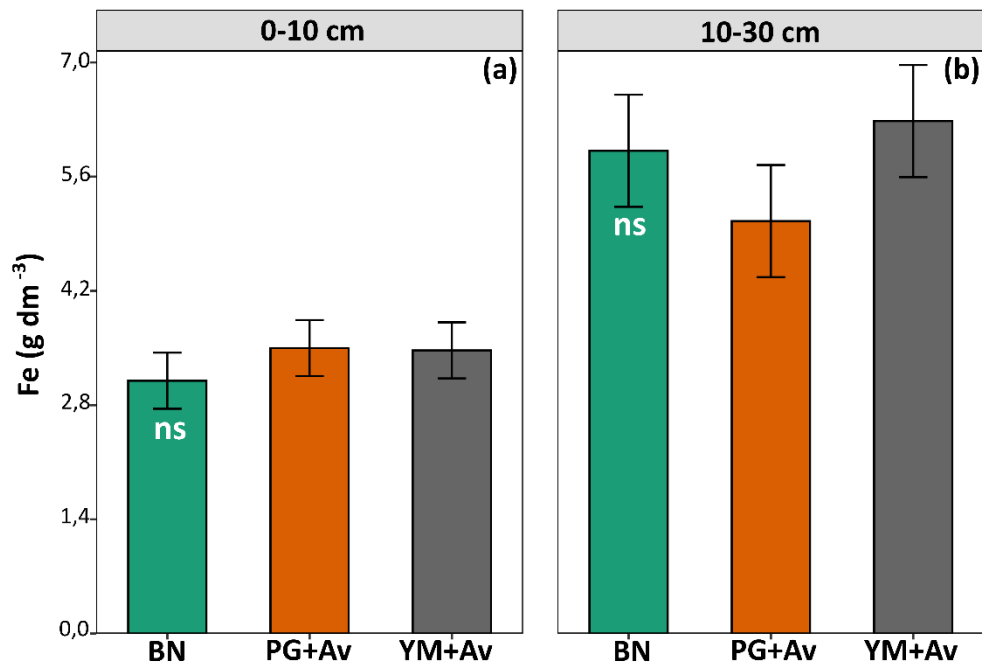


Figura 5. Hierro (Fe, mg dm^{-3}) del suelo en 0-10 cm (a) y 10-30 cm (b) según uso de la tierra en Edelira, Itapúa (Paraguay). Tratamientos: BN (Bosque nativo), PG+Av (Producción de grano con rotación de abonos verdes bajo siembra directa) y YM+Av (Yerba mate asociado abonos verdes bajo siembra directa). Las barras representan la media; las líneas verticales indican el error estándar ($n = 5$). ns indica diferencias no significativas entre tratamientos dentro de cada profundidad (Duncan, $p < 0,05$). Fuente: Elaboración propia (2026).

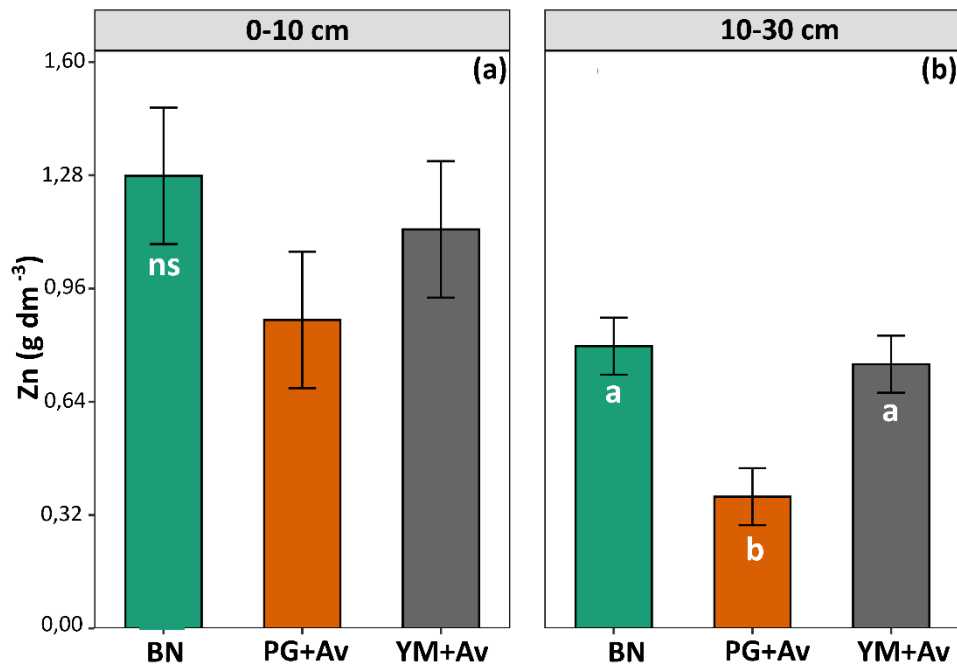


Figura 6. Zinc (Zn, mg dm^{-3}) del suelo en 0-10 cm (a) y 10-30 cm (b) según uso de la tierra en Edelira, Itapúa (Paraguay). Tratamientos: BN (Bosque nativo), PG+Av (Producción de grano con rotación de abonos verdes bajo siembra directa) y YM+Av (Yerba mate asociado abonos verdes bajo siembra directa). Las barras representan la media; las líneas verticales indican el error estándar ($n = 5$). Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos dentro de cada profundidad (Duncan, $p < 0,05$).

estándar ($n = 5$). Letras distintas señalan diferencias significativas entre tratamientos dentro de cada profundidad y ns no significativa (Duncan, $p < 0,05$). Fuente: Elaboración propia (2026).

DISCUSIÓN

La ausencia de diferencias en pH entre BN y los usos agrícolas indica que, después de 30 años de manejo, la acidez se mantuvo como una condición común en todo el sistema estudiado. Esto sugiere que las prácticas conservacionistas presentes en las áreas productivas, por sí solas, no fueron suficientes para modificar de manera consistente la reacción del suelo, especialmente sin el uso de correctivos. Los valores cercanos o inferiores a 5,5 son coherentes con el alto grado de intemperismo de los suelos de la región y con la persistencia de ambientes ácidos en sistemas agrícolas donde el encalado no forma parte habitual del manejo ^(7,18). Más que una respuesta diferencial entre usos, el pH parece reflejar una condición de base del agroecosistema, compartida tanto por el área de referencia como por los sistemas agrícolas evaluados. Desde esta perspectiva, la similitud del pH también ayuda a entender por qué varios micronutrientes mostraron comportamientos comparables entre usos, ya que no se generaron contrastes químicos marcados que favorecieron diferencias importantes en su disponibilidad ⁽¹³⁾.

Bajo esas condiciones, la similitud de los contenidos de Cu, Mn, Fe y Zn con BN, sobre todo en 0-10 cm, sugiere que los usos agrícolas evaluados no promovieron un agotamiento generalizado de micronutrientes en la capa más influenciada por el manejo. Este resultado es importante porque muestra que, aun bajo uso agrícola prolongado, los sistemas estudiados conservaron una condición relativamente próxima a la del sitio de referencia. Esa respuesta probablemente esté relacionada con la permanencia de residuos en superficie ⁽¹⁹⁾, la menor alteración mecánica del suelo ⁽²⁰⁾ y el reciclaje interno de nutrientes favorecido por sistemas con cobertura vegetal más continua ⁽²¹⁾. Aunque la materia orgánica no fue evaluada directamente, es razonable pensar que prácticas conservacionistas con mayor aporte de biomasa aérea y radicular ayudan a amortiguar cambios en la fracción disponible de micronutrientes, tanto por su efecto sobre la retención de cationes como por la mayor protección física del suelo y la reducción de pérdidas por erosión ⁽²²⁻²⁴⁾. A esto se suma que, en la agricultura familiar, la aplicación específica de micronutrientes no suele ser una práctica frecuente ⁽²⁵⁾, por lo que las diferencias observadas entre usos difícilmente respondan a fertilización dirigida y parecen estar más asociadas al funcionamiento de cada sistema.

El Cu no mostró diferencias entre usos en ninguna de las capas evaluadas, mientras que Mn y Zn presentaron una diferencia estadística a 10-30 cm, con menores contenidos en PG+Av respecto a BN y YM+Av. Este patrón sugiere que los efectos del uso de la tierra no se expresaron con la misma intensidad en la capa superficial donde los aportes recientes de residuos y el manejo favorecen una mayor homogeneidad ⁽²⁶⁾, sino en la subsuperficie, donde los efectos acumulados se hacen más evidentes. La menor concentración de Mn y Zn en la capa de 10-30 cm bajo PG+Av responde a la constante exportación por cosecha y a la menor restitución de carbono en profundidad ^(14,27). La estabilidad del Fe se asocia a su alta abundancia en la matriz litogénica del suelo, mientras que la del Cu se debe a su fuerte complejidad con la materia orgánica. Este comportamiento diferenciado demuestra que la estabilidad química observada en la superficie no se extrapola a todo el perfil del suelo ^(28,29).

El comportamiento de Fe y Zn también mostró que los micronutrientes no responden de la misma manera con la profundidad. El Fe presentó concentraciones más altas en 10-30 cm que en 0-10 cm, sin diferencias entre usos, lo que sugiere una distribución más ligada a características propias del suelo que al efecto del manejo ⁽³⁰⁾. En cambio, el Zn mostró el patrón opuesto, con mayores concentraciones en la capa superficial y menores valores en 10-30 cm, lo que puede estar relacionado con su asociación más estrecha con residuos recientes y con fracciones más dinámicas del suelo ⁽³¹⁾. Esta diferencia entre Fe y Zn deja claro que no conviene interpretar los micronutrientes como un grupo único, ya que cada elemento responde de forma particular a los procesos de retención, movilidad y reciclaje dentro del sistema suelo-planta ⁽¹³⁾. Desde esta perspectiva, que Fe no haya variado entre usos no contradice la reducción de Mn y Zn en PG+Av, sino que muestra que la influencia del uso de la tierra depende del micronutriente considerado y de la profundidad analizada.

Desde el punto de vista agronómico, la similitud con BN es una señal favorable, pero no significa necesariamente que todos los micronutrientes se encuentren en una condición ideal. De acuerdo con la clasificación propuesta para

condiciones edafoclimáticas semejantes a las del área de estudio, los promedios generales ubicaron a Cu en nivel alto, a Fe y Zn en nivel medio y a Mn en nivel bajo ⁽³²⁾. Esto añade una lectura importante a los resultados, porque muestra que valores semejantes al sitio de referencia no implican, por sí mismos, suficiencia plena para todos los elementos. En particular, la situación del Mn merece mayor atención, tanto por su clasificación general como por la reducción observada en 10–30 cm bajo PG+Av, mientras que el Zn también requiere seguimiento en esa misma capa por su respuesta diferencial entre usos. En conjunto, los resultados no indican una degradación generalizada de la fertilidad por micronutrientes, pero sí muestran que algunos de ellos, especialmente Mn y Zn, presentan una mayor susceptibilidad a la depleción bajo el uso prolongado de la tierra y se convierten en señales tempranas de diferenciación edáfica en sistemas de agricultura familiar.

Para mitigar esta depleción subsuperficial en sistemas de agricultura familiar, es fundamental implementar estrategias de manejo que profundicen el reciclaje de nutrientes ^(1,33). Entre ellas, destaca la inclusión de abonos verdes de raíz profunda en consorcio con gramíneas, el incremento en la diversidad de rotaciones y el uso de bioinsumos inoculantes como micorrizas y bacterias solubilizadoras ^(26,34,35), los cuales favorecen la exploración radicular y la disponibilidad de micronutrientes en la capa de 10–30 cm sin comprometer la viabilidad económica del productor.

CONCLUSIONES

Después de 30 años de manejo, los usos de la tierra evaluados en la agricultura familiar paraguaya mantuvieron contenidos de Cu, Mn, Fe y Zn similares al bosque nativo en la capa de 0-10 cm. En 10-30 cm, sin embargo, el sistema de producción de granos presentó menores contenidos de Mn y Zn en comparación con el bosque nativo y la yerba mate con abonos verdes, lo que indica una mayor sensibilidad de estos elementos a las diferencias de uso en la subsuperficie. En términos generales, los resultados muestran que los sistemas conservacionistas contribuyeron a mantener el contenido de micronutrientes en la capa superficial, aunque Mn, Fe y Zn se ubicaron en rangos de medio a bajo según la clasificación regional, a diferencia de Cu, que permaneció en un rango alto. Estos hallazgos resaltan la importancia del monitoreo de micronutrientes, especialmente de Mn y Zn, en sistemas de producción de granos bajo manejo prolongado.

Declaración de financiamiento:	La presente investigación se llevó a cabo con financiación propia.
Declaración de conflicto de intereses:	Los autores declaran no tener conflictos de interés.
Declaración de autores:	Los autores aprueban la versión final del artículo.
Contribución de autores:	Conceptualización: MMBS y FVM, Curación de datos: MMBS, FVM y CAVA, Análisis formal: CAVA, Obtención de financiación: MMBS y FVM, Investigación: MMBS, CAVA, Metodología: MMBS y FVM, Administración del proyecto: MMBS, Recursos: MMBS, Software: CAVA y MFSF, Supervisión: FVM y MMBS, Validación: FVM y MMBS, Visualización: MMBS y CAVA, Redacción del borrador original: CAVA, MFSF, Redacción, revisión y edición: MFSF y CAVA.
Agradecimientos: (optativo)	Al Departamento de Suelos del Centro de Investigación Hernando Bertoni del Instituto Paraguayo de Tecnología Agraria (IPTA), por el apoyo brindado en los análisis laboratoriales del suelo.
Revisión por pares:	Este artículo fue evaluado mediante un proceso de revisión por pares anónimos, conforme al procedimiento de transparencia editorial de la revista. Las observaciones y sugerencias de los revisores fueron consideradas por los autores hasta alcanzar la versión final publicada, garantizando la integridad científica del trabajo y la confidencialidad de los evaluadores.
Disponibilidad de datos:	Los datos están disponibles previa solicitud al autor corresponsal.

REFERENCIAS

1. Ortigoza Guerreño J, Ferreira Torres AM, Báez Arzamendia ME, Villalba Algarin CA, Sanabria Franco MF. Plantas de cobertura en sistemas de agricultura familiar: evidencias experimentales iniciales sobre las propiedades del suelo y los rendimientos de los cultivos en Paraguay. *Rev Soc Cient Parag.* 2026;36:1-16. Disponible en: <https://doi.org/10.32480/rscp.2026.e3108>
2. Enciso Valencia KJ, Rincón Castillo Á, Ruden DA, Burkart S. Risk reduction and productivity increase through integrating *Arachis pintoi* in cattle production systems in the Colombian Orinoquía. *Front Sustain Food Syst.* 2021;5:666604. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.666604>
3. Dirección de Censos y Estadísticas Agropecuarios, Ministerio de Agricultura y Ganadería. VI Censo Agropecuario Nacional - CAN 2022. Vol. 1. Asunción: MAG; 2023. Disponible en: https://can2022.mag.gov.py/geoportal/VI_CENSO_AGROPECUARIO_NACIONAL_Volumen_1.pdf
4. Imas V. Agricultura familiar, ODS y recuperación económica post pandemia. 2020;1-12.
5. Paredes R. Situación y tendencias de la agricultura campesina en Paraguay. *Novapolis.* 2024;(24):67-75. Disponible en: <https://pyglobal.com/ojs/index.php/novapolis/article/view/173>
6. Lesmo Duarte ND, Ferreira da Silva A, Schlindwein MM, Solis Mendoza BA. Agricultura Familiar Campesina: un análisis de la producción de cultivos tradicionales en el Departamento de Concepción - Paraguay. *Investig Agrar.* 2018;20(2):136-42. Disponible en: <https://doi.org/10.18004/investig.agrar.2018.diciembre.136-142>
7. Villalba Algarin CA, Thiengo CC, Cherubin MR, Bieluczyk W, Mariano E, Amorim DJ, et al. Can no-tillage and crop diversification sustain nutrient stocks in acidic and poorly-fertilized soils? Evidence from 32 years of real-world agricultural management in Paraguay. *Soil Adv.* 2025;4:100084. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.soilad.2025.100084>
8. Crusciol CAC, Portugal JR, Bossolani JW, Moretti LG, Fernandes AM, Moreira A, et al. Dynamics of micronutrient uptake and removal by three modern runner peanut cultivars. *Crops.* 2023;3(2):101-15. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/crops3020010>
9. Dai Z, Guo X, Lin J, Wang X, He D, Zeng R, et al. Metallic micronutrients are associated with the structure and function of the soil microbiome. *Nat Commun.* 2023;14(1):1-12. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-44182-2>
10. Lilay GH, Thiébaud N, du Mee D, Assunção AGL, Schjoerring JK, Husted S, et al. Linking the key physiological functions of essential micronutrients to their deficiency symptoms in plants. *New Phytol.* 2024;242(3):881-902. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/nph.19645>
11. Ferreira ACM, Souza HA, Sagrilo E, Barbosa da Silva Júnior G, Natale W, Sobral AHS, et al. Absorption, partitioning, and export of nutrients by phenological stage in maize cultivated in Eastern Maranhão, Brazil. *J Plant Nutr.* 2024;47(2):240-56. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/01904167.2023.2275072>
12. Villalba Algarin CA. Avanzando hacia una agricultura climáticamente inteligente: el papel del carbono orgánico en las funciones del suelo, los servicios ecosistémicos y la sostenibilidad de agroecosistemas. *Investig Agrar.* 2025;27(1):1-10. Disponible en: <https://doi.org/10.18004/investig.agrar.2025.2701825>
13. Dhaliwal SS, Naresh RK, Mandal A, Singh R, Dhaliwal MK. Dynamics and transformations of micronutrients in agricultural soils as influenced by organic matter build-up: a review. *Environ Sustain Indic.* 2019;1-2:100007. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.indic.2019.100007>
14. Dhaliwal SS, Sharma V, Shukla AK, Kaur J, Gupta RK, Verma V, et al. Interactive effect of land use systems on depth-wise soil properties and micronutrient distribution in North-Western India. *Heliyon.* 2023;9(2):e13591. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13591>
15. Peel MC, Finlayson BL, McMahon TA. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol Earth Syst Sci.* 2007;11(5):1633-44. Disponible en: <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
16. López O, González E, Llamas P, Molinas A, Franco E, García S, et al. Estudio de reconocimiento de suelos. Capacidad de uso de la tierra y propuesta de ordenamiento territorial preliminar de la región oriental del Paraguay. Asunción: Ministerio de Agricultura y Ganadería; 1995.
17. van Raij B, Andrade JC, Cantarella H, Quaggio JA. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas: Instituto Agrônomo; 2001.

18. Agegnehu G, Amede T, Erkossa T, Yirga C, Henry C, Tyler R, et al. Extent and management of acid soils for sustainable crop production system in the tropical agroecosystems: a review. *Acta Agric Scand B Soil Plant Sci.* 2021;71(9):852-69. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/09064710.2021.1954239>
19. Zahid A, Ali S, Ahmed M, Iqbal N. Improvement of soil health through residue management and conservation tillage in rice-wheat cropping system of Punjab, Pakistan. *Agronomy.* 2020;10(12):1844. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/agronomy10121844>
20. Trybek M, Algarin CAV, Grande LHQ, Seim JPM, Canisares LP, Morgan CLS, Cerri CEP, Cherubin MR. Aggregate stability measurements of tropical soils under conservation agriculture using the Slakes smartphone app. *Soil Tillage Res.* 2026;257:106984. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106984>
21. Brito C, Martins S, Saraiva F, Roque J, Arrobas M, Rodrigues M, Correia C. Biomass and nutrient release dynamics of decomposing rolling down legume cover crops in a steep-sloped Mediterranean vineyard. *Front Agron.* 2025;7:1604142. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fagro.2025.1604142>
22. Thiengo CC, de Souza GS, Villalba Algarin CA, da Silva DMN, de Sá Mendonça E, et al. Effects of soil tillage practices on soil conservation in pasture-based integrated management systems: a case study on steep slopes in southeastern Brazil. *Discov Soil.* 2024;1:26. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s44378-024-00026-z>
23. Sá JC, Lal R, Lorenz K, Bajgai Y, Gavilan C, Kapoor M, et al. No-till systems restore soil organic carbon stock in Brazilian biomes and contribute to the climate solution. *Sci Total Environ.* 2025;977:179370. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179370>
24. Rojas Nerhot P, Monzón DR, Alvarez JR, Rojas AE. Niveles de materia orgánica en distintos tipos de manejos. *Braz J Dev.* 2018;4(7):3789-800. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14330/CLA01000468448>
25. Adolwa IS, Mutegi J, Muthamia J, Gitonga A, Njoroge S, Kiwia A, et al. Enhancing sustainable agri-food systems using multi-nutrient fertilizers in Kenyan smallholder farming systems. *Heliyon.* 2023;9(4):e15320. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15320>
26. Villalba Algarin CA, González AC, Szostak JE, Sanabria Franco MF. Explorando el estado del arte de la labranza y su impacto en la calidad del suelo y la productividad agrícola: una revisión crítica de los últimos 20 años. *Investig Agrar.* 2024;26(2):111-24. Disponible en: <https://doi.org/10.18004/investig.agrar.2024.diciembre.2602806>
27. Getnet K, Miju C, Bitew A, Atinafu M. The effects of land use types and soil depths on soil micronutrients, soil pH, and organic carbon in Southern Ethiopia. *Appl Environ Soil Sci.* 2025;2025:5575783. Disponible en: <https://doi.org/10.1155/aess/5575783>
28. Kachinski WD, Ávila F, Marques M, Muller L, Rampim L, Cezar J, Vidigal B. Nutrition, yield and nutrient export in common bean under zinc fertilization in no-till system. *Cienc Agrotec.* 2020;44:e029019. Disponible en: <https://doi.org/10.1590/1413-7054202044029019>
29. Xu D, Shen Z, Dou C, Dou Z, Li Y, Gao Y. Effects of soil properties on heavy metal bioavailability and accumulation in crop grains under different farmland use patterns. *Sci Rep.* 2022;12:1-15. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-13140-1>
30. Cheshire MV, Berrow ML, Goodman BA, & Mundie CM. Metal distribution and nature of some Cu, Mn and V complexes in humic and fulvic acid fractions of soil organic matter. *Geochimica et Cosmochimica Acta.* 1977;41(8):1131-1138. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(77\)90108-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(77)90108-9)
31. Dabkowska-Naskret H. The role of organic matter in association with zinc in selected arable soils from Kujawy Region, Poland. *Org Geochem.* 2003;34(5):645-9. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(03\)00019-6](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(03)00019-6)
32. Pauletti V, Motta ACV. Manual de adubação e calagem para o Estado do Paraná. 2ª ed. Curitiba: Núcleo Estadual Paraná da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2019.
33. Villalba Algarin CA, Sanabria Franco MF, González A C, & Lavres J. Legacy Effects of 32 Years of Tillage and Crop Diversification on Soil Biological Activity in Paraguay. *Soil Systems.* 2026;10(6):66. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/soilsystems10060066>
34. Da Rocha TF, Piotto FA, Quecine MC, Quiloango-Chimarro CA, de Oliveira Costa J, Barreiros RB, Franco MFS, & Kluge RA. Impact of Pre-planting Inoculation with Phosphorus-solubilizing Bacteria on Potato Tuber Quality during Storage. *Potato Research.* 2026;69(4):114. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11540-026-10071-6>

35. Tian G, Yang Q, Yang S, Wu L, He Y, & Zhan F. Arbuscular mycorrhizal fungi and phosphate-solubilizing bacteria synergistically enhance growth and cadmium accumulation of hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola*. BMC Plant Biology. 2026. Disponible en: <https://doi.org/10.1186/s12870-026-09186-2>