

Artículo Original
Original Article

PLANTAS DE COBERTURA EN SISTEMAS DE AGRICULTURA FAMILIAR: EVIDENCIAS EXPERIMENTALES INICIALES SOBRE LAS PROPIEDADES DEL SUELO Y LOS RENDIMIENTOS DE LOS CULTIVOS EN PARAGUAY
COVER CROPS IN FAMILY FARMING SYSTEMS: INITIAL EXPERIMENTAL EVIDENCE ON SOIL PROPERTIES AND CROP YIELDS IN PARAGUAY

Javier Ortigoza Guerreño

Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Agrarias. Caazapá, Paraguay

Orcid: <https://orcid.org/0009-0002-2425-2512>

Alma María Torres Ferreira

Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Agrarias. Caazapá, Paraguay

Orcid: <https://orcid.org/0009-0000-6493-189X>

Blanca Beatriz Alonso Giménez

Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Agrarias. Caazapá, Paraguay

Orcid: <https://orcid.org/0009-0006-4769-4283>

Marlene Elizabeth Báez Arzamendia

Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Agrarias. Caazapá, Paraguay

Orcid: <https://orcid.org/0009-0001-1038-4242>

Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Agrarias. Caazapá, Paraguay

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>

Autor corresponsal: Marcos Fabian Sanabria Franco: marcosfabiansanabria@gmail.com

Cómo citar este artículo:

Ortigoza Guerreño J, Torres Ferreira AM, Alonso Giménez BB, 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;31:e3108.

RESUMEN

El estudio se llevó a cabo entre 2022 y 2024 en el campo experimental de la Facultad de Ciencias Agrarias – UNA, en Caazapá, Paraguay, con el objetivo de evaluar el efecto de distintos sistemas de cobertura vegetal sobre las propiedades químicas del suelo y la productividad de maíz y mandioca en condiciones de agricultura familiar. Se compararon cinco tratamientos en un diseño de bloques completos al azar: un control con siembra directa sobre barbecho (SD1) y cuatro sistemas con diferentes combinaciones de abonos verdes de verano e invierno (SD2–SD5). Se analizaron las propiedades químicas del suelo y los parámetros productivos de los cultivos mediante ANAVA (Duncan $p \leq 0,05$). Los resultados indicaron que los abonos verdes aumentaron la materia orgánica, aunque el pH registró una reducción en el SD2 atribuida a la mineralización. Los niveles de fósforo, calcio, magnesio y potasio se mantuvieron bajos en todos los sistemas, evidenciando limitaciones químicas del suelo. En el maíz, las coberturas incrementaron el número de granos por hilera y la productividad, destacándose el SD3 con 5.080 kg/ha. En cuanto a la mandioca, los sistemas con coberturas superaron al control, con rendimientos hasta 16% superiores al SD1. Se concluye que la integración de coberturas vegetales y prácticas de manejo sostenible es clave para maximizar la productividad, conservar el suelo y fortalecer la resiliencia de la agricultura familiar en Caazapá, incrementando los rendimientos hasta un 102,8% en maíz y 16,1% en mandioca en suelos altamente intemperizados.

Palabras clave: siembra directa; abonos verdes; materia orgánica; sustentabilidad; productividad.

ABSTRACT

The study was conducted between 2022 and 2024 at the experimental field of the Faculty of Agrarian Sciences – UNA, in Caazapá, Paraguay, with the objective of evaluating the effect of different cover crop systems on soil chemical properties and the productivity of maize and cassava under family farming conditions. Five treatments were compared in a randomized complete block design: a control with no-tillage over fallow (SD1) and four systems with different combinations of summer and winter green manures (SD2–SD5). Soil chemical properties and crop productivity parameters were analyzed using ANOVA (Duncan $p \leq 0.05$). The results indicated that green manures increased organic matter, although pH showed a reduction in SD2 attributed to mineralization. Phosphorus, calcium, magnesium, and potassium levels remained low in all systems, highlighting soil chemical limitations. In maize, cover crops increased the number of grains per row and productivity, with SD3 standing out at 5,080 kg/ha. Regarding cassava, the systems with cover crops outperformed the control, with yields up to 16% higher than SD1. It is concluded that the integration of cover crops and sustainable management practices is key to maximizing productivity, conserving soil, and strengthening the resilience of family farming in Caazapá, increasing yields by up to 102.8% in maize and 16.1% in cassava in highly weathered soils.

Keywords: no-tillage; green manures; organic matter; sustainability; productivity.

INTRODUCCIÓN

La agricultura familiar en Paraguay constituye un pilar fundamental para la seguridad y soberanía alimentaria del país, pues garante el abastecimiento de alimentos variados por medio de la producción diversificada de productos agrícolas y hortícolas que impacta directamente en la sostenibilidad socioeconómica de miles de familias rurales ^(1, 2). Este sector se caracteriza por la participación activa de todos los miembros del hogar, desde el rol fundamental de las mujeres hasta la colaboración de los hijos en tareas más livianas, así como por el uso predominante de semillas nativas o criollas y una baja incorporación de paquetes tecnológicos, factores que muchas veces se traducen en bajos retornos económicos ⁽³⁾. La mayoría de estas explotaciones se desarrolla en fincas de hasta 50 ha, a menudo sobre suelos altamente intemperizados y en condiciones precarias, lo que limita la productividad y expone a los agricultores a desafíos como el escaso acceso a tecnología, recursos productivos, financiamiento y asistencia técnica ^(1, 4, 5).

La falta de tecnologías adecuadas y el predominio de prácticas tradicionales de subsistencia como las labranzas generan una gestión ineficiente del suelo y de recursos hídrico, lo que provoca pérdida de fertilidad, erosión y disminución sostenida de rendimientos de los cultivos ^(4, 6). Frente a esta situación, muchos agricultores optan por abrir nuevas áreas agrícolas mediante el desmonte, lo que genera desequilibrio ecológico y presión sobre los ecosistemas naturales ⁽⁷⁾. Este escenario pone de manifiesto la urgencia de adoptar prácticas más sostenibles que garanticen la productividad, resguarden el medio ambiente y contribuyan a la estabilidad de los sistemas agrícolas familiares ⁽⁵⁾.

En este contexto, la siembra directa y la diversificación de cultivos se presentan como alternativas viables para mejorar la sostenibilidad de la agricultura familiar ⁽⁸⁾. El sistema de siembra directa protege el suelo al reducir la labranza, disminuye la erosión, incrementa la materia orgánica, favorece la actividad biológica y mejora la retención de agua, lo que se traduce en mayor fertilidad y productividad a largo plazo ⁽⁹⁾. Por su parte, la diversificación de cultivos mitiga riesgos productivos y de mercado, mejora la salud del suelo mediante rotaciones de cultivos y coberturas permanente del suelo, fortaleciendo así la resiliencia del sistema productivo ⁽¹⁰⁾.

Sin embargo, la implementación de estas estrategias en pequeños productores enfrenta desafíos relacionados con la disponibilidad de maquinaria, recursos tecnológicos y conocimientos técnicos ^(5, 6). La literatura señala que se puede alcanzar altas productividades escogiendo cultivares que se adapten a las condiciones edafoclimáticas y evitando la aplicación de recetas generalizadas ^(8, 11). En este sentido, la investigación agrícola debe ser contextualizada, promoviendo programas de capacitación, asistencia técnica y acceso a recursos que permitan a los agricultores familiares aprovechar los beneficios de prácticas sostenibles sin comprometer su economía ^(5, 8, 11).

Como alternativa sostenible la rotación de abonos verdes representa una estrategia prometedora ⁽¹²⁾. Especies como kumada yvyra'i (*Cajanus cajan*), kumanda guasu (*Canavalia ensiformis*), mucuna (*Mucuna ceniza*), crotalaria (*Crotalaria juncea*) y el lupino (*Lupinus albus*) destacan por su capacidad de fijar nitrógeno atmosférico, mientras tanto, coberturas como la avena (*Avena strigosa*), centeno (*Secale cereale*) y el nabo forrajero (*Raphanus sativus* L) mejoran la estructura del suelo, favorecen la actividad biológica y aportan materia orgánica al suelo ^(9, 12). Integrados en rotaciones o como plantas de cobertura asociados a especies tradicionales como maíz y mandioca, los abonos verdes pueden contribuir a la sostenibilidad de los sistemas de agricultura familiar, incrementando la productividad y reduciendo la degradación del suelo ^(10, 11, 12).

No obstante, a pesar de los beneficios documentados en la literatura aún existe un vacío de conocimiento respecto a la efectividad de estas prácticas en condiciones reales de campo en la agricultura familiar paraguaya. Factores como

el clima, el tipo de suelo, la disponibilidad de semillas y el manejo local pueden condicionar los resultados, lo que hace necesaria la investigación aplicada que evalúe la viabilidad y el impacto de estas prácticas en el contexto nacional ^(11, 13).

En este marco, se planteó la hipótesis de que, en comparación con los sistemas sin cobertura, la inclusión de plantas de cobertura en la agricultura familiar mejora las propiedades químicas del suelo y aumenta los rendimientos de maíz y mandioca. Por ello, el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de distintos sistemas de cobertura vegetal sobre las propiedades químicas del suelo y la productividad de maíz y mandioca en condiciones de agricultura familiar en Paraguay.

METODOLOGIA

Descripción del área de estudio

El estudio se llevó a cabo durante dos ciclos agrícolas consecutivos (2022-2023 y 2023-2024) en el campo experimental de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Asunción, ubicado en la Compañía 20 de Julio, Distrito de Caazapá, Paraguay. La parcela se encuentra a 7 km de la ciudad de Caazapá y a 225 km al este de Asunción, en las coordenadas 26°09'38"S, 56°21'39"W, a una altitud de 144,46 m. El suelo del área experimental está clasificado como un Rhodic Paleudult (Ultisol), de textura franco-arenosa caracterizado por un color pardo rojizo oscuro ⁽¹⁴⁾, cuyas propiedades químicas iniciales fueron determinadas antes de la instalación del experimento y detalladas en la Tabla 1.

Tabla 1. Características químicas del suelo en el área experimental antes del inicio del experimento

Profundidad	pH	MO	P	Al ⁺³	Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺
cm		%	mg dm ⁻³cmol _c dm ⁻³			
0-20	5,1	0,9	2,03	0,17	0,53	0,24	0,04

Nota: pH (H₂O); MO (Walkley-Black modificado); P y K⁺ (Mehlich-1); Al⁺³, Ca⁺² y Mg⁺² (KCl 1 mol L⁻¹).

El clima de la región es húmedo y mesotérmico (Cfa, según Köppen-Geiger), con una precipitación media anual de 1.735 mm, una temperatura media anual de 23,2 °C y con ocurrencia ocasional de heladas entre mayo y agosto. Los registros de los datos meteorológicos durante el trabajo son prestados en la Figura 1.

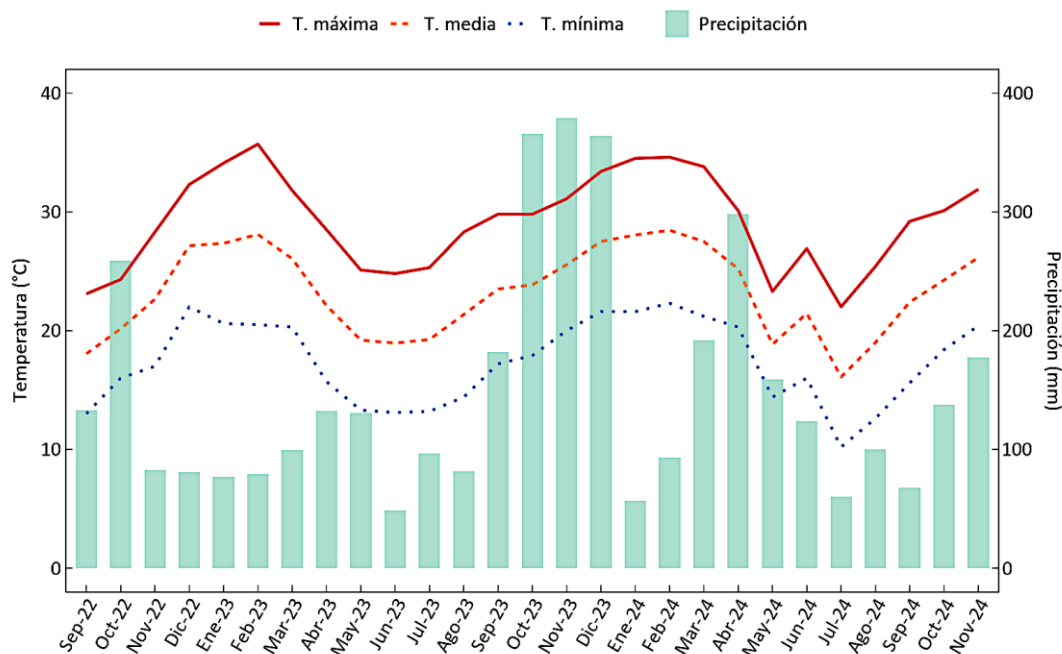


Figura 1. Comportamiento climático mensual (temperatura mínima, máxima y precipitación) durante el periodo experimental, Facultad de Ciencias Agrarias, Filial Caazapá.

Tratamientos y diseño experimental

Con el fin de representar la realidad de la agricultura familiar paraguaya, se estudiaron cinco sistemas de cultivo. Cada sistema de siembra constituyó un tratamiento en estudio. Para la investigación se utilizó el sistema SD1 como tratamiento control, que consistió en la siembra directa de los cultivos sobre barbecho. En este tratamiento se cultivó maíz en el primer año de la investigación (siembra fuera de época) y mandioca en el segundo año. Los demás sistemas correspondieron al uso de abonos verdes en combinación con la rotación de cultivos (SD2, SD3, SD4 y SD5). En la Tabla 2 se detallan las características de cada sistema evaluado.

Tabla 2. Abonos verdes utilizados en los sistemas de siembras evaluadas durante el ciclo productivo 2022/2024. Caazapá Paraguay.

Sistemas de siembra	Maíz		Mandioca	
	Año 1 (2022-2023)		Año 2 (2023-2024)	
	Verano	Invierno	Verano	Invierno
SD1	Barbecho	Barbecho	Barbecho	Barbecho
SD2	<i>Cajanus cajan</i>	Avena, lupino y nabo	<i>Canavalia ensiformis</i>	Aceven + lupino + nabo
SD3	<i>Canavalia ensiformis</i>	Avena y nabo	<i>Canavalia ensiformis</i>	Aceven + nabo
SD4	<i>Crotalaria juncea</i>	Vicia y nabo	<i>Canavalia ensiformis</i>	Avena + lupino + nabo
SD5	<i>Mucuna ceniza</i>	Milleteo y nabo	<i>Canavalia ensiformis</i>	Avena + nabo

Las parcelas fueron instaladas en un diseño de bloques completos al azar (DBCA) con cinco sistemas de manejo y tres repeticiones, totalizando quince unidades experimentales (UE). Cada UE tuvo dimensiones de 12 m × 6,5 m (78 m²), considerando como parcela útil las hileras centrales para minimizar el efecto borde.

Manejos agronómicos de las parcelas

Primeramente, se procedió a la implantación de abonos verdes de verano en el transcurso del segundo semestre del año 2022. Las leguminosas utilizadas fueron (*Cajanus cajan*, *Canavalia ensiformis*, *Crotalaria juncea* y *Mucuna ceniza*) que se sembraron con un distanciamiento de 0,50 m entre hileras y 0,30 m entre plantas, excepto la *Crotalaria juncea*, que se sembró al chorrillo. La siembra de los abonos verdes de verano se realizó en septiembre de 2022 y fue manejada en enero de 2023, para la posterior implantación del primer cultivo de interés. El manejo de la biomasa se efectuó cuatro meses después de la siembra (etapa de floración), utilizando rolo cuchillo o machete, dejando la biomasa sobre la superficie como cobertura muerta. En el caso de la mucuna ceniza, se aplicó el herbicida Paraquat como agente desecante.

Posteriormente, se sembró el maíz híbrido 2B604 sobre los rastrojos, quince días después del manejo de los abonos verdes, se utilizó una sembradora tipo matraca y una densidad de 57.143 plantas/ha (0,70 m entre hileras × 0,25 m entre plantas). Para el periodo de invierno, los abonos verdes (avena, nabo, aceven y lupino) se sembraron al voleo de forma manual en mayo de 2023. La cosecha del maíz se realizó cuando los granos alcanzaron el estado seco, permitiendo posteriormente el crecimiento de los abonos de invierno.

Posterior al manejo de los abonos verdes de invierno, se implantó la mandioca variedad Cano Guazú en las unidades experimentales correspondientes al segundo año de estudio. Para la plantación se utilizaron estacas de 10 cm con 5–7 yemas, establecidas a una densidad de 14.285 plantas/ha (1,00 m entre hileras × 0,70 m entre plantas). Dos meses después, cuando las plantas alcanzaron aproximadamente 50 cm de altura, se realizó la asociación con *Canavalia ensiformis* como abono verde estival, estableciendo una hilera por cada melga y una densidad de 0,30 m entre plantas. La canavalia fue implantada en todas las parcelas, excepto en el tratamiento control.

El control de malezas se efectuó mediante carpidas manuales según las necesidades del cultivo. Transcurridos cinco meses, la canavalia fue cortada y sus restos se dejaron en superficie como cobertura muerta. En mayo, se sembraron al voleo los abonos verdes de invierno (avena negra, lupino, nabo forrajero y aceven), en distintas mezclas de acuerdo con cada sistema (Tabla 2).

Colecta de parámetros productivos

Para evaluar el rendimiento del maíz, se consideraron diversos parámetros agronómicos. En primer lugar, se determinó el número de hileras de granos por espiga, contando la cantidad de hileras en una muestra aleatoria de 10 espigas. Posteriormente, se calculó el número de granos por hilera, a partir del conteo realizado en 10 espigas seleccionadas al azar, excluyendo los granos del extremo superior. Asimismo, se evaluó el peso de mil granos (PMG), mediante el pesaje en balanza de precisión de tres muestras de 1000 granos considerado un indicador de la densidad y calidad de los granos. Finalmente, se determinó el rendimiento de granos del maíz, expresado en kilogramos por hectárea (kg/ha), a partir de la cosecha de 20 plantas por parcela útil, cuyo desgrane, embolsado y pesaje permitió obtener la productividad del cultivo.

En el caso de la mandioca, la cosecha permitió clasificar las raíces en comerciales y no comerciales, de acuerdo con su tamaño. Se consideraron raíces comerciales aquellas con un diámetro superior a 3,5 cm y una longitud mínima de 20 cm, mientras que las raíces con diámetro inferior a 3,5 cm y longitud menor a 20 cm se clasificaron como no comerciales ⁽¹⁵⁾. Para ambas categorías, se tomó una muestra de 15 raíces al azar con el fin de medir su longitud, utilizando una regla centimetrada y expresando los valores en centímetros. El rendimiento final se expresó en términos de producción de raíces comerciales y no comerciales por unidad de superficie (kg/ha), constituyendo el indicador principal de la productividad del cultivo.

Análisis laboratoriales

A los 45 días posteriores al manejo de los abonos verdes en el segundo año, se realizaron muestreos de suelo en tres submuestras de cada unidad experimental. Con estas submuestras se conformó una muestra compuesta para obtener un valor promedio por unidad experimental. Para la determinación de las propiedades químicas del suelo, las muestras fueron tomadas a una profundidad de 0–20 cm y enviadas al Laboratorio de Suelos de la FCA-UNA, siguiendo metodologías estándar.

Los parámetros analizados fueron: pH (relación 1:1), materia orgánica mediante oxidación con dicromato de potasio, fósforo disponible por extracción con Mehlich-¹ y lectura espectrofotométrica a 740 nm, aluminio intercambiable (Al³⁺) por extracción con KCl 1N y titulación con NaOH, y la saturación de Ca-Mg-K-Na por extracción con acetato de amonio 1M y determinación mediante espectrofotometría de absorción atómica ⁽¹⁶⁾.

Análisis estadístico

Los datos obtenidos fueron sometidos primeramente a la verificación de los supuestos de normalidad (test de Shapiro-Wilk) y homogeneidad de varianza (test de Bartlett) de los residuos. Posteriormente, cuando reunieron las condiciones, fueron sometidos a un análisis de varianza (ANAVA) en un diseño de bloques completos al azar. Las diferencias entre las medias de los tratamientos se compararon utilizando la prueba de Duncan con un nivel de significancia del 5% ($p < 0.05$). El análisis se realizó utilizando el software estadístico RStudio (versión 3.6). Para la representación de las variables productivas de los cultivos, estos fueron agrupados y presentados a través de un PCA tipo biplot con el fin de visualizar la relación entre los sistemas de manejo de los suelos y las variables productivas

RESULTADOS

Los sistemas de agricultura familiar y su efecto en las propiedades del suelo

El manejo de suelo durante los dos años del proyecto evidenció que el pH de suelo presentó ligeras variaciones asociadas al sistema de manejo implementado. En la Figura 2a se observa que el tratamiento SD2 fue estadísticamente

más ácido (4,75) que los demás sistemas de manejo. A pesar de ello, el SD2 mostró relativamente un contenido de materia orgánica superior al 1% (1,09%) (Figura 2b). El SD1 presentó contenidos de materia orgánica inferiores al 1% (0,93%), lo cual indica que el contenido de MO es influenciado por los sistemas de manejo, a pesar del manejo ser relativamente nuevo. El SD5 (1,25%) se destacó al ser estadísticamente mayor que el grupo control. En el caso del P, no fueron observadas diferencias estadísticas en los sistemas estudiados (Figura 2c) visualizándose un nivel bajísimo en todos los suelos evaluados $< 2,5 \text{ mg dm}^{-3}$.

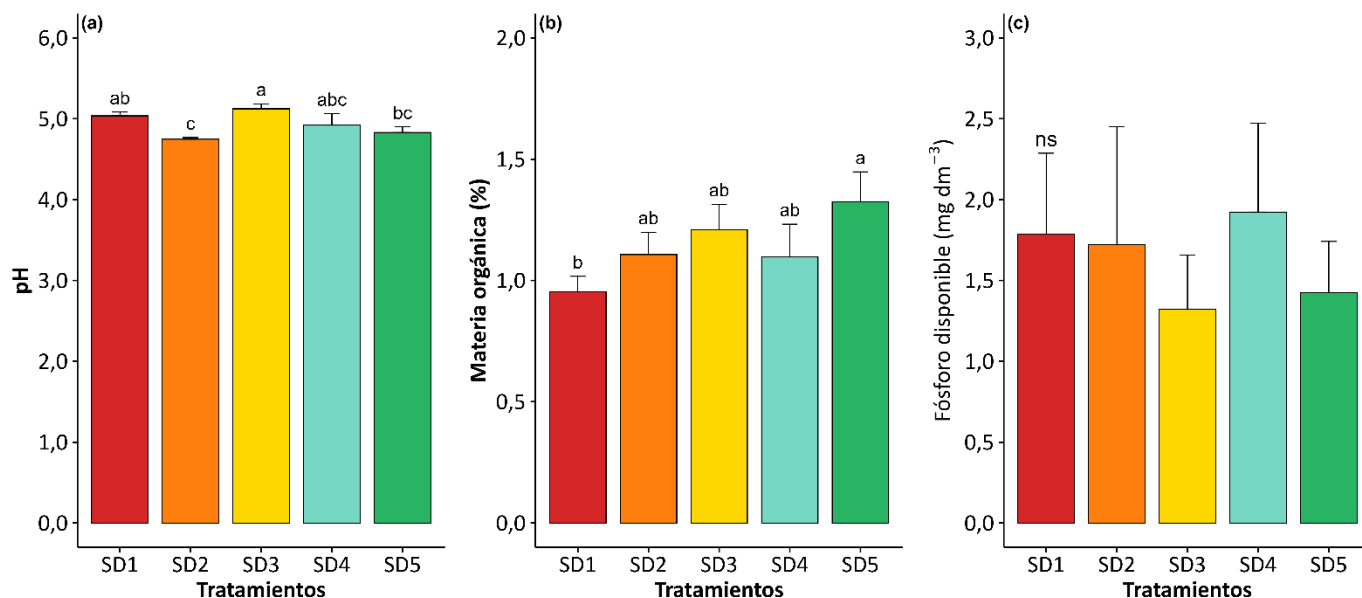


Figura 2. Valores de pH (a), materia orgánica (b) y fósforo disponible (c) del suelo en respuesta a los diferentes sistemas de manejo de suelo, Caazapá, Paraguay. Letras distintas indican diferencias significativas según la prueba de Duncan ($p \leq 0,05$); ns indica diferencia no significativa.

Los nutrientes como el Ca^{+2} , Mg^{+2} y K^{+} no presentaron diferencias significativas después de dos años de investigación (Figuras 3a, b y c). Sin embargo, sus contenidos fueron críticos para el tipo de suelo que es franco arenoso donde se llevó a cabo el estudio. Se observa que el Ca^{+2} , independientemente del manejo de suelo, presentó valores inferiores a $0,60 \text{ cmolc dm}^{-3}$, clasificados como bajos. El Mg^{+2} registró valores inferiores a $0,11 \text{ cmolc dm}^{-3}$, considerados muy bajos, mientras que el K^{+} mostró contenidos aún más reducidos, por debajo de $0,04 \text{ cmolc dm}^{-3}$, lo cual indica una condición extremadamente baja. Estos resultados evidencian la limitación química de los suelos de la zona y resaltan la necesidad de un manejo adecuado para potenciar la productividad de los cultivos.

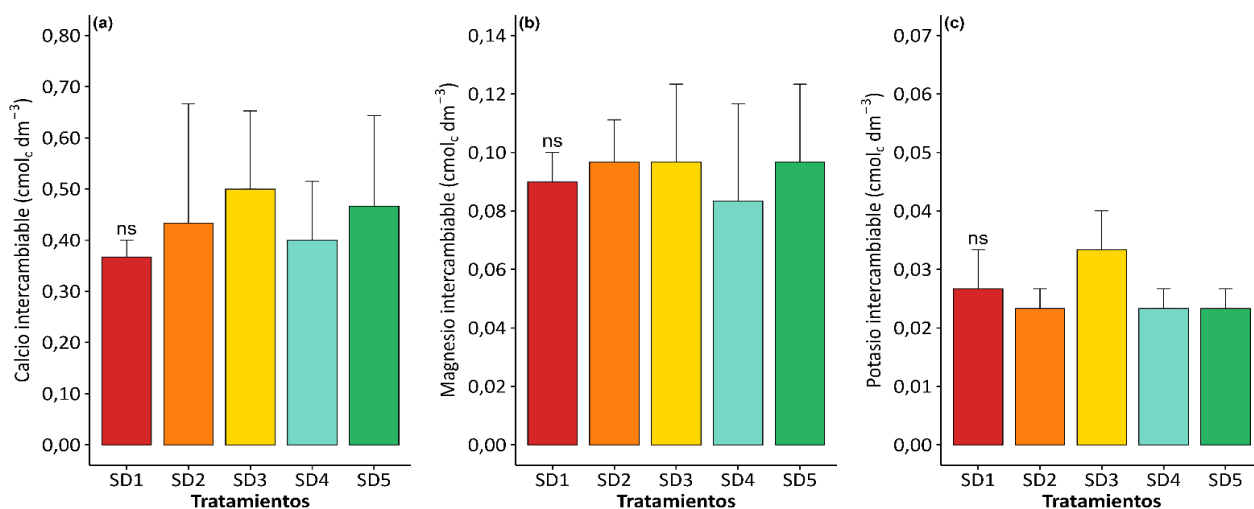


Figura 3. Niveles de calcio intercambiable (a), magnesio intercambiable (b) y potasio intercambiable (c) del suelo, expresados en cmolc dm^{-3} , en respuesta a los diferentes sistemas de manejo de suelo, Caazapá, Paraguay. Letras distintas indican diferencias significativas según la prueba de Duncan ($p \leq 0,05$); ns indica diferencia no significativa.

Influencia de los sistemas de agricultura familiar sobre los rendimientos del cultivo

En la Figura 4 se presentan los resultados de los parámetros productivos del maíz. El número de hileras por mazorca no mostró diferencias significativas entre los distintos sistemas de manejo del suelo, es decir, todos los tratamientos presentaron valores estadísticamente iguales (Figura 4a). Sin embargo, el número de granos por hilera sí presentó diferencias significativas, destacándose un aumento superior a 20 granos por espiga en respuesta a los sistemas de manejo del suelo. En particular, el grupo control (SD1) presentó un menor número de granos (18,27) en comparación con los demás sistemas SD3 (29,27), SD4 (26,73) y SD5 (28,80) (Figura 4b). La variable peso de 1000 semillas no fue influenciada por los sistemas de manejo estudiados (Figura 4c). En cambio, la productividad del maíz fue significativamente superior en los sistemas de manejo que incluyeron abonos verdes, siendo el SD3 (5.080 kg/ha) el sistema con mayor destaque en producción, seguido por SD5 (4.850 kg/ha), SD4 (5.080 kg/ha) y SD2 (4.190 kg/ha). Estos resultados evidencian la importancia del uso de abonos verdes en el manejo del cultivo y su influencia positiva sobre la productividad, incluso en suelos altamente intemperizados la producción puede llegar a ser el doble (102.8%) comparados al sistema barbecho tradicional.

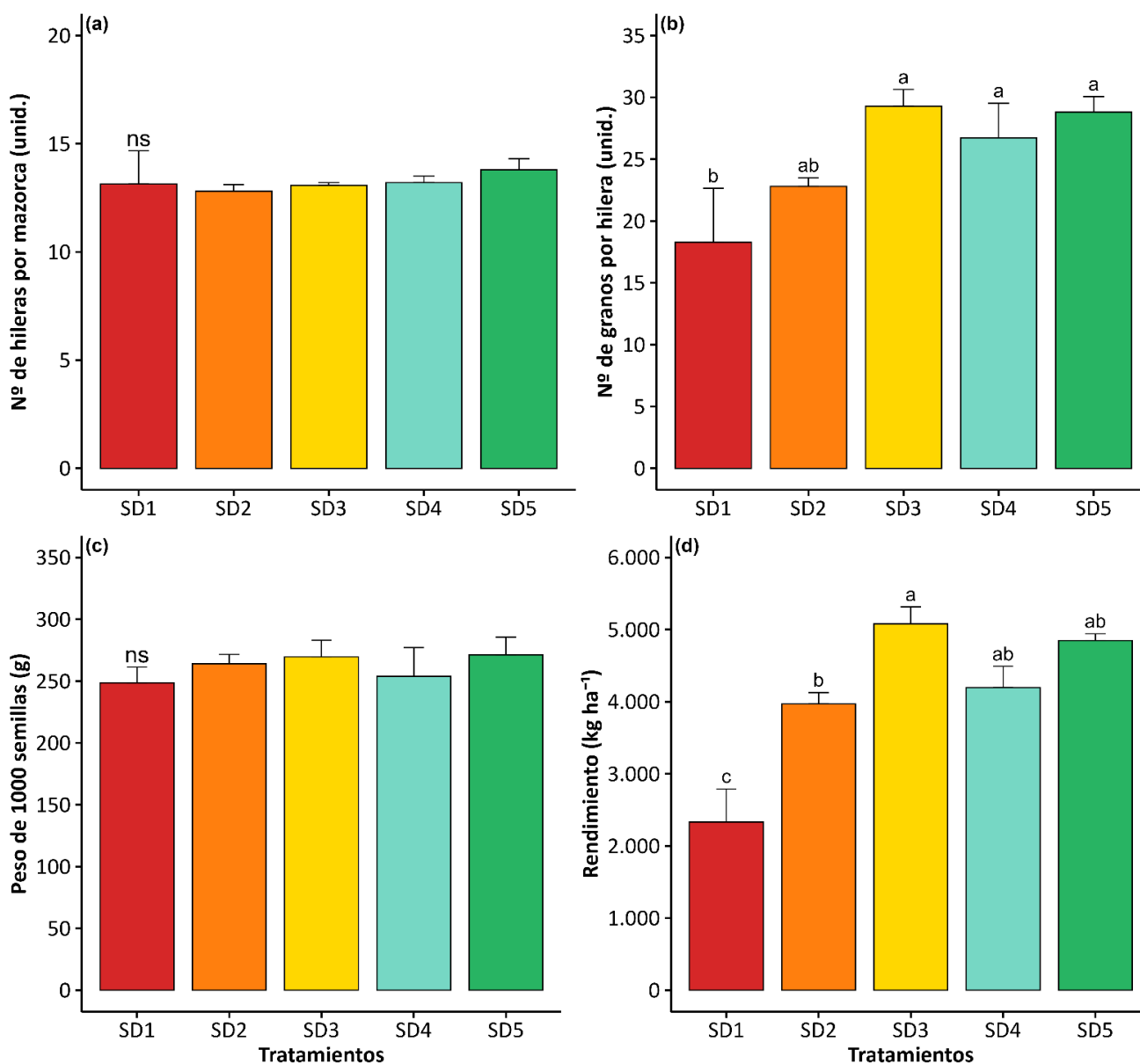


Figura 4. Número de hileras por mazorca (a), número de granos por hilera (b), peso de 1000 semillas (c) y productividad del maíz (d) en respuesta a los diferentes sistemas de manejo de suelo, Caazapá, Paraguay. Letras distintas indican diferencias significativas según la prueba de Duncan ($p \leq 0,05$); ns indica diferencia no significativa.

Para representar mejor la interacción de los parámetros productivos del maíz, fue realizado el análisis de componentes principales. A través del PCA (Figura 5) se consigue diferenciar los sistemas de siembra de acuerdo con los parámetros productivos, lo que evidencia la importancia del manejo de coberturas en la expresión del rendimiento. En el PC1 se observa que el 66,7 % de la variabilidad está explicada por los componentes productivos agrupados de acuerdo al manejo de suelos. El uso de leguminosas de verano y la asociación de los abonos verdes de invierno con el maíz influyeron positivamente para el agrupamiento de las variables; rendimiento de granos, número de granos por hilera y peso de 1000 semillas, lo que indica que el manejo de las coberturas favorece la acumulación de biomasa en los granos del maíz y mejoran la eficiencia productiva de la planta. En contraste, el sistema manejado sobre barbecho (SD1) se ubicó en el cuadrante opuesto (PC2 = 18 %), lo que muestra una menor asociación con las variables productivas y sugiere que la ausencia de coberturas limita la disponibilidad de nutrientes y reduce el potencial productivo.

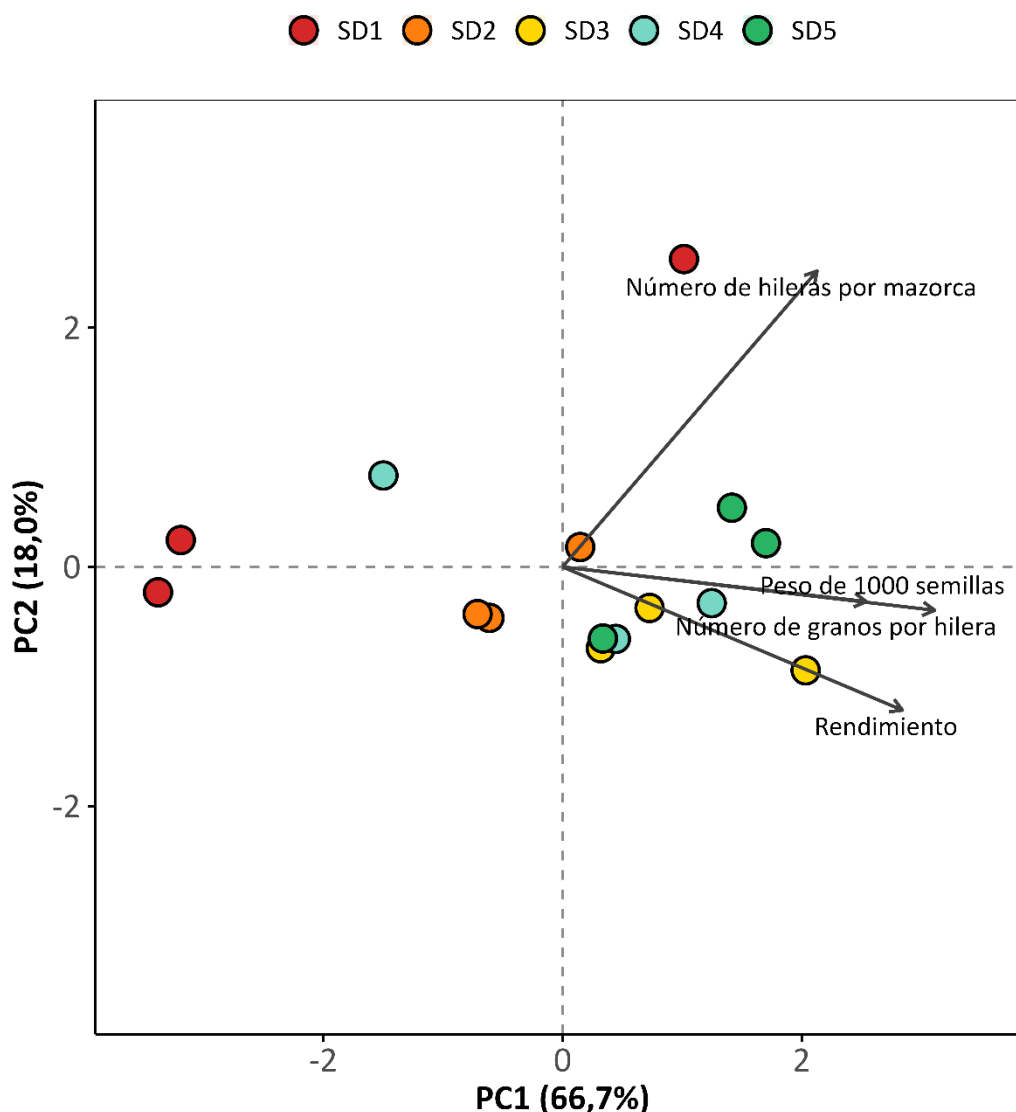


Figura 5. PCA de los parámetros productivos del maíz en respuesta a los diferentes sistemas manejos de suelo. Caazapá Paraguay

Para el cultivo de mandioca se observó que la longitud y el diámetro de las raíces comerciales y no comerciales no fueron influenciados por el sistema de manejo (Figuras 6a, 6b, 6c y 6d). Estos parámetros fueron similares al momento de la cosecha realizada un año después de la plantación. La longitud de las raíces comerciales presentó un promedio superior a 25 cm, mientras que el diámetro osciló entre 4 y 5 cm, lo que indica que el material genético tiene un ciclo de crecimiento medio a tardío y que las raíces se encontraban en periodo de desarrollo radicular y acumulación de

almidón al momento de la cosecha. Las raíces no comerciales mostraron promedios similares, lo que confirma esta tendencia.

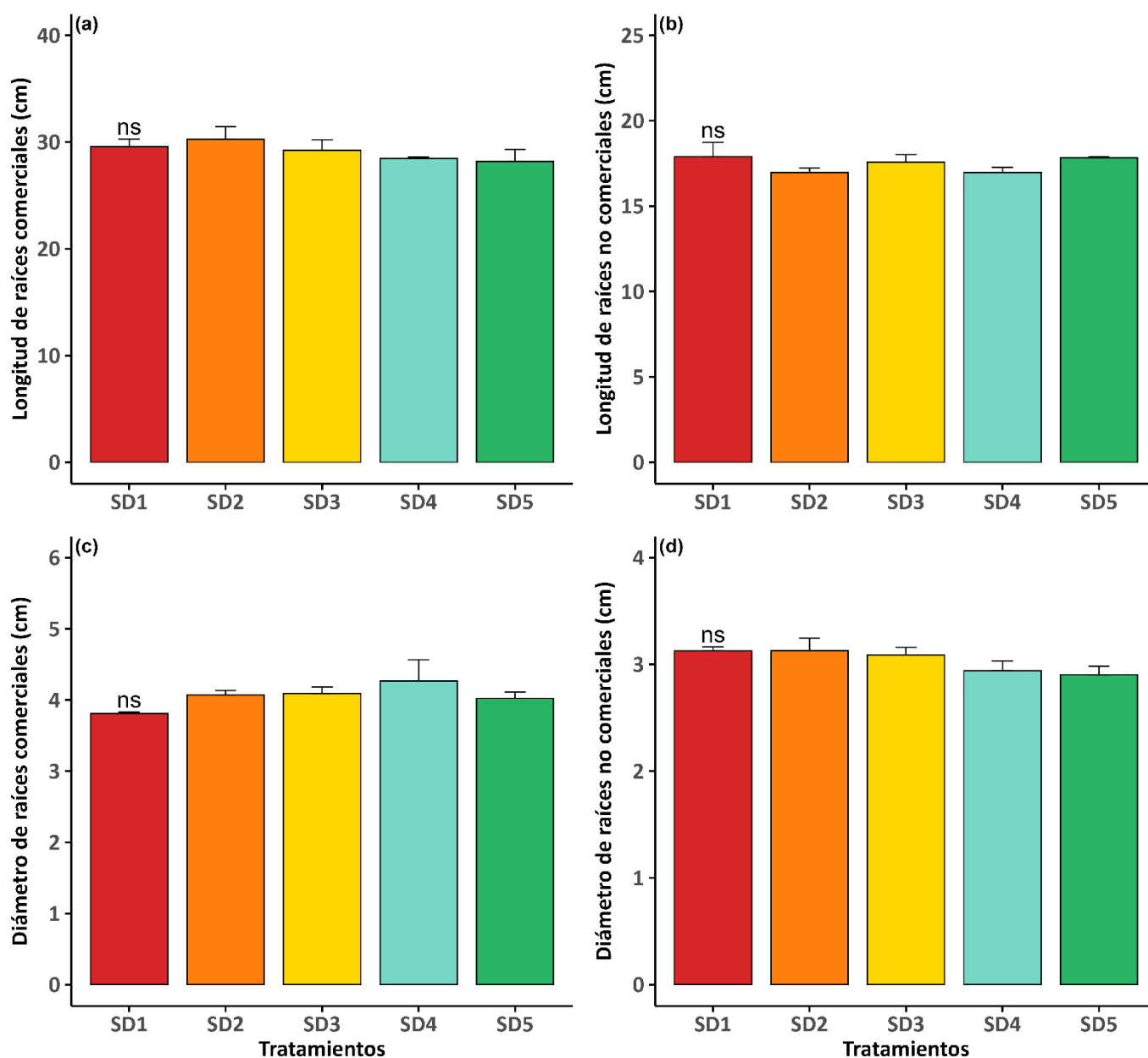


Figura 6. Longitud de raíces comerciales (a), no comerciales (b), diámetro de raíces comerciales (c) y diámetro de raíces no comerciales (d) en respuesta a los diferentes sistemas de manejo de suelo, Caazapá, Paraguay. ns indica diferencia no significativa según la prueba de Duncan ($p \leq 0,05$).

El peso de las raíces comerciales y no comerciales no se vio influenciado por los sistemas de manejo en estudio (Figuras 7a y b). Sin embargo, la productividad de la mandioca sí presentó diferencias entre los sistemas evaluados (Figura 7c). Se observó que las medias productivas aumentaron como respuesta al uso de las distintas coberturas vegetales del suelo en un 16,1%. Estadísticamente, el grupo control (20.370 kg/ha) mostró diferencias significativas con respecto a SD2 (26.160 kg/ha), aunque presentó similitudes con SD4 (22.490 kg/ha) y SD5 (22.190 kg/ha), pues comparte la misma letra según el test de Duncan a un nivel de significancia $\leq 5\%$. A pesar de la similitud estadística entre los grupos, en los sistemas SD3, SD4 (23.760 kg/ha) y SD5 se observaron un aumento gradual en la productividad por hectárea, superando los 20.000 kg ha⁻¹, comparados con el grupo implantados sobre barbecho (SD1), cuya productividad media fue de 20.370 kg ha⁻¹.

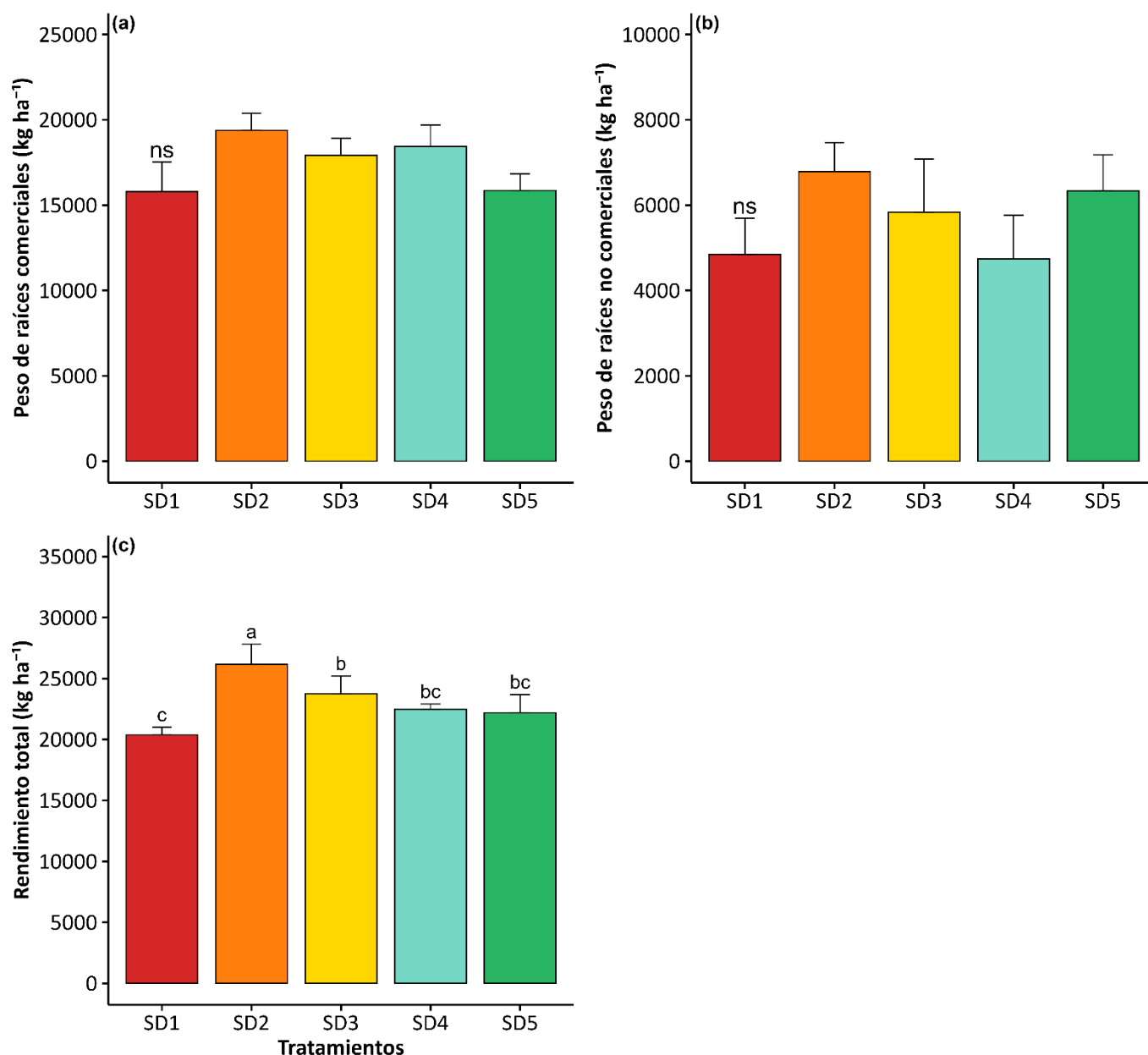


Figura 7. Peso de raíces comerciales (a), no comerciales (b) y rendimiento de la mandioca (c) en respuesta a los diferentes sistemas de manejo de suelo, Caazapá, Paraguay. Letras distintas indican diferencias significativas según la prueba de Duncan ($p \leq 0,05$); ns indica diferencia no significativa.

En la Figura 8 se observan los componentes principales de los parámetros productivos según los sistemas de siembra en estudio. El PC1 explicó el 34,2 % de la variabilidad, asociado principalmente al rendimiento total y a las características de raíces comerciales (peso y diámetro). Por otro lado, el PC2 explicó el 23,66 %, con mayor relación al diámetro y longitud de raíces no comerciales. El uso de *Canavalia ensiformis* en los sistemas durante el verano, junto con la asociación de abonos verdes de invierno en el cultivo de mandioca, favoreció que las variables productivas se agrupen en el cuadrante positivo del PC1, lo cual muestra la relación directa del manejo y la productividad. En contraste, el SD1 instaladas sobre barbecho se destacó entre las parcelas estudiadas al ubicarse en el cuadrante opuesto, con mayor asociación a las variables no comerciales del cultivo.

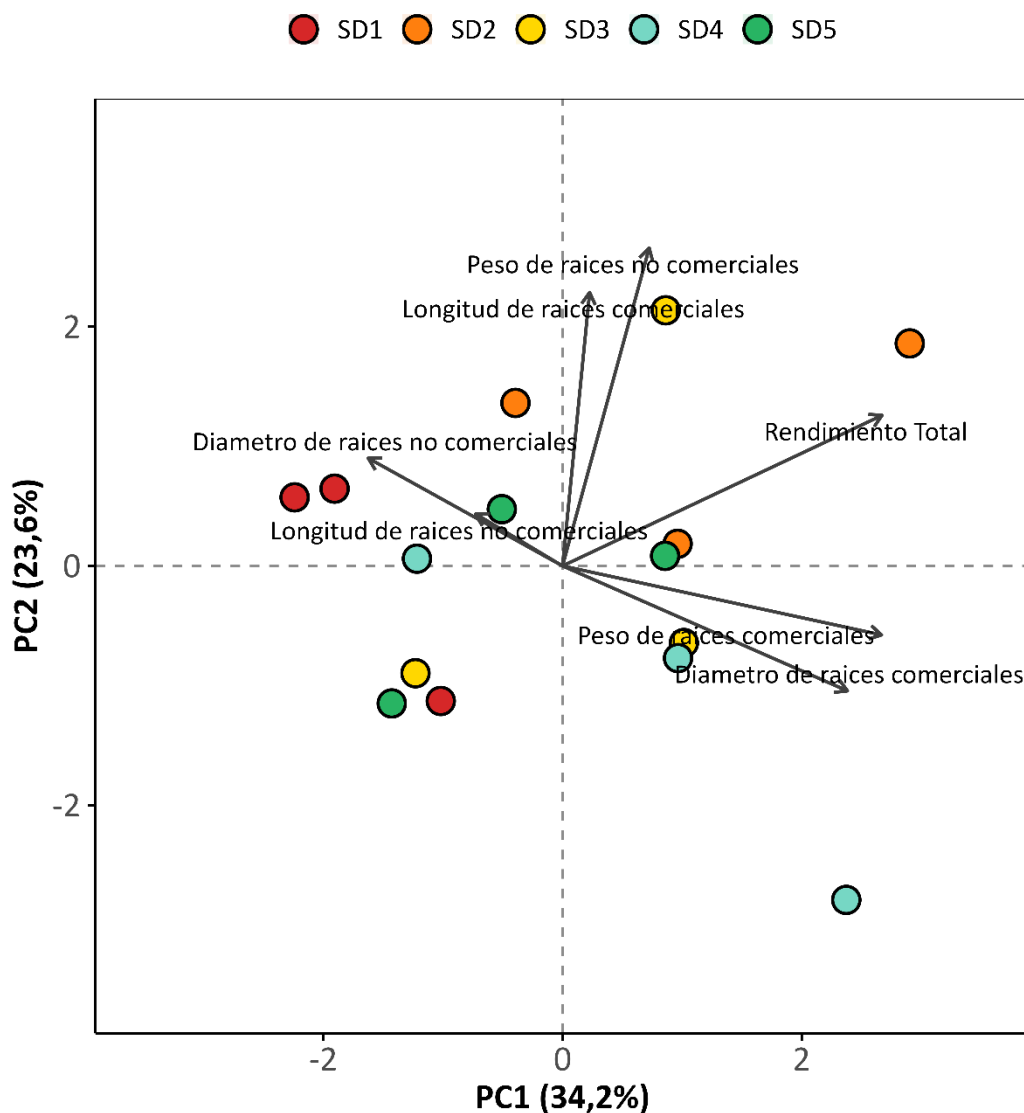


Figura 8. PCA de los parámetros productivos de la mandioca en respuesta a los diferentes sistemas manejos de suelo. Caazapá Paraguay

DISCUSIÓN

La fertilidad química del suelo está determinada principalmente por su origen mineralógico, que constituye la base de su composición, química y condiciona sus propiedades físicas mediante la formación de microagregados, influyendo en la acidez del suelo y controlando la población y la actividad microbiana del suelo^(9, 17). Sin embargo, el uso agrícola intensivo y el manejo inadecuado favorecen el deterioro de dicha fertilidad debido a la falta de reposición de los nutrientes extraídos por los cultivos^(18, 19). A esto se suma que los suelos de climas tropicales y subtropicales presentan una elevada lixiviación de nutrientes como consecuencia de la alta pluviosidad característica de estos ambientes^(5, 20). Un ejemplo de esta condición son los suelos agrícolas altamente intemperizados, sobre los cuales se asienta gran parte de la producción agrícola familiar en el Paraguay⁽⁴⁾. Esta situación se evidenció en la presente investigación, donde las limitaciones químicas observadas reflejan un manejo extractivo y poco sostenible⁽¹⁸⁾. Estos suelos requieren con urgencia prácticas adecuadas de manejo, considerando que el suelo es un recurso finito que demanda especial atención para garantizar la sostenibilidad de la producción agrícola y pecuaria del país^(11, 21).

Entre las alternativas de manejo destacan el uso racional de fertilizantes, el uso de polímeros para preservar la humedad del suelo, la rotación de cultivos y la incorporación de abonos verdes como cobertura vegetal, prácticas que constituyen pilares fundamentales para preservar la salud del suelo^(18, 22, 23). Estas estrategias contribuyen al reciclaje

de nutrientes, regulación de la temperatura y la humedad, aporte de biomasa, incremento de la actividad microbiana benéfica, aumento de la estructuración del suelo y la protección frente a la erosión ^(8, 18, 23, 24).

En el caso de las fincas familiares, factores como la limitada disponibilidad de información, el acceso restringido a insumos, la escasa rotación de cultivos y el bajo nivel de manejo favorecen aún más la degradación de los suelos ⁽¹¹⁾. Por ello, la recuperación de su salud constituye una tarea urgente que demanda el esfuerzo conjunto de diversos sectores ^(11, 19). Cabe señalar que este proceso es lento y complejo; no obstante, incluso acciones mínimas representan avances significativos ⁽²¹⁾. Un ejemplo de ello es el comportamiento del pH del suelo, que puede variar durante la mineralización de la materia orgánica ⁽²⁵⁾. En este contexto, el incremento de la acidez se asocia a la liberación de ácidos orgánicos de los residuos vegetales utilizados como cobertura ^(25, 26), como se observó en el tratamiento SD2.

La ausencia de cobertura vegetal limita el ciclado de nutrientes, lo que explica que el tratamiento SD1, mantenido en barbecho, presente un bajo contenido de materia orgánica ⁽¹²⁾. Este resultado resalta la importancia de un manejo agronómico adecuado, ya que sus beneficios no solo repercuten en los cultivos, sino también en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, contribuyendo al establecimiento de un sistema más sustentable y ecológicamente equilibrado ⁽¹¹⁾. Las coberturas vegetales, en particular los abonos verdes, son altamente eficaces en el ciclado de nutrientes ⁽⁸⁾. Su aporte de biomasa, junto con la simbiosis que establecen con microorganismos benéficos, favorece la incorporación de nitrógeno y el aumento de la actividad microbiana del suelo ⁽²²⁾. Además, su buen desarrollo radicular contribuye a la descompactación, mejora la absorción de nutrientes de baja movilidad, como el fósforo, y favorece la agregación del suelo ⁽⁹⁾.

Si bien en esta investigación no se observaron diferencias significativas en nutrientes como P, Ca, Mg y K, estos resultados reflejan la realidad de muchos agricultores familiares que trabajan en suelos altamente degradados ⁽²⁷⁾. Este tipo de suelo requiere sistemas de manejo que, a lo largo del tiempo, promuevan la recuperación de su salud, mediante la formación de humus, el incremento de la actividad biológica (macrofauna y microfauna) el aumento del pH, la disminución del Al^{+3} , la descompactación y la mejora en la saturación de nutrientes catiónicos, con el fin de elevar la productividad y la calidad de los productos agrícolas ^(11, 21).

El manejo con abonos verdes incrementa el número de granos en el maíz, lo que se traduce en una mayor productividad. Este efecto se debe a que especies de verano, como la *Canavalia ensiformis*, presentan un sistema radicular profundo y vigoroso, además de ser leguminosas altamente eficientes en el ciclo del nitrógeno gracias a su simbiosis con bacterias fijadoras ⁽²⁷⁾. De esta manera, aportan grandes cantidades de biomasa en un corto período de tiempo. Asimismo, su adecuada relación C:N favorece una descomposición relativamente rápida, garantizando un suministro constante de nutrientes al cultivo ^(12, 28). Todos los sistemas evaluados presentaron incrementos significativos en la productividad del maíz en comparación con el SD1 sobre barbecho (testigo). Esto puede explicarse porque el maíz, al ser un cultivo altamente exigente de nitrógeno en sus fases vegetativas, se ve limitado en ausencia de coberturas que contribuyan a la fijación y disponibilidad de este nutriente, reduciendo así su rendimiento ⁽²⁹⁾.

Otro factor que podría explicar el incremento en la productividad del maíz es el efecto de la cobertura vegetal sobre el microclima edáfico ⁽³⁰⁾. La presencia de cobertura contribuye al control de la temperatura del suelo, favorece la retención de agua y reduce el gasto energético de la planta, lo que se traduce en una mayor eficiencia fotosintética ^(21, 31). El maíz durante los primeros ciclos vegetativos define en gran medida el potencial productivo del cultivo. En este aspecto, durante la investigación el cultivo fue producido fuera de época (safriña), en un periodo del año, cuyas condiciones térmicas pueden traer consigo episodios de estrés y afectar directamente la expresión del potencial genético del maíz, reflejándose en una disminución de su productividad ^(29, 32).

Los beneficios de los sistemas sustentables que incorporan el uso de abonos verdes, como en esta investigación, trascienden el aumento de la productividad del maíz. A largo plazo, contribuyen a mejorar la salud del suelo, lo que se refleja en diversos aspectos: mayor rendimiento y calidad de la producción, reducción de la necesidad de carpidas y de agroquímicos, mejor manejo del agua y de los nutrientes, así como un incremento en la resiliencia de los cultivos frente a situaciones adversas ^(10, 33). Sin embargo, estos beneficios son difíciles de alcanzar sin la integración de otros métodos de manejo del suelo que complementen el uso de coberturas vegetales ^(8, 28, 30).

En este sentido, se hace evidente la necesidad de fortalecer las investigaciones locales y promover acciones conjuntas orientadas a mejorar los sistemas productivos ⁽¹¹⁾. Entre estas acciones se pueden mencionar: la corrección de la fertilidad y la descompactación del suelo, la implementación de coberturas vegetales, la rotación de cultivos, el manejo integrado de plagas y enfermedades, así como la incorporación de cultivos de interés comercial que aporten beneficios económicos al productor ⁽³⁰⁾.

La realidad de la agricultura familiar paraguaya se reflejó en el sistema manejado sobre barbecho (SD1). Este resultado demuestra que, además de las limitaciones químicas, físicas y biológicas de los suelos, el manejo convencional o sin planificación reduce de manera significativa la productividad del maíz⁽²⁹⁾, alcanzando rendimientos muy bajos (2.330 kg/ha), inferiores al promedio nacional que está por los 2.727 (kg/ha)⁽³⁴⁾. La ausencia de coberturas limita la disponibilidad de nutrientes y el potencial productivo, lo que en muchos casos genera frustración en los pequeños agricultores y contribuye al abandono de la actividad agrícola^(31, 35).

A medida que el sistema de manejo sustentable se establece, las condiciones del suelo tienden a volverse más favorables para el desarrollo de los cultivos^(10, 30). En el segundo ciclo productivo se observaron resultados relacionados con la mandioca, donde el peso, la longitud y el diámetro de las raíces no comerciales fueron bastante similares entre los sistemas evaluados. Este comportamiento puede atribuirse a que la variedad utilizada corresponde a un cultivar de ciclo tardío, el cual requiere más de 18 meses para expresar plenamente su potencial productivo⁽³⁶⁾. Es importante destacar que el órgano morfológico de interés económico en la mandioca es la raíz tuberosa, cuyo adecuado desarrollo depende de condiciones físicas, químicas y biológicas óptimas del suelo, además del tiempo necesario para que los cultivares acumulen almidón como sustancia de reserva^(36, 37). Una vez acumulado, este almidón favorece la homogeneidad en el diámetro de las raíces y permite un mayor número de raíces con calidad comercial. Por el contrario, cuando las condiciones del suelo son inadecuadas, ya sean químicas, físicas o biológicas, se interfiere en el metabolismo de los azúcares, reduciendo la acumulación de almidón en las raíces^(36, 37, 38). Esto resulta en una mayor proporción de raíces no aptas comercialmente, afectando negativamente la productividad y rentabilidad del cultivo⁽³⁶⁾.

La mayor productividad observada en el SD2 podría explicarse por la acumulación de biomasa desde la instalación de la parcela, lo que permitió una liberación gradual de nutrientes acorde a las necesidades del cultivo⁽¹¹⁾. La descomposición de *Cajanus cajan*, sumada al aporte de los residuos de maíz, avena, lupino y nabo en invierno, junto con el uso de *Canavalia ensiformis* en verano y la posterior asociación con avena, lupino y nabo, podría haber favorecido las propiedades físicas del suelo^(22, 28, 37). Entre los principales beneficios que la literatura señala se destacan la reducción de la compactación, el incremento en la estabilidad de los agregados, así como una mejor regulación de la humedad y la temperatura del suelo, lo que cual favorece una mayor eficiencia productiva en el sistema^(10, 33). Tal como señalan diversas investigaciones,^(39, 40, 41) los beneficios de las coberturas verdes son numerosos y probablemente propiciaron que este cultivar de mandioca respondiera positivamente bajo estas condiciones de manejo. En términos generales, los rendimientos obtenidos en los sistemas evaluados superaron los 20.000 kg ha⁻¹, cifra muy relevante si se considera que el promedio nacional paraguayo apenas alcanza los 18.000 kg ha⁻¹⁽³⁶⁾.

La mandioca, junto con el maíz, constituye una de las principales fuentes de carbohidratos para las familias paraguayas. Su importancia va más allá de lo nutricional, ya que también representa un eje económico, social y cultural en el país^(29, 36). Por ello, resulta fundamental que la productividad de estos cultivos se incremente mediante sistemas de producción sustentables, orientados a la conservación del recurso suelo y a la optimización del uso de los insumos agrícolas. Estrategias de manejo de agua y fertilizantes pueden mejorar la productividad y la calidad de las materias primas, además de comprender las funciones fisiológicas de cada nutriente y las características ecológicas y climáticas de la producción para tomar decisiones que garanticen alta producción y óptima calidad⁽⁸⁾.

CONCLUSIONES

La inclusión de plantas de cobertura afecta las propiedades químicas (pH y materia orgánica) del suelo y aumenta los rendimientos de maíz hasta un 102,8 % y de la mandioca hasta un 16,1 % en suelos altamente intemperizados donde se sitúa la agricultura familiar del departamento de Caazapá, Paraguay.

La integración de coberturas vegetales y prácticas de manejo sostenible es clave para maximizar la productividad, conservar el suelo y fortalecer la resiliencia de los sistemas agrícolas familiares paraguayos. No obstante, es necesario realizar más investigaciones y análisis robustos del sistema en su conjunto por un periodo más largo, para optimizar la eficiencia productiva de los cultivos de interés y obtener resultados más sostenibles.

Declaración de financiamiento:	El proyecto "Manejo Sostenible de Rubros de Autoconsumo con uso de Subsulado de suelo y plantas de servicios en la Agricultura Familiar en el Departamento de Caazapá" aprobado por Resolución N° 901-00-2022 del Acta N° 23 de fecha 11/11/2022 fue financiado por la Universidad Nacional de Asunción y el Ministerio de Agricultura y Ganadería.
Declaración de conflicto de intereses:	Los autores declaran que no poseen conflicto de interés.
Declaración de autores:	Los autores aprueban la versión final del artículo.
Contribución de autores:	<p>Conceptualización: Javier Ortigoza Guerreño</p> <p>Curación de datos: Alma María Torres Ferreira, Blanca Beatriz Alonso Giménez y Marlene Elizabeth Báez Arzamendia</p> <p>Análisis formal: Alma María Torres Ferreira, Blanca Beatriz Alonso Giménez y Marlene Elizabeth Báez Arzamendia</p> <p>Obtención de financiación: Javier Ortigoza Guerreño</p> <p>Investigación: Alma María Torres Ferreira, Blanca Beatriz Alonso Giménez y Marlene Elizabeth Báez Arzamendia</p> <p>Metodología: Javier Ortigoza Guerreño, Alma María Torres Ferreira, Blanca Beatriz Alonso Giménez y Marlene Elizabeth Báez Arzamendia</p> <p>Administración del proyecto: Javier Ortigoza Guerreño</p> <p>Recursos: Javier Ortigoza Guerreño</p> <p>Software: Alma María Torres Ferreira, Carlos Alcides Villalba Algarín, Blanca Beatriz Alonso Giménez y Marlene Elizabeth Báez Arzamendia</p> <p>Supervisión: Javier Ortigoza Guerreño</p> <p>Validación: Javier Ortigoza Guerreño, Alma María Torres Ferreira, Blanca Beatriz Alonso Giménez y Marlene Elizabeth Báez Arzamendia</p> <p>Visualización: Alma María Torres Ferreira, Blanca Beatriz Alonso Giménez y Marlene Elizabeth Báez Arzamendia</p> <p>Redacción del borrador original: Alma María Torres Ferreira, Blanca Beatriz Alonso Giménez y Marlene Elizabeth Báez Arzamendia</p> <p>Redacción, revisión y edición: Javier Ortigoza Guerreño, Marcos Fabian Sanabria Franco y Carlos Alcides Villalba Algarín</p>
Agradecimientos:	Al laboratorio de Suelos de la Facultad de Ciencias Agrarias, San Lorenzo, por el apoyo en los análisis de suelos. A los estudiantes que participaron en la ejecución del proyecto.
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. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Reseña de Agricultura Familiar. 2021. Disponible en: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/cef79f7e-8f1a-4653-a5e5-0d25cceda256/content>
2. Grossman J. Ecosystem service trade-offs and land use among smallholder farmers in eastern Paraguay. *Ecology and Society*. 2015;20(1). Disponible en: <http://dx.doi.org/10.5751/ES-06953-200119>
3. Ayala D, Achinelli M. Género y economía. Visibilización de la contribución de las mujeres en la agricultura familiar campesina en Paraguay. Año 2019. *Kera Yvoty: reflexiones sobre la cuestión social*. 2021;6(especial):11-31. Disponible en: <https://doi.org/10.54549/ky.6e.2021.11>
4. Derpsch R, Lange D, Birbaumer G, Moriya K. Why do medium- and large-scale farmers succeed practicing CA and small-scale farmers often do not? – experiences from Paraguay. *International Journal of Agricultural Sustainability*. 2016;14(3):269-81. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/14735903.2015.1095974>
5. Paredes RN. 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. Derpsch R, Lange D, Birbaumer G, Moriya K. Why do medium-and large-scale farmers succeed practicing CA and small-scale farmers often do not?—experiences from Paraguay. *Int J Agric Sustain*. 2016;14(3):269-81. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/14735903.2015.1095974>
7. Benítez Cañiza AA, Eisenkölbl Closs AR. Influencia de actividades agropecuarias sobre la deforestación en la Zona Norte del Paraguay. *Investig. estud. UNA*. 2024;15(2):24-34. Disponible en: <https://doi.org/10.57201/ieuna2424143>
8. 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%20%20>
9. Kome GK, Enang RK, Tabi FO, Yerima BPK. Influence of clay minerals on some soil fertility attributes: a review. *OJSS*. 2019;09(09):155-88. Disponible en: <https://doi.org/10.4236/ojss.2019.99010>
10. Babu S, Singh R, Avasthe R, Rathore SS, Kumar S, Das A, et al. Conservation tillage and diversified cropping enhance system productivity and eco-efficiency and reduce greenhouse gas intensity in organic farming. *Front Sustain Food Syst*. 2023;7:1114617. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1114617>
11. 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). Disponible en: <https://doi.org/10.18004/investig.agrar.2025.2701825>
12. Assunção SJR. Manejo do solo e adubos verdes como tecnologias sustentáveis para a produção agrícola. [Tesis de postgrado]. Brasil: Universidade Federal de Sergipe, 2024.
13. Cherubin MR, Bordonal RO, Castioni GA, Guimarães EM, Lisboa IP, Moraes LAA, et al. Soil health response to sugarcane straw removal in Brazil. *Industrial Crops and Products*. 2021;163:113315. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113315>
14. López OE, González E, de Llamas PA, Molinas AS, Franco ED, García S, et al. Reconocimiento de suelos y capacidad de uso de las tierras: Región Oriental, Paraguay. Asunción: MAG/Dirección de Ordenamiento Ambiental; 1995. Disponible en: <https://www.geologiadelparaguay.com/Estudio-de-Reconocimiento-de-Suelos-Regi%C3%B3n-Oriental-Paraguay.pdf>
15. Caballero Mendoza CA, Enciso Garay CR, Tullo Arguello CC, González Villalba JD. Guía técnica cultivo de mandioca. San Lorenzo: Editorial Facultad de Ciencias Agrarias Universidad Nacional de Asunción; 2019. Disponible en: <https://www.agr.una.py/ebooks/index.php/edifca/catalog/view/28/27/111>
16. Teixeira PC, Donagemma GK, Fontana A, Teixeira WG, editores. Manual de métodos de análise de solo. 3ª ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa; 2017. Disponible en: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1085209/manual-de-metodos-de-analise-de-solo>
17. Xue B, Huang L, Li X, Lu J, Gao R, Kamran M, et al. Effect of clay mineralogy and soil organic carbon in aggregates under straw incorporation. *Agronomy*. 2022;12(2):534. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/agronomy12020534>
18. Lal R. Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*. 2015;7(5):5875-95. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su7055875>
19. Ayub MA, Usman M, Faiz T, Umair M, Ul Haq MA, Rizwan M, et al. Restoration of degraded soil for sustainable agriculture. En: Meena RS, editor. *Soil Health Restoration and Management*. Singapore: Springer Singapore; 2020. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-981-13-8570-4_2
20. Stroosnijder L. Rainfall and land degradation. En: Sivakumar MVK, Ndiang'ui N, editores. *Climate and Land Degradation*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2007.
21. Xing Y, Wang X, Mustafa A. Exploring the link between soil health and crop productivity. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2025;289:117703. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.117703>
22. Lei B, Wang J, Yao H. Ecological and environmental benefits of planting green manure in paddy fields. *Agriculture*. 2022;12(2):223. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/agriculture12020223>
23. Fariña PRV, Franco MFS, Gonzalez ARM, Silva CD da, Aquino LÂ, Macedo WR. Eficiência da adubação fosfatada no feijoeiro em função de doses de polímero superabsorbente misturado ao fertilizante. *Research, Society and Development*. 2022;11(4):e37511427470-e37511427470. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i4.27470>
24. Algarin CAV, 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://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2950289625000521>
25. Wang C, Kuzakov Y. Soil organic matter priming: The pH effects. *Global Change Biology*. 2024;30(6):e17349. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/gcb.17349>
26. Michael PS. Role of organic fertilizers in the management of nutrient deficiency, acidity, and toxicity in acid soils—A review. *Journal of Global Agriculture and Ecology*. 2021;12(3):19-30. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/355201345_The_roles_of_organic_fertilizers_in_the_management_of_nutrient_deficiency_acidity_and_toxicity_in_acid_soils
27. Noein B, Soleymani A. Corn (*Zea mays* L.) physiology and yield affected by plant growth regulators under drought stress. *J Plant Growth Regul*. 2022;41(2):672-81. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10332-3>

28. Cherubin MR, Carvalho ML, Vanolli BDS, Schiebelbein BE, Borba DAD, Luz FBD & Souza V. Guia práctico de plantas de cobertura: aspectos fitotécnicos e impactos sobre a saúde do solo. 2022.
29. Mamabolo E, Gaigher R, Pryke JS. Conventional agricultural management negatively affects soil fauna abundance, soil physicochemical quality and multifunctionality. *Pedobiologia*. 2024;104:150961. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031405624034826>
30. Yang X, Xiong J, Du T, Ju X, Gan Y, Li S, et al. Diversifying crop rotation increases food production, reduces net greenhouse gas emissions and improves soil health. *Nat Commun*. 2024;15(1):198. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-44464-9>
31. Fageria NK. Green manuring in crop production. *Journal of Plant Nutrition*. 2007;30(5):691-719. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/01904160701289529>
32. López GLG, Lesme BJA. Grandes grupos de suelos de la región Oriental del Paraguay. San Lorenzo, Paraguay: Sociedad Paraguaya de Ciencia del Suelo; 2024.
33. Gerke J. The central role of soil organic matter in soil fertility and carbon storage. *Soil Systems*. 6(2):33. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/soilsystems6020033>
34. Cámara Paraguaya de Exportadores y Comercializadores de Cereales y Oleaginosas. Área de siembra, producción y rendimiento. Asunción: CAPECO. Disponible en: <https://capeco.org.py/area-de-siembra-produccion-y-rendimiento/>
35. Movahedi R, Jawanmardi S, Azadi H, Goli I, Viira AH, Witlox F. Why do farmers abandon agricultural lands? The case of Western Iran. *Land Use Policy*. 2021;108:105588. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105588>
36. Ortigoza G, López C, Jorge G. Guía Técnica cultivo de Maíz JICA/UNA. San Lorenzo: Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Asunción; 2019.
37. Caballero-Mendoza CA, Enciso-Garay CR, Tullo-Arguello CC, González-Villalba JD. Guía técnica cultivo de mandioca. 2019.
38. Chávez RNV, Monzón MÁB, Paiva MAP, Romero MGC. Efectos de plantas de cobertura sobre la producción de la mandioca en plantío directo. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*. 2022;6(1):2374-88. Disponible en: <https://ciencialatina.org/index.php/cienciala/article/view/1655>
39. Fernando M, Scott N, Shrestha A, Gao S, & Hale L. A native plant species cover crop positively impacted vineyard water dynamics, soil health, and vine vigor. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2024;367:108972. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.108972>
40. Sharma P, Reitz T, Singh SP, Worrlich A & Muehe EM. Going beyond improving soil health: Cover plants as contaminant removers in agriculture. *Trends in Plant Science*. 2025;30(5):539-552. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2025.01.009>
41. Singh NK, Sachan K, Ranjitha G, Chandana S, Manoj B, Panotra N, et al. Building Soil Health and Fertility through Organic Amendments and Practices: A Review. *AJSSPN*. 2024;10(1):175-97. Disponible en: <https://doi.org/10.9734/ajsspn/2024/v10i1224>