Ciencia y Tecnología Agropecuaria
e-ISSN: 2805-6604; p-ISSN: 1900-0863
Open Access
Artículo Investigación
Vol. 11 Núm. 1 (2026): Enero – Junio

Respuesta productiva y económica de la mandioca bajo plantas de cobertura invernales en dos áreas de Caazapá, Paraguay

Productive and economic response of cassava under winter cover crops in two areas of Caazapá, Paraguay

Javier Ortigoza Guerreño[1]*, Jorge Alberto Gonzalez Brizuela[2], Maria Eugenia Torres Ferreira[3], Marcos Fabian Sanabria Franco[4] y Carlos Alcides Villalba Algarin[5]

[1]*Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Agrarias. Caazapá, Paraguay; correo electrónico javier.ortigoza@agr.una.py ORCID: https://orcid.org/0009-0002-2425-2512
[2]Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Agrarias. Caazapá, Paraguay; correo electrónico jagbrizuela20@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0005-3864-114X
[3]Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Agrarias. Caazapá, Paraguay; correo electrónico maria.torres@agr.una.py ORCID: https://orcid.org/0009-0005-2762-0044
[4]Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Agrarias. San Lorenzo, Paraguay; correo electrónico marcosfabiansanabria@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7820-9037
[5]Instituto Paraguayo de Tecnología Agraria, Centro de Investigación Capitán Miranda, Paraguay; correo electrónico carlos.villalba@ipta.gov.py ORCID: https://orcid.org/0009-0000-5498-1594

*Autor de correspondencia: javier.ortigoza@agr.una.py

Recibido: 18-04-2026 Aceptado: 28-06-2026 Publicado: 28-06-2026

Citar: Ortigoza et al. (2026). Respuesta productiva y económica de la mandioca bajo plantas de cobertura invernales en dos áreas de Caazapá, Paraguay. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, *11*(01), e110108. https://doi.org/10.24054/cyta.v11i1.4706

Ciencia y Tecnología Agropecuaria es una revista publicada por la Universidad de Pamplona bajo la licencia: Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)

Resumen

La productividad de la mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) en suelos franco-arenosos de Paraguay está limitada por la baja fertilidad y la escasa retención de agua. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de cinco tratamientos de manejo con plantas de cobertura invernales sobre la biomasa de las coberturas, los componentes del rendimiento y el rendimiento total de las raíces de mandioca, así como la rentabilidad económica del cultivo. El ensayo se realizó durante el periodo 2022–2023 en dos sitios del departamento de Caazapá, bajo un diseño de bloques completos al azar con cinco tratamientos y cuatro repeticiones por sitio: barbecho + mandioca (B+M, testigo), avena negra + mandioca (A+M), avena negra + lupino blanco + mandioca (A+L+M), avena negra + nabo forrajero + mandioca (A+N+M) y avena negra + vicia + mandioca (A+V+M). Se cuantificaron la biomasa de las coberturas, el peso y la longitud de las raíces comerciales y no comerciales, el rendimiento total y los indicadores financieros. La inclusión de plantas de cobertura influyó en la producción de biomasa y en el rendimiento de mandioca, con respuestas variables entre tratamientos y sitios. En el Sitio 1 (FCA-UNA), la asociación A+L+M alcanzó el mayor rendimiento e ingreso neto. En el Sitio 2 (Finca San Antonio), los tratamientos A+M y A+V+M se destacaron por sus rendimientos de mandioca, con rentabilidades de 91,60 % y 87,54 %, respectivamente. La integración de plantas de cobertura de invierno constituye una alternativa viable para mejorar la productividad del cultivo y la rentabilidad económica en suelos franco-arenosos.

Palabras clave: rentabilidad económica; abonos verdes; *Manihot esculenta* Crantz; rendimiento de raíces.

Abstract

Cassava (*Manihot esculenta* Crantz) productivity in sandy loam soils in Paraguay is limited by low soil fertility and poor water retention. The objective of this study was to evaluate the effects of five management treatments involving winter cover crops on cover crop biomass, yield components, total cassava root yield, and crop economic profitability. The trial was conducted during the 2022–2023 period at two sites in the Caazapá Department, using a randomized complete block design with five treatments and four replications per site: fallow + cassava (B+M, control), black oat + cassava (A+M), black oat + white lupin + cassava (A+L+M), black oat + forage radish + cassava (A+N+M), and black oat + vetch + cassava (A+V+M). Cover crop biomass, weight and length of marketable and non-marketable roots, total yield, and financial indicators were quantified. The inclusion of cover crops influenced biomass production and cassava yield, with responses varying among treatments and sites. At Site 1 (FCA-UNA), the A+L+M combination achieved the highest yield and net income. At Site 2 (San Antonio Farm), the A+M and A+V+M treatments stood out for their cassava yields, with profitability rates of 91.60% and 87.54%, respectively. The integration of winter cover crops represents a viable alternative for improving crop productivity and economic profitability in sandy loam soils.

Keywords: economic profitability, green manures, *Manihot esculenta* Crantz, root yield.

Introducción

La mandioca (*Manihot esculenta Crantz*) es uno de los cultivos más importantes para la alimentación humana y animal en las regiones tropicales y subtropicales, constituyendo una fuente esencial de carbohidratos y un componente estratégico para la seguridad alimentaria y la economía rural de Paraguay (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2018; Ministerio de Agricultura y Ganadería [MAG], 2022). En el país, este cultivo ocupa un lugar central dentro de la agricultura familiar, ya que además de abastecer el consumo doméstico, genera ingresos mediante su comercialización en mercados locales e industrias procesadoras (Ortigoza Guerreño et al., 2026). No obstante, los rendimientos promedio nacionales continúan siendo inferiores a su potencial productivo, situación asociada principalmente al manejo inadecuado del suelo, la escasa rotación de cultivos y la limitada adopción de prácticas conservacionistas, factores que favorecen la degradación física, química y biológica del suelo (Howeler, 2014; MAG, 2022; Villalba Algarin et al., 2026).

Gran parte de la producción de mandioca en Paraguay se desarrolla sobre suelos franco-arenosos, clasificados principalmente como Alfisoles y Ultisoles, que presentan bajo contenido de materia orgánica, reducida capacidad de intercambio catiónico y limitada retención de agua (Nunes et al., 2018; Caballero-Mendoza et al., 2019). Estas características, sumadas al régimen de lluvias de alta intensidad, incrementan las pérdidas de nutrientes por erosión y lixiviación (Sanzonowicz, 2010). Como consecuencia, la disponibilidad de agua y nutrientes durante las etapas críticas del cultivo disminuye, afecta el crecimiento de las raíces tuberosas, reduce su peso y tamaño y limita la calidad y el rendimiento final (Howeler, 2014; Franco y Delgado, 2022; Chavez et al., 2022).

En este contexto, el uso de plantas de cobertura dentro de sistemas de siembra directa o de labranza mínima constituye una alternativa eficiente para mejorar la calidad del suelo y aumentar la productividad del cultivo (Villalba Algarin et al., 2026; Ma et al., 2021). La cobertura vegetal protege la superficie contra el impacto de las precipitaciones, reduce las variaciones de temperatura y favorece la incorporación de materia orgánica mediante la descomposición de los residuos vegetales (Kumar et al., 2014; Albuquerque et al., 2012; Calegari et al., 2013). Asimismo, mejora la estabilidad estructural del suelo, optimiza el reciclaje de nutrientes y contribuye al control de malezas, disminuyendo la necesidad de carpidas y reduciendo los costos de producción (Calegari et al., 2013; Nunes et al., 2018; Jančaitienė y Šlinkšienė, 2025).

Entre las especies utilizadas como cobertura durante el período otoño-invierno se destacan la avena negra (*Avena strigosa* Schreb.), que aporta elevados niveles de biomasa y prolonga la permanencia del rastrojo debido a su alta relación carbono/nitrógeno (Perin et al., 2004). Las leguminosas, como la vicia (*Vicia villosa* Roth.) y el lupino blanco (*Lupinus albus* L.), contribuyen al enriquecimiento del suelo mediante la fijación biológica de nitrógeno, mientras que el nabo forrajero (*Raphanus sativus* L.) favorece la descompactación del suelo y el reciclaje de nutrientes gracias a su sistema radical profundo (Calegari et al., 2013; Lyu et al., 2024; Jančaitienė y Šlinkšienė, 2025). La combinación de estas especies en mezclas puede potenciar sus funciones complementarias, incrementando la producción de biomasa y los beneficios sobre el suelo respecto a las coberturas en monocultivo (Perin et al., 2004; Yang et al., 2023).

A pesar de los numerosos estudios sobre plantas de cobertura en cultivos como maíz y soja, la información disponible sobre su efecto en la mandioca bajo las condiciones edafoclimáticas de Paraguay sigue siendo limitada (Chavez et al., 2022;

(e-ISSN: 2805-6604; p-ISSN: 1900-0863)

Villalba Algarin et al., 2024). En particular, existe escasa evidencia acerca de la influencia de coberturas puras y consorciadas en suelos predominantemente arenosos, la producción de biomasa, el desarrollo radicular y el rendimiento comercial de la mandioca.

En este contexto, se planteó la hipótesis de que la utilización de plantas de cobertura de invierno, tanto en monocultivo como en mezcla, incrementa la producción de biomasa aérea, la longitud y peso de las raíces comerciales de mandioca, el rendimiento total y la rentabilidad económica del sistema. En consecuencia, el objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de diferentes tratamientos con plantas de cobertura de invierno sobre la producción de biomasa de cobertura, la longitud, peso y rendimiento de raíces comerciales y no comerciales de la mandioca, así como analizar su rentabilidad económica y la relación entre la biomasa generada y los componentes del rendimiento en dos sitios experimentales del departamento de Caazapá, Paraguay.

Materiales y métodos

Sitios experimentales

La investigación se desarrolló simultáneamente durante el periodo agrícola 2022–2023 en dos localidades del departamento de Caazapá, Paraguay. Los suelos de las áreas experimentales se caracterizaron por presentar texturas ligeras (franco-arenosas) y condiciones agroclimáticas regionales similares.

Sitio 1 (FCA-UNA): Campo experimental de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Asunción, Filial Caazapá (26° 11′ S, 56° 22′ O; 143 m s. n. m.).

Sitio 2 (Finca del Productor): Finca San Antonio, ubicada en la Compañía San Antonio, Distrito de General Higinio Morínigo (26° 11′ 45″ S, 56° 22′ 05″ O; 131 m s. n. m.).

El clima regional, según la clasificación de Köppen, es húmedo y mesotérmico (Cfa), con una temperatura media anual de 22,9 °C y una precipitación media anual histórica de 1.640 mm. Ambos experimentos siguieron el mismo cronograma: la siembra de los abonos verdes se realizó en abril de 2022, el manejo de la biomasa y la implantación de la mandioca se efectuaron en septiembre de 2022, y la cosecha final se realizó en agosto de 2023, después de 11 meses de ciclo vegetativo del cultivo principal.

Los suelos de ambos sitios se clasifican taxonómicamente como Ultisoles (Rhodic Paleudult) (López y Lesme, 2024). Previo al establecimiento de las unidades experimentales, se extrajeron muestras compuestas de suelo a una profundidad de 0–20 cm para su caracterización química y granulométrica inicial (Tabla 1).

Tabla 1. Caracterización química y física inicial de los suelos (profundidad 0–20 cm) en los dos sitios experimentales. Caazapá, Paraguay, 2022.

Sitio	Profundidad	pH	MO	P	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^{+}	Al+H	CIC	Clase textural
	cm		%	(mg kg^{-1})	.....(cmolc(+) kg^{-1}).....					
Sitio 1 (FCA)	0–20	5,02	1,10	3,22	1,09	0,36	0,10	1,26	2,81	Franco arenoso
Sitio 2 (Finca)	0–20	5,20	1,56	6,58	1,88	0,55	0,14	1,85	4,42	Franco arenoso

MO = materia orgánica; CIC = capacidad de intercambio catiónico. P se expresa en mg kg^{-1}; Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+}, Al+H y CIC en $cmol_{c(+)}\,kg^{-1}$. Fuente: elaboración propia a partir de los certificados de análisis de suelo de la FCA-UNA, Filial Caazapá.

Diseño experimental y tratamientos

En ambos sitios experimentales se aplicó un diseño de bloques completos al azar (DBCA) con cinco tratamientos y cuatro repeticiones, totalizando 20 unidades experimentales por sitio y 40 en el conjunto del estudio. La aleatorización de los tratamientos se realizó de manera independiente dentro de cada bloque. Cada unidad experimental estuvo constituida por seis hileras de mandioca de 5,0 m de longitud, con espaciamientos de 1,0 m entre hileras y 0,70 m entre plantas. La anchura efectiva de cada parcela fue de 5,0 m (1,0 m de franja por hilera), lo que representó una superficie de 25,0 m^2 por parcela (5,0 m × 5,0 m).

Los bloques estuvieron separados por calles de 1,0 m y las unidades experimentales dentro de cada bloque por una distancia de 1,5 m., la superficie total ocupada por cada sitio experimental fue de 775 m^2, incluyendo las parcelas, pasillos y áreas de maniobra, y la del conjunto del estudio fue de 1.550 m^2.

(e-ISSN: 2805-6604; p-ISSN: 1900-0863)

Para reducir el efecto de borde, la parcela útil estuvo conformada por las cuatro hileras centrales, excluyendo las dos hileras laterales y una planta ubicada en cada cabecera (0,70 m en cada extremo). De este modo, la longitud útil por hilera fue de 3,5 m, determinando una superficie útil de 14,0 m² (4,0 m de ancho × 3,5 m de largo), que incluyó 24 plantas evaluables por parcela.

Los datos de rendimiento de raíces obtenidos en los 14,0 m² se convirtieron a kg·ha⁻¹ mediante extrapolación directa a la superficie de una hectárea (10.000 m²). Las estrategias de manejo evaluadas fueron:

1. **B+M (Testigo):** Barbecho con vegetación espontánea previo a la siembra de mandioca.
2. **A+M:** *Avena strigosa* Schreb. (80 kg ha⁻¹) + mandioca.
3. **A+L+M:** *Avena strigosa* (80 kg ha⁻¹) + *Lupinus albus* L. (70 kg ha⁻¹) + mandioca.
4. **A+N+M:** *Avena strigosa* (80 kg ha⁻¹) + *Raphanus sativus* L. (20 kg ha⁻¹) + mandioca.
5. **A+V+M:** *Avena strigosa* (80 kg ha⁻¹) + *Vicia villosa* Roth. (40 kg ha⁻¹) + mandioca.

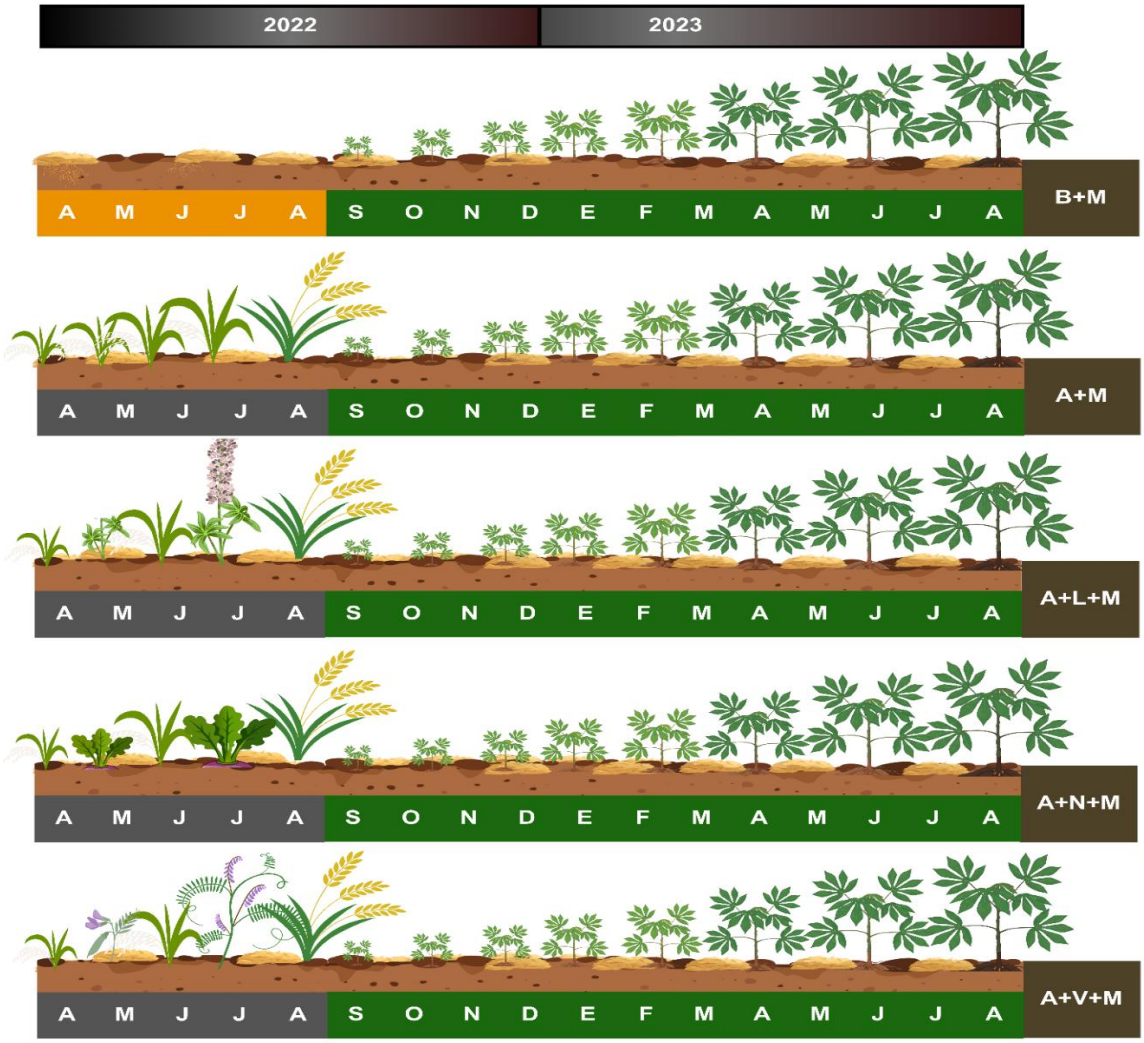


Figura 1. Esquema cronológico de los tratamientos experimentales con plantas de cobertura de invierno y del desarrollo del cultivo de mandioca durante 2022 y 2023. B+M: barbecho + mandioca; A+M: avena + mandioca; A+L+M: avena + lupino + mandioca; A+N+M: avena + nabo + mandioca; A+V+M: avena + vicia + mandioca.

(e-ISSN: 2805-6604; p-ISSN: 1900-0863)

Manejo agronómico de los ensayos

Las especies de cobertura fueron sembradas al voleo el 28 de abril de 2022, de forma simultánea en ambos sitios experimentales. La preparación previa del terreno consistió en la delimitación de las parcelas y dos pasadas de rastra niveladora para la incorporación superficial de las semillas. No se aplicó fertilización química a los abonos verdes, con el propósito de evaluar su desempeño bajo las condiciones de fertilidad natural del suelo.

El 14 de septiembre de 2022, aproximadamente cuatro meses y medio después de la siembra de los abonos verdes, se realizó el acamado mecánico mediante rolo cuchillo. Previo a la siembra de mandioca, se aplicó glifosato (4 L ha^{-1}) para la desecación de las coberturas, mientras que en el tratamiento testigo (B+M) se realizó una limpieza manual. Seguidamente, se estableció la mandioca (*Manihot esculenta* Crantz, cv. Cano Guazú) en siembra directa, con un espaciamiento de 1,0 m entre hileras y 0,70 m entre plantas, equivalente a una densidad aproximada de 14.300 plantas ha^{-1}, empleando estacas sanitizadas de 20 cm de longitud, sin fertilización mineral.

Durante el ciclo del cultivo, el control de malezas se efectuó mediante carpidas manuales según el grado de enmalezamiento. Para el control de la oruga de la mandioca (*Erinnyis ello*), se aplicó imidacloprid 35 % SC a razón de 30 mL por tanque de 20 L de agua (150 mL ha^{-1}, con un volumen de aplicación de 100 L ha^{-1}). La cosecha manual se realizó en agosto de 2023.

Muestreo y determinación de variables

Biomasa de las coberturas y vegetación del barbecho (septiembre de 2022): Previo al acamado mecánico, se evaluó la biomasa aérea tanto en los abonos verdes como en el tratamiento en barbecho, empleando la misma metodología. En cada parcela se recolectaron tres submuestras aleatorias de 0,25 m^2 (0,50 × 0,50 m), mediante un marco metálico. Se determinó la biomasa fresca mediante pesaje y, posteriormente, las muestras se secaron en estufa a 65 °C hasta alcanzar peso constante para obtener la biomasa seca. Los datos de las tres submuestras se promediaron por unidad experimental antes de someterlos al análisis de varianza (ANOVA), considerando cuatro repeticiones por tratamiento. Los resultados de biomasa fresca y seca se expresaron en kg ha^{-1}.

Variables productivas de la mandioca (agosto de 2023): En la parcela útil de 14,0 m^2 se cosecharon las plantas sobrevivientes de las 24 inicialmente establecidas, registrándose una pérdida promedio del 5 %. Las raíces se clasificaron en comerciales y no comerciales, de acuerdo con los siguientes criterios:

✓ **Raíces comerciales:** diámetro ≥ 3,5 cm y longitud ≥ 20 cm.

✓ **Raíces no comerciales:** diámetro < 3,5 cm o longitud < 20 cm.

Se determinó la longitud promedio (cm) de 10 raíces seleccionadas aleatoriamente de cada categoría por parcela. Ambas fracciones radiculares se pesaron por separado, en fresco, para determinar el peso de raíces comerciales, el peso de raíces no comerciales y el peso total de raíces por parcela.

El rendimiento de raíces comerciales, no comerciales y totales (kg ha^{-1}) se estimó a partir del peso promedio por planta cosechada y la densidad teórica de plantación (14.300 plantas ha^{-1}).

Análisis financiero y rentabilidad económica

La viabilidad económica se evaluó mediante un presupuesto parcial, considerando los costos totales, el ingreso bruto, el ingreso neto y la rentabilidad. Se estableció un costo básico común de G. 4.820.000 ha^{-1} (Tabla 2), correspondiente a las labores e insumos compartidos por todos los tratamientos. La preparación del suelo incluyó una aplicación general de herbicida desecante, una primera pasada de rastra, la siembra de abonos verdes y una segunda pasada de rastra para incorporar las semillas. El costo básico contempló, además, las estacas de mandioca, la plantación, el control de *Erinnyis ello* y la cosecha. Las aplicaciones adicionales de herbicida en los tratamientos con cobertura se contabilizaron exclusivamente en las Tablas 3 y 4. Los precios correspondieron al mercado local de agosto de 2023, excluyendo los costos de alquiler de tierra, maquinaria fija y transporte.

Al costo básico se adicionaron los costos variables específicos de cada tratamiento. En las estrategias con cobertura (A+M, A+L+M, A+N+M y A+V+M), se incluyeron los costos de las semillas de *Avena strigosa*, *Lupinus albus*, *Raphanus sativus* y *Vicia villosa*, según la composición de cada tratamiento, así como la siembra al voleo, el acamado mecánico con rolo cuchillo y el control manual de malezas. En el tratamiento testigo (B+M), se contabilizaron exclusivamente los jornales destinados a la carpida como costo variable.

Los requerimientos de carpida manual se consideraron como un supuesto de trabajo estandarizado dentro del presupuesto parcial, estableciendo 20 jornales ha^{-1} para los tratamientos con cobertura y 36 jornales ha^{-1} para el testigo, con base en el monitoreo del enmalezamiento. Todos los valores monetarios se expresaron en G. ha^{-1}, considerando los precios del mercado local correspondientes al periodo 2022–2023.

(e-ISSN: 2805-6604; p-ISSN: 1900-0863)

Tabla 2. Costo básico común por hectárea para la producción de mandioca, expresado en guaraníes. Caazapá, Paraguay, 2022–2023.

Descripción	Cantidad	Costo unitario (G)	Total (G)
Rama Semilla (Un)	3.000	400	1.200.000
Insecticida (L)	1	180.000	180.000
Rastreada A y D de siembra de abono verde (ha)	2	400.000	800.000
Desecante (L)	4	60.000	240.000
Plantacion de mandioca (Jornal)	10	100.000	1.000.000
Aplicación de insecticida (tanque)	8	25.000	200.000
Cosecha y embolsado (Jornal)	12	100.000	1.200.000
Costo Básico común			**4.820.000**

Fuente: Autores

El ingreso bruto (IB, en G · ha^{-1}) se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$IB = R \times P$$

donde R es el rendimiento total de raíces (kg · ha^{-1}) y P es el precio de venta de la mandioca, fijado en 800 G · kg^{-1}.

Asimismo, el ingreso neto (IN, en G · ha^{-1}) y la rentabilidad ($Rent$, en %) se calcularon como:

$$IN = IB - CT$$

$$Rent = \left(\frac{IN}{CT}\right) \times 100$$

donde CT corresponde a los costos totales de producción (G · ha^{-1}).

Análisis estadístico

Los datos de biomasa aérea verde y seca de las plantas de cobertura y de los parámetros productivos de la mandioca se analizaron separadamente para cada sitio, considerando como unidad de análisis la parcela experimental. La independencia de los errores se favoreció mediante la aleatorización propia del diseño de bloques completos al azar (DBCA). La normalidad y la homogeneidad de varianzas se verificaron en los residuos del modelo mediante las pruebas de Shapiro–Wilk y Levene, respectivamente; ante su incumplimiento, los datos se transformaron. Posteriormente, los datos se sometieron a análisis de varianza, considerando los tratamientos y los bloques como fuentes de variación. Cuando se detectaron efectos significativos de los tratamientos ($p < 0.05$), las medias se compararon mediante la prueba de Tukey al 5 % de probabilidad. Adicionalmente, se exploraron las relaciones entre la producción de biomasa aérea verde y seca de las plantas de cobertura y los parámetros productivos de la mandioca mediante el análisis de correlación de Pearson a nivel de parcela (n=20), incluyendo el tratamiento testigo con vegetación espontánea, evaluando estas asociaciones en términos no causales y considerando el posible efecto confusor del tratamiento. Todos los análisis estadísticos y la elaboración de las figuras se realizaron en el programa R, versión 4.3.1.

Resultados y discusión

Producción de biomasa de las plantas de cobertura

En los dos sitios de estudio, las estrategias de manejo con plantas de cobertura influyeron significativamente en la producción de biomasa fresca y seca ($p < 0{,}001$; Figura 2). En el Sitio 1, el consorcio A+N+M presentó las mayores producciones de biomasa fresca y seca, con 12.213 y 3.658 kg ha^{-1}, respectivamente, sin diferir estadísticamente de A+L+M, que alcanzó 11.104 y 3.405 kg ha^{-1}. Para ambas variables, A+N+M superó a A+M y A+V+M, mientras que A+L+M presentó un comportamiento intermedio. Todas las estrategias con plantas de cobertura produjeron más biomasa fresca y seca que B+M, cuyas medias fueron de 3.238 y 1.026 kg ha^{-1}, respectivamente. En términos relativos, A+N+M incrementó la biomasa fresca en un 277 % y la biomasa seca en un 256 % respecto de B+M.

En el Sitio 2, la mayor producción de biomasa fresca se obtuvo con A+L+M (17.267 kg ha^{-1}), sin diferir estadísticamente de A+N+M y A+V+M, que alcanzaron 16.147 y 13.253 kg ha^{-1}, respectivamente. A+L+M superó a A+M, que produjo 12.360 kg ha^{-1}, mientras que todas las estrategias con cobertura fueron superiores a B+M, con 4.750 kg ha^{-1}. Para la biomasa seca, A+M, A+L+M, A+N+M y A+V+M no difirieron entre sí, con medias de 5.104, 5.471, 4.475 y 4.901 kg ha^{-1}, respectivamente; todas superaron a B+M, que produjo 2.183 kg ha^{-1}.

(e-ISSN: 2805-6604; p-ISSN: 1900-0863)

La mayor acumulación de biomasa observada en los consorcios estudiados podría reflejar la complementariedad entre las plantas de cobertura (Watthier et al., 2023; Silva et al., 2021). En suelos de textura liviana, como los franco-arenosos de Caazapá, el sistema radicular de la avena negra podría contribuir a la exploración de la capa superficial y a la estabilidad de los agregados, mientras que las especies de raíz pivotante, como el nabo forrajero, podrían favorecer la infiltración del agua y la exploración de nutrientes en profundidad (Silva et al., 2023; Bueno y Rodrigues, 2019).

Si bien la fijación biológica de nitrógeno, la solubilización de fósforo y la calidad del rastrojo no fueron evaluadas directamente en este estudio, la inclusión de leguminosas como el lupino blanco y la vicia podría contribuir al aporte de nitrógeno al sistema mediante la fijación biológica y favorecer la disponibilidad de fósforo inorgánico a través de la exudación de ácidos orgánicos en la rizosfera (Mercante et al., 2023; Silva et al., 2023; Fonseca, 2017).

Asimismo, la correlación positiva observada entre la biomasa de las coberturas y la productividad de la mandioca (Figura 6) sugiere que una mayor cantidad de rastrojo podría asociarse con mejores condiciones para el desarrollo del cultivo, aunque esta relación no demuestra por sí sola un efecto causal (Chavez et al., 2022; Silva et al., 2021).

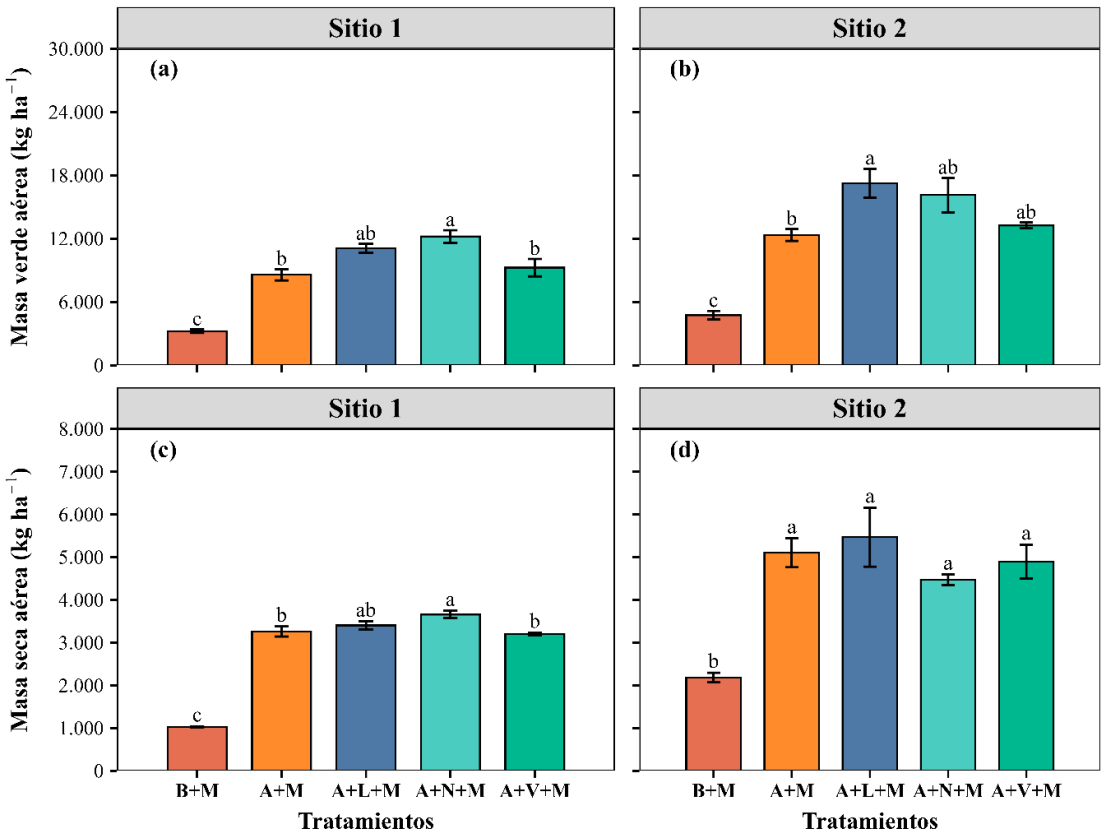


Figura 2. Producción de masa verde aérea (a, b) y masa seca aérea (c, d) de las plantas de cobertura de invierno bajo diferentes estrategias de manejo en los sitios 1 y 2. Las barras representan las medias ± error estándar. Medias seguidas por letras diferentes difieren entre tratamientos dentro de cada sitio según la prueba de Tukey al 5 % de probabilidad. B+M: barbecho + mandioca; A+M: avena + mandioca; A+L+M: avena + lupino + mandioca; A+N+M: avena + nabo + mandioca; A+V+M: avena + vicia + mandioca.

Parámetros productivos de la mandioca

Las plantas de cobertura de invierno no influyeron significativamente en la longitud de las raíces comerciales ni de las no comerciales de la mandioca en ninguno de los sitios evaluados ($p > 0,05$; Figura 3).

La longitud de las raíces comerciales se mantuvo entre 28 y 29 cm, mientras que la de las raíces no comerciales varió aproximadamente entre 16,5 y 18 cm, independientemente del tratamiento.

Estos resultados indican que las estrategias de manejo evaluadas no modificaron significativamente el crecimiento

(e-ISSN: 2805-6604; p-ISSN: 1900-0863)

longitudinal de las raíces tuberosas de la variedad 'Cano Guazú' durante el periodo de evaluación, lo que sugiere que esta característica podría estar influenciada principalmente por factores genéticos propios de la variedad (Caballero-Mendoza et al., 2019).

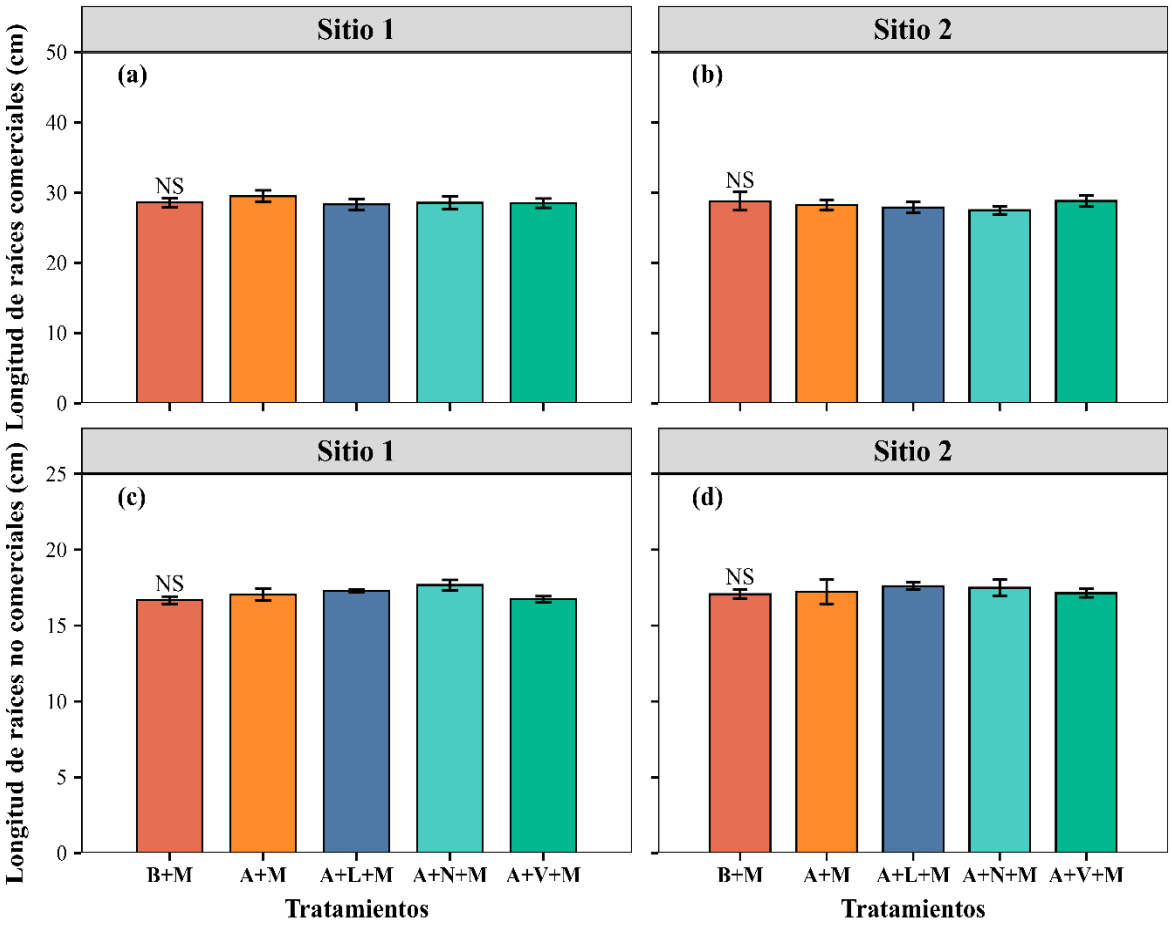


Figura 3. Longitud de raíces comerciales (a, b) y no comerciales (c, d) de la mandioca bajo diferentes estrategias de manejo con plantas de cobertura de invierno en los sitios 1 y 2. Las barras representan las medias ± error estándar. NS: efecto no significativo de los tratamientos según el análisis de varianza ($p > 0,05$). B+M: barbecho + mandioca; A+M: avena + mandioca; A+L+M: avena + lupino + mandioca; A+N+M: avena + nabo + mandioca; A+V+M: avena + vicia + mandioca.

Las estrategias de manejo con plantas de cobertura influyeron significativamente en el peso de las raíces comerciales en ambos sitios (Figura 4). En el Sitio 1 ($p < 0,001$), A+M, A+L+M, A+N+M y A+V+M alcanzaron 12.750,0; 13.089,3; 12.525,8 y 12.610,8 kg ha^{-1}, respectivamente, superando a B+M (11.163,8 kg ha^{-1}), sin diferencias significativas entre las estrategias con cobertura.

Estos incrementos oscilaron entre el 12,2 y el 17,2 % respecto del testigo. En el Sitio 2 ($p = 0,024$), A+V+M presentó el mayor peso de raíces comerciales (13.940,8 kg ha^{-1}), superando en un 14,8 % a B+M (12.139,6 kg ha^{-1}). Los demás tratamientos con cobertura presentaron valores intermedios, sin diferir estadísticamente de ambos tratamientos.

El peso de las raíces no comerciales no fue influido significativamente por los tratamientos en el Sitio 1 ($p = 0,635$). Sin embargo, en el Sitio 2 ($p = 0,019$), A+M alcanzó el mayor valor (5.591,8 kg ha^{-1}), superando en un 22,0 % a B+M (4.582,1 kg ha^{-1}). Los tratamientos A+L+M, A+N+M y A+V+M presentaron valores intermedios, sin diferencias significativas respecto de los demás tratamientos.

La ausencia de diferencias en la longitud de las raíces, junto con el incremento del peso de las raíces comerciales, sugiere

(e-ISSN: 2805-6604; p-ISSN: 1900-0863)

que las plantas de cobertura favorecieron principalmente la acumulación de masa en las raíces tuberosas, sin modificar significativamente su longitud. Esta respuesta podría estar relacionada con las características de la variedad 'Cano Guazú', que presenta un ciclo fenológico de medio a largo (IPTA, 2026; Caballero-Mendoza et al., 2019), y con las condiciones de crecimiento proporcionadas por los residuos de las plantas de cobertura.

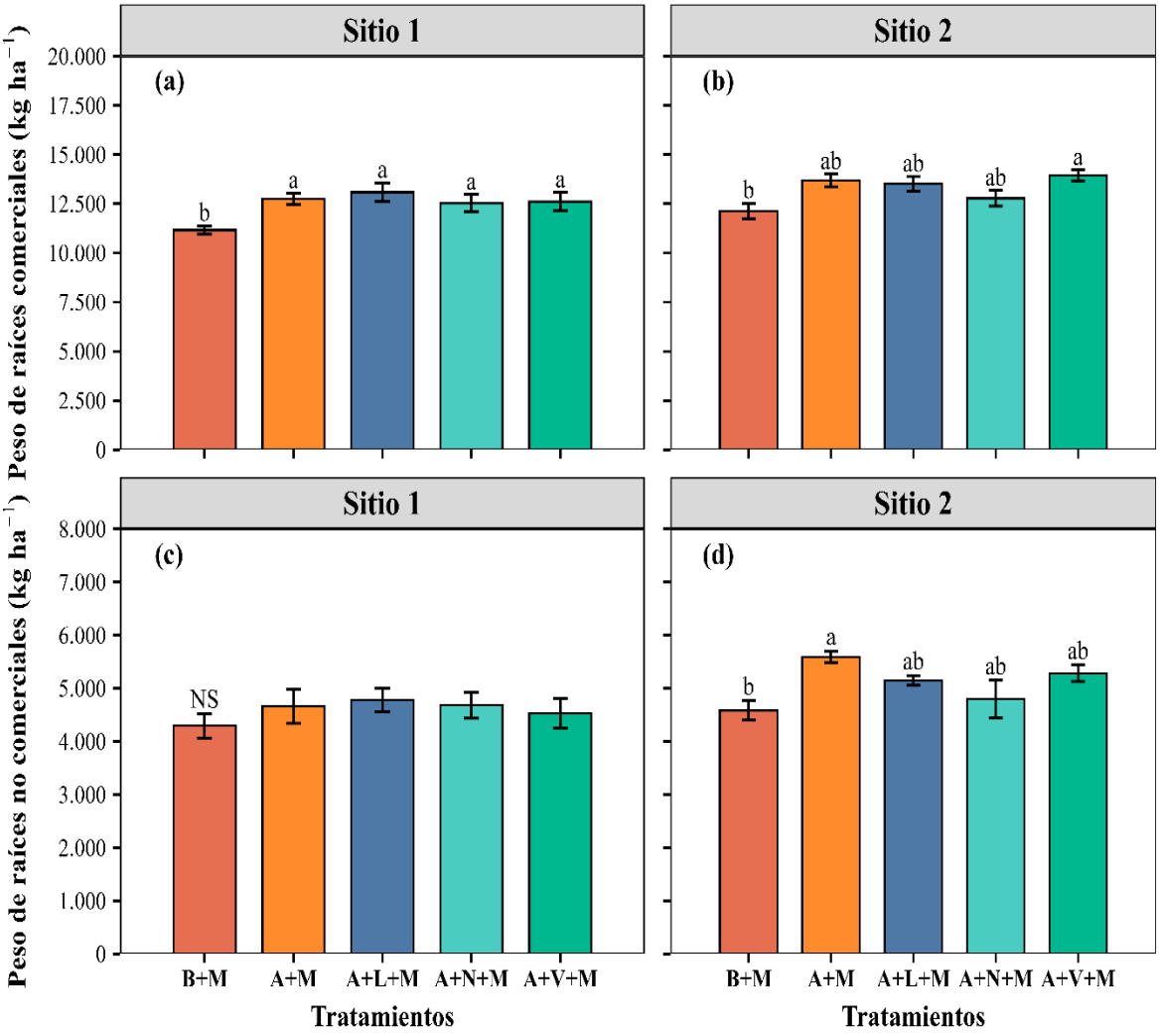


Figura 4. Peso de raíces comerciales (a, b) y no comerciales (c, d) de la mandioca bajo diferentes estrategias de manejo con plantas de cobertura de invierno en los sitios 1 y 2. Las barras representan las medias ± error estándar. Medias seguidas por letras diferentes difieren entre tratamientos dentro de cada sitio según la prueba de Tukey al 5 % de probabilidad. NS: efecto no significativo de los tratamientos ($p > 0,05$). B+M: barbecho + mandioca; A+M: avena + mandioca; A+L+M: avena + lupino + mandioca; A+N+M: avena + nabo + mandioca; A+V+M: avena + vicia + mandioca. Fuente: Autores.

El rendimiento total de la mandioca presentó diferencias significativas entre tratamientos en ambos sitios (Figura 5). En el Sitio 1 ($p = 0,007$), A+L+M alcanzó el mayor rendimiento (17.873,3 kg ha^{-1}), sin diferir estadísticamente de A+M y A+N+M, que produjeron 17.410,0 y 17.207,5 kg ha^{-1}, respectivamente. Estas tres estrategias superaron a B+M (15.458,8 kg ha^{-1}), con incrementos del 15,6; 12,6 y 11,3 %, respectivamente. A+V+M presentó un comportamiento intermedio, sin diferir estadísticamente de los demás tratamientos. En el Sitio 2 ($p = 0,011$), A+M y A+V+M alcanzaron los mayores rendimientos, con 19.256,3 y 19.223,3 kg ha^{-1}, respectivamente, superando

(e-ISSN: 2805-6604; p-ISSN: 1900-0863)

a B+M (16.721,7 kg ha^{-1}) en un 15,2 y 15,0 %. Los tratamientos A+L+M y A+N+M presentaron valores intermedios, sin diferir estadísticamente de los tratamientos de mayor rendimiento ni del testigo.

Los mayores rendimientos observados bajo determinadas estrategias con plantas de cobertura podrían estar relacionados con la protección de la capa superficial del suelo contra la erosión hídrica y el reciclaje de nutrientes durante la descomposición de los residuos vegetales (Villalba Algarin et al., 2025; Moraes et al., 2016; Silva et al., 2023). Asimismo, la capa de rastrojo puede amortiguar las fluctuaciones térmicas y reducir la evaporación directa del agua en suelos franco-arenosos (Souza et al., 2023; Monquero y Hirata, 2023). Estas condiciones podrían favorecer la disponibilidad hídrica durante los periodos de mayor demanda evapotranspiratoria, reduciendo el estrés hídrico y favoreciendo la actividad fotosintética y la translocación de fotoasimilados hacia las raíces de reserva (Fageria, 2007; Ma et al., 2021).

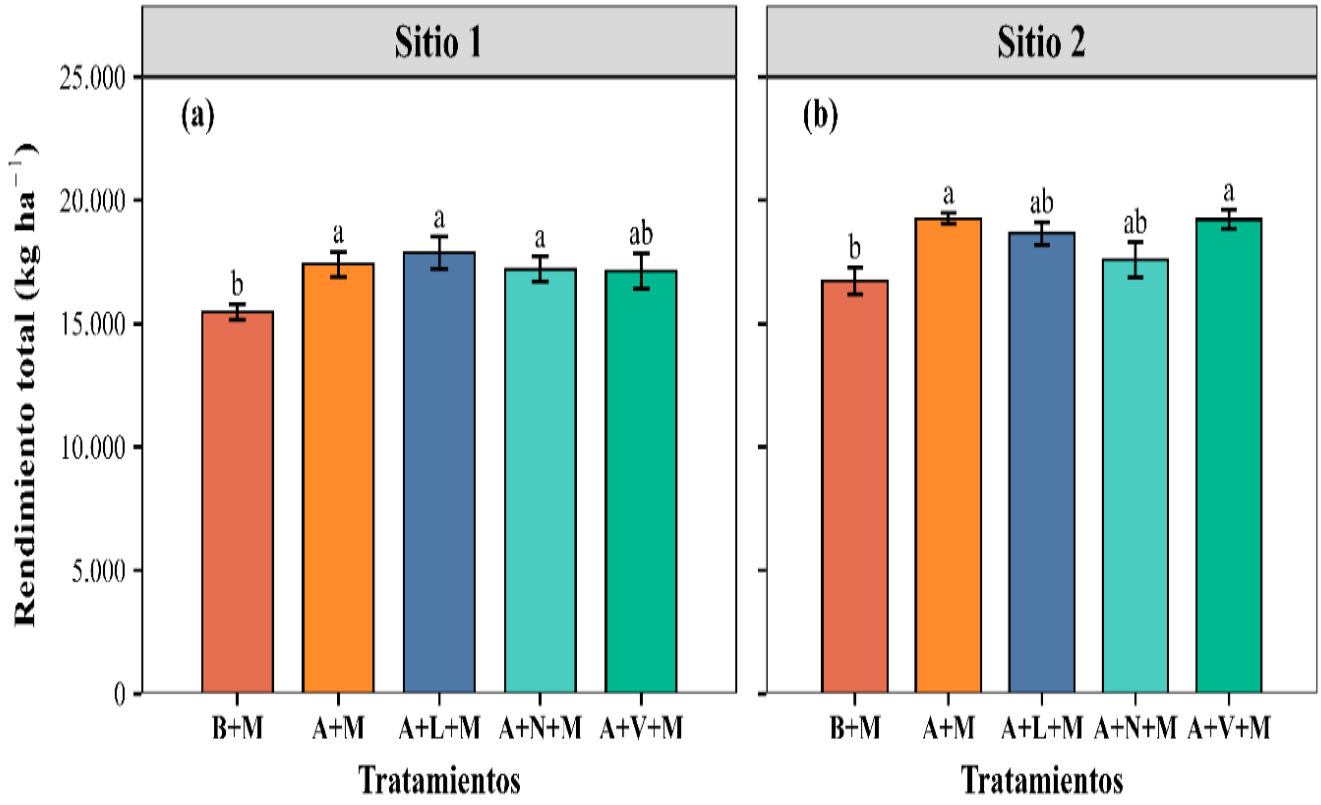


Figura 5. Rendimiento total de la mandioca bajo diferentes estrategias de manejo con plantas de cobertura de invierno en los sitios 1 (a) y 2 (b). Las barras representan las medias ± error estándar. Medias seguidas por letras diferentes difieren entre tratamientos dentro de cada sitio según la prueba de Tukey al 5 % de probabilidad. B+M: barbecho + mandioca; A+M: avena + mandioca; A+L+M: avena + lupino + mandioca; A+N+M: avena + nabo + mandioca; A+V+M: avena + vicia + mandioca. Fuente: Autores.

Relaciones entre la biomasa de las plantas de cobertura y las variables productivas de la mandioca

En el Sitio 1, la biomasa fresca aérea de las plantas de cobertura se correlacionó positivamente con la longitud de las raíces no comerciales ($r = 0,53$; $p < 0,05$), el peso de las raíces comerciales ($r = 0,65$; $p < 0,01$) y el rendimiento total de la mandioca ($r = 0,63$; $p < 0,01$; Figura 6). Asimismo, la biomasa seca aérea presentó correlaciones positivas con el peso de las raíces comerciales ($r = 0,64$; $p < 0,01$) y el rendimiento total ($r = 0,61$; $p < 0,01$). No se observaron correlaciones significativas con las demás variables evaluadas.

(e-ISSN: 2805-6604; p-ISSN: 1900-0863)

En el Sitio 2, la biomasa fresca aérea se correlacionó positivamente únicamente con el peso de las raíces comerciales (r = 0,46; p < 0,05). Por su parte, la biomasa seca aérea presentó correlaciones positivas con el peso de las raíces comerciales (r = 0,57; p < 0,01), el peso de las raíces no comerciales (r = 0,49; p < 0,05) y el rendimiento total (r = 0,58; p < 0,01). En ninguno de los sitios se observaron correlaciones significativas entre la biomasa aérea y la longitud de las raíces comerciales.

Estas relaciones sugieren que una mayor producción de biomasa aérea podría estar asociada con mejores condiciones para el desarrollo y la productividad de la mandioca, especialmente en términos de acumulación de masa en las raíces tuberosas. Sin embargo, las correlaciones observadas no demuestran por sí solas una relación causal entre la producción de biomasa y el rendimiento del cultivo (Chavez et al., 2022; Silva et al., 2021).

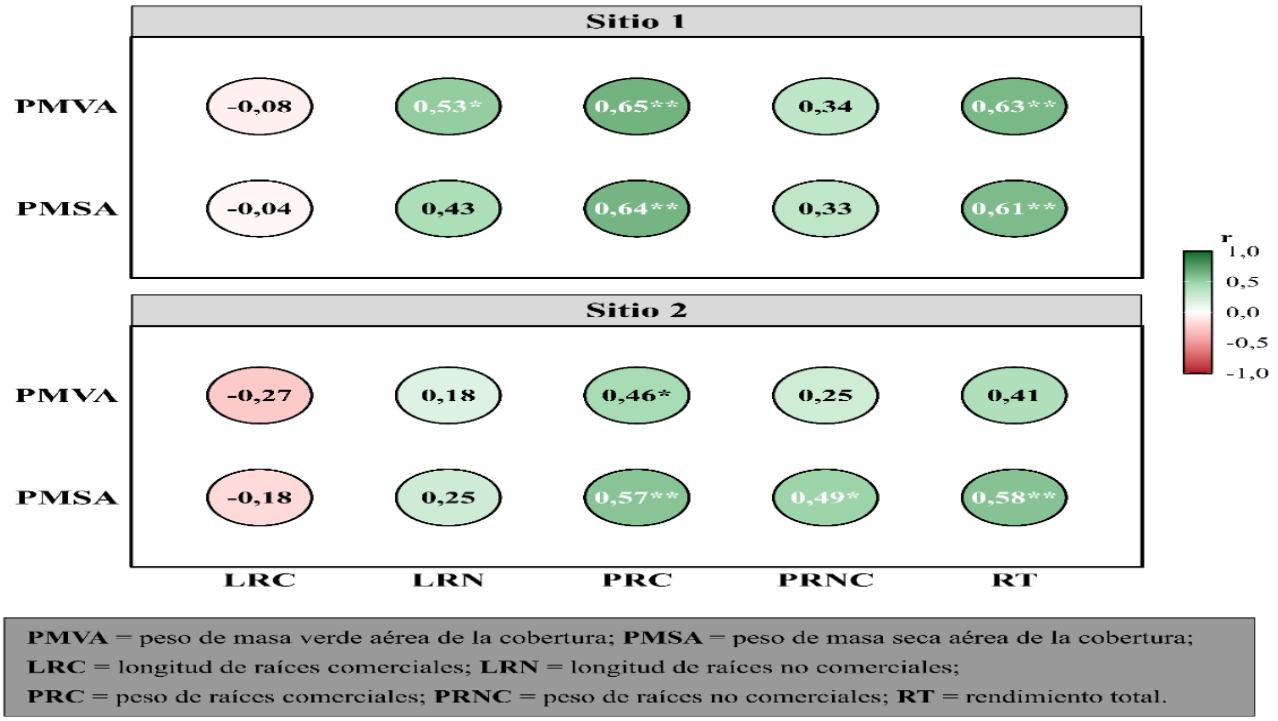


Figura 6. Correlaciones de Pearson entre la biomasa aérea de las plantas de cobertura y los parámetros productivos de la mandioca en los sitios 1 y 2. El color y el tamaño de los círculos representan la dirección y la magnitud del coeficiente de correlación (r), respectivamente. * y ** indican correlaciones significativas a p < 0,05 y p < 0,01, respectivamente. Fuente: Autores.

Análisis financiero del sistema de manejo

El análisis financiero evidenció que la utilización de plantas de cobertura de invierno incrementó la rentabilidad del cultivo de mandioca frente al testigo convencional en ambos sitios experimentales, aunque con diferencias entre localidades (Tablas 3 y 4). En el Sitio 1 (FCA-UNA), el tratamiento testigo (B+M) presentó el mayor costo total de producción (G. 8.420.000 ha^{-1}), debido principalmente a la mayor demanda de mano de obra para el control manual de malezas (36 jornales ha^{-1}). En contraste, las estrategias con plantas de cobertura requirieron 20 jornales ha^{-1} para las carpidas, lo que permitió compensar parcialmente los costos de adquisición de semillas, siembra y acamado mecánico con rolo cuchillo. Los costos totales de estas estrategias oscilaron entre G. 8.040.000 y G. 8.355.000 ha^{-1}.

En este sitio, A+L+M presentó el mayor ingreso bruto (G. 15.098.400 ha^{-1}), ingreso neto (G. 6.743.400 ha^{-1}) y rentabilidad económica (80,71 %). Por el contrario, B+M registró el menor ingreso neto (G. 3.947.200 ha^{-1}) y la menor rentabilidad (46,88 %). Estos resultados muestran que la reducción de los costos asociados al control manual de malezas, junto con el incremento del rendimiento, contribuyó a mejorar el resultado económico de las estrategias con cobertura.

(e-ISSN: 2805-6604; p-ISSN: 1900-0863)

Tabla 3. Costos de producción, ingresos y rentabilidad económica del cultivo de mandioca establecido sobre coberturas de abonos verdes de invierno en el Sitio 1. Caazapá, Paraguay, 2022–2023.

Descripción	Costo unitario (G)	B+M	A+M	A+L+M	A+N+M	A+V+M
Herbicida (L)	60000		4	4	4	4
Aplicación de herbicida (tanque)	25000		8	8	8	8
Carpida (jornal)	100000	36	20	20	20	20
Siembra de abonos verdes (Jornal)	100000		3	3	3	3
Semilla de avena negra (kg)	3500		80	80	80	80
Semilla de lupino blanco (kg)	4500		0	70		
Semilla de nabo forrajero (kg)	15000		0		20	
Semilla de vicia villosa (kg)	4000		0			40
Rolado de la parcela (ha)	200000		1	1	1	1
Costo Básico (G ha⁻¹)		4.820.000	4.820.000	4.820.000	4.820.000	4.820.000
COSTO TOTAL (G ha⁻¹)		8.420.000	8.040.000	8.355.000	8.340.000	8.200.000
Rendimiento (kg ha⁻¹)		15.459	17.410	18.873	17.208	17.141
Ingreso Bruto (G ha⁻¹)*		12.367.200	13.928.000	15.098.400	13.766.400	13.712.800
Ingreso Neto (G ha⁻¹)		3.947.200	5.888.000	6.743.400	5.426.400	5.512.800
Rentabilidad (%)		46,88	73,23	80,71	65,06	67,23

* Precio de venta del producto: 800 G kg⁻¹. Fuente: Autores.

(e-ISSN: 2805-6604; p-ISSN: 1900-0863)

Tabla 4. Costos de producción, ingresos y rentabilidad económica del cultivo de mandioca establecido sobre coberturas de abonos verdes de invierno en el Sitio 2. Caazapá, Paraguay, 2022–2023.

Descripción	Costo unitario (G)	B+M	A+M	A+L+M	A+N+M	A+V+M
Herbicida (L)	60000		4	4	4	4
Aplicación de herbicida (tanque)	25000		8	8	8	8
Carpida (jornal)	100000	36	20	20	20	20
Siembra de abonos verdes (Jornal)	100000		3	3	3	3
Semilla de avena negra (kg)	3500		80	80	80	80
Semilla de lupino blanco (kg)	4500		0	70		
Semilla de nabo forrajero (kg)	15000		0		20	
Semilla de vicia villosa (kg)	4000		0			40
Rolado de la parcela (ha)	200000		1	1	1	1
Costo Básico		4.820.000	4.820.000	4.820.000	4.820.000	4.820.000
COSTO TOTAL (G ha⁻¹)		8.420.0(	8.040.0(	8.355.0(	8.340.0(	8.200.0(
Rendimiento (kg ha⁻¹)		16.722	19.256	18.664	17.578	19.223
Ingreso Bruto (G ha⁻¹)*		13.377.600	15.404.800	14.931.200	14.062.400	15.378.400
Ingreso Neto (G ha⁻¹)		4.957.600	7.364.800	6.576.200	5.722.400	7.178.400
Rentabilidad (%)		58,88	91,60	78,71	68,61	87,54

* Precio de venta del producto: 800 G kg⁻¹.

En el Sitio 2 (Finca San Antonio), se observó una respuesta económica similar, aunque con mayores rendimientos e ingresos netos. A+M alcanzó el mayor rendimiento total (19.256 kg ha⁻¹), seguido de A+V+M (19.223 kg ha⁻¹), A+L+M (18.664 kg ha⁻¹) y A+N+M (17.578 kg ha⁻¹), todos con valores numéricamente superiores al testigo B+M (16.722 kg ha⁻¹).

En consecuencia, A+M generó el mayor ingreso bruto (G. 15.404.800 ha⁻¹), ingreso neto (G. 7.364.800 ha⁻¹) y rentabilidad económica (91,60 %), seguido de A+V+M (87,54 %), A+L+M (78,71 %) y A+N+M (68,61 %). El testigo presentó la menor rentabilidad (58,88 %).

La comparación entre localidades muestra que la inclusión de abonos verdes mejoró la rentabilidad del cultivo frente al manejo convencional, aunque la eficiencia económica de cada estrategia dependió del sitio. En el Sitio 1, A+L+M fue la alternativa más rentable, mientras que en el Sitio 2 destacaron A+M y A+V+M. Estas diferencias podrían estar relacionadas con las condiciones edafoclimáticas locales y su influencia sobre el crecimiento de las coberturas, la descomposición de

(e-ISSN: 2805-6604; p-ISSN: 1900-0863)

los residuos y la disponibilidad de nutrientes (Wutke et al., 2023; Silva et al., 2023).

Desde una perspectiva económica y agronómica, la ventaja financiera de las plantas de cobertura puede relacionarse con la reducción de labores operativas y los servicios ecosistémicos proporcionados por el rastrojo (Monquero y Hirata, 2023). Los residuos vegetales pueden contribuir a la supresión de malezas mediante el bloqueo físico de la radiación y la liberación de metabolitos durante la descomposición de determinadas especies (Vasilakoglou et al., 2006; Wutke et al., 2023; Araújo et al., 2015). En este estudio, la menor cantidad de jornales considerada para las carpidas en los tratamientos con cobertura representó el principal factor de ahorro y permitió compensar los costos adicionales de establecimiento y manejo de los abonos verdes (Lima Filho et al., 2023).

En conjunto, los resultados indican que las coberturas de invierno constituyeron una alternativa agronómica y financieramente favorable para la producción de mandioca en las condiciones evaluadas. No obstante, la selección de las especies o mezclas debe considerar las características de cada sitio, debido a las diferencias observadas en la respuesta productiva y económica (Silva et al., 2021; Wutke et al., 2023).

Conclusiones

La integración de plantas de cobertura de invierno, puras o consorciadas bajo siembra directa, constituye una estrategia agronómica y económicamente viable para la producción de mandioca en suelos franco-arenosos de Caazapá. Frente al barbecho tradicional, el manejo con abonos verdes incrementa la biomasa acumulada y tiende a aumentar el rendimiento de raíces comerciales, aunque esta última respuesta varía según el sitio experimental y el tratamiento.

La elección de la cobertura debe adaptarse a las condiciones de cada sitio. En esta investigación (campaña 2022–2023), la combinación de avena negra con lupino blanco presenta el mejor desempeño en el Sitio 1 (FCA-UNA), mientras que la avena sola o consorciada con vicia muestra los mejores resultados productivos y de rentabilidad en la Finca San Antonio (Sitio 2). La relación positiva entre la biomasa de la cobertura y el rendimiento sugiere que mantener una cobertura abundante del suelo contribuye a la productividad y rentabilidad económica de estos agrosistemas.

Agradecimientos

A los estudiantes de la Facultad de Ciencias Agrarias (UNA, Filial Caazapá) por su valioso apoyo durante las labores de campo y al laboratorio de Suelos de la institución por la asistencia analítica.

Fuentes de financiamiento: Investigación financiada por la Universidad Nacional de Asunción a través del proyecto “Mejoramiento de la productividad de mandioca con subsolado y uso de abonos verdes de invierno” (aprobado por Res. N° 364-00-2022 del Acta N° 11 de fecha 27/05/2022) y el cofinanciamiento del productor de General Higinio Morínigo.

Disponibilidad de datos: Los conjuntos de datos generados y analizados durante el presente estudio están disponibles a solicitud del autor de correspondencia.

Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener conflictos de interés comercial ni institucional.

Referencias

Albuquerque, J. A., Sediyama, T., Silva, A. A., Carneiro, J. E. S., Cecon, P. R., & Alves, J. M. A. (2012). Interferência de plantas daninhas sobre a produtividade e a qualidade de mandioca. *Planta Daninha, 30*(1), 91–99. https://doi.org/10.1590/S0100-83582008000200004

Araújo, L. D. S., Cunha, P. C. R. D., Silveira, P. M. D., Sousa, M. D., & Oliveira, F. C. D. (2015). Potencial de cobertura do solo e supressão de tiririca (*Cyperus rotundus*) por resíduos culturais de plantas de cobertura. *Revista Ceres, 62*(5), 483–488. https://doi.org/10.1590/0034-737X201562050009

Bueno, J. B., & Rodrigues, G. A. (2019). Palha sobre o solo no crescimento da cultura do nabo forrageiro em área degradada. *Revista Interface Tecnológica, 16*(1), 370–377. https://doi.org/10.31510/infa.v16i1.548

Caballero-Mendoza, C. A., Enciso-Garay, C. R., Tullo-Arguello, C. C., & González-Villalba, J. D. (2019). *Guía técnica cultivo de mandioca*. https://www.agr.una.py/ebooks/index.php/edifca/catalog/book/28

Calegari, A., Tiecher, T., Hargrove, W. L., Ralisch, R., Tessier, D., de Tourdonnet, S., Guimarães, M. F., & Rheinheimer dos Santos, D. (2013). Long-term effect of different soil management systems and winter crops on soil acidity and vertical distribution of nutrients in a Brazilian Oxisol. *Soil and Tillage Research, 133*, 32–39. https://doi.org/10.1016/j.still.2013.05.009

Chavez, R. N. V., Monzón, M. Á. B., Paiva, M. A. P., & Romero, M. G. C. (2022). Efectos de plantas de cobertura sobre la producción de la mandioca en plantío directo. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 6*(1), 2374–2388. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i1.1655

Fageria, N. K. (2007). Green manuring in crop production. *Journal of Plant Nutrition, 30*(5), 691–719. https://doi.org/10.1080/01904160701289529

(e-ISSN: 2805-6604; p-ISSN: 1900-0863)

Fonseca, J. S. (2017). *Plantas de cobertura e sua influência nas propriedades físicas do solo e no rendimento de culturas estivais*. https://repositorio.unipampa.edu.br/bitstreams/b35898b7-331f-4d03-8d19-8123e7ca6150/download

Franco, M. F. S., & Delgado, E. U. A. (2022). Relação entre adubação e qualidade dos produtos agrícolas. *Research, Society and Development, 11*(4), e36311427562. https://doi.org/10.33448/rsd-v11i4.27562

Howeler, R. H. (2014). *Sustainable soil management for cassava: Mitigation of soil degradation in cassava production systems in Asia* (Publicación n.º 388). Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). https://hdl.handle.net/10568/51590

Instituto Paraguayo de Tecnología Agraria. (2026). *Manual de mandioca*. Centro de Investigación IPTA Choré. https://www.ipta.gov.py/manual-de-mandioca/

Jančaitienė, K., Pocienė, O., & Šlinkšienė, R. (2025). The role of lupins and buckwheat in sustainable agriculture, nutrition, and the circular economy. *Sustainability*, 17(22), 10061. https://doi.org/10.3390/su172210061

Kumar, R., Mahajan, G., Srivastava, S., & Sinha, A. (2014). Green manuring: A boon for sustainable agriculture and pest management - A review. *Agricultural Reviews, 35*(3), 196–206. http://dx.doi.org/10.5958/0976-0741.2014.00906.4

Lima Filho, O. F. de, Ambrosano, E. J., Wutke, E. B., Rossi, F., & Carlos, J. A. D. (Eds.). (2023). *Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil: Fundamentos e prática* (2.ª ed., Vol. 1). Embrapa. https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1153221

López Gorostiaga, O. E. (2024). *Grandes grupos de suelos de la región oriental del Paraguay* (J. Á. Lesme Brun, Comp.; 1.ª ed.). José Ángel Lesme Brun. https://isbn.bibliotecanacional.gov.py/catalogo.php?mode=detalle&nt=17284

Lyu, H., Li, Y., Wang, Y., Wang, P., Shang, Y., Yang, X., … Yu, A. (2024). Drive soil nitrogen transformation and improve crop nitrogen absorption and utilization—a review of green manure applications. Frontiers in Plant Science, 14, 1305600. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1305600

Ma, D., Yin, L., Ju, W., Li, X., Liu, X., Deng, X., & Wang, S. (2021). Meta-analysis of green manure effects on soil properties and crop yield in northern China. *Field Crops Research, 266*, 108146. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108146

Mercante, F. M., Hungria, M., Mendes, I. de C., Reis Júnior, F. B. dos, & Andrade, D. S. (2023). Fixação biológica de nitrogênio em adubos verdes. En O. F. de Lima Filho, E. J. Ambrosano, E. B. Wutke, F. Rossi, & J. A. D. Carlos (Eds.), *Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil: Fundamentos e prática* (2.ª ed., Vol. 1, pp. 327–355). Embrapa. https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1161220#:~:text=http%3A//www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1161220

Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2022). *Síntesis estadística de la producción agropecuaria 2021–2022*. Dirección de Censos y Estadísticas Agropecuarias. https://www.datos.gov.py/dataset/censo-agropecuario-nacional-can-2022

Monquero, P. A., & Hirata, A. C. S. (2014). Manejo de plantas daninhas com adubação verde. En O. F. de Lima Filho, E. J. Ambrosano, F. Rossi, & J. A. D. Carlos (Eds.), *Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil: Fundamentos e prática* (1.ª ed., Vol. 1, pp. 481–500). Embrapa. https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1161220#:~:text=http%3A//www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1161220

Moraes, M. T., Debiasi, H., Franchin, J. C., & da Silva, V. R. (2016). Benefícios das plantas de cobertura sobre as propriedades físicas do solo. En *Práticas alternativas de manejo visando a conservação do solo e da água* (pp. 34–48). http://hdl.handle.net/10183/149123

Nunes, M. R., van Es, H. M., Schindelbeck, R., Ristow, A. J., & Ryan, M. (2018). No-till and cropping system diversification improve soil health and crop yield. *Geoderma, 328*, 30–43. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.04.031

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2018). *Save and grow: Cassava. A guide to sustainable production intensification*. FAO. https://www.fao.org/agriculture/crops/publicaciones/detail/es/item/276079/icode/6/?no_cache=1

Ortigoza Guerreño, J., Torres Ferreira, A. M., Alonso Giménez, B. B., Báez Arzamendia, M. E., Villalba Algarin, C. A., & Sanabria Franco, M. F. (2026). Plantas de cobertura en sistemas de agricultura familiar: Evidencias experimentales iniciales sobre las propiedades del suelo y los rendimientos de los cultivos en Paraguay. *Revista de la Sociedad Científica del Paraguay, 31*, 204. https://doi.org/10.32480/rscp.2026.e3108

Perin, A., Santos, R. H. S., Urquiaga, S. S., Cecon, P. R., Guerra, J. G. M., & Freitas, M. S. M. (2004). Produção de fitamassa, acúmulo de nutrientes e fixação biológica de nitrogênio por adubos verdes solteiros e consorciados. *Pesquisa Agropecuária Brasileira, 39*(1), 35–40. https://doi.org/10.1590/S0100-204X2004000100005

Sanzonowicz, C. (2010). *Solos do cerrado*. Embrapa. http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia16/AG01/arvore/AG01_14_911200585231.html

Silva, E. C. D., Ambrosano, E. J., Scivittaro, W. B., Muraoka, T., Buzetti, S., & Carvalho, A. D. (2023). Adubação verde

(e-ISSN: 2805-6604; p-ISSN: 1900-0863)

como fonte de nutrientes às culturas. En *Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil: Fundamentos e prática*. Embrapa. https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1153241/1/ADUBACAO-VERDE-VOL-01-ed02-2023.pdf

Silva, M. A., Nascente, A. S., de Mello Frasca, L. L., Rezende, C. C., Ferreira, E. A. S., de Filippi, M. C. C., & Lacerda, M. C. (2021). Plantas de cobertura isoladas e em mix para a melhoria da qualidade do solo e das culturas comerciais no Cerrado. *Research, Society and Development, 10*(12), e11101220008. https://doi.org/10.33448/rsd-v10i12.20008

Souza, L. S., Ambrosano, E. J., Rossi, F., & Carlos, J. A. D. (2023). Adubação verde na física do solo. En O. F. de Lima Filho, E. J. Ambrosano, F. Rossi, & J. A. D. Carlos (Eds.), *Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil: Fundamentos e prática* (1.ª ed., Vol. 1, pp. 364–369). Embrapa. https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1153241/1/ADUBACAO-VERDE-VOL-01-ed02-2023.pdf

Vasilakoglou, I., Dhima, K., Eleftherohorinos, I., & Lithourgidis, A. (2006). Winter cereal cover crop mulches and inter-row cultivation effects on cotton development and grass weed suppression. *Agronomy Journal*, *98*(5), 1290–1297. https://doi.org/10.2134/agronj2006.0002

Villalba Algarin, C. A. V., Sanabria Franco, M. F. S., Mernes, F. V., & Saldivar, M. M. B. (2026). Efectos del uso de la tierra en los micronutrientes del suelo: evidencias de 30 años de manejo en agricultura familiar paraguaya. *Revista de la Sociedad Científica del Paraguay*, 31, 1–10. https://doi.org/10.32480/rscp.2026.e3126

Villalba Algarin, C. A. V., Thiengo, C. C., Cherubin, M. R., Bieluczyk, W., Mariano, E., Amorim, D. J., … & Lavres, J. (2025). 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 Advances*, 100084. https://doi.org/10.1016/j.soilad.2025.100084

Villalba Algarin, C. A., González, A. C., Szostak, J. E., & Sanabria Franco, M. F. (2024). 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. *Investigación Agraria*, *26*(2), 111–124. https://doi.org/10.18004/investig.agrar.2024.diciembre.2602806

Villalba Algarin, C. A., Sanabria Franco, M. F., González, A. C., & Lavres, J. (2026). Legacy effects of 32 years of tillage and crop diversification on soil biological activity in Paraguay. *Soil Systems*, *10*(6), 66. https://www.mdpi.com/2571-8789/10/6/66#

Watthier, M., Peralta-Antonio, N., Soares, M. C., & Santos, R. H. S. (2023). The mixture of legumes and gramineous as green manure and its effect on nutrient efficiency and soil solution characteristics in three successive crops. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *23*(4), 5798–5809. https://doi.org/10.1007/s42729-023-01440-y

Wutke, E. B., Calegari, A., & Wildner, L. D. P. (2023). Espécies de adubos verdes e plantas de cobertura e recomendações para seu uso. En *Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil: Fundamentos e prática* (pp. 59–167). Embrapa. https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1153241/1/ADUBACAO-VERDE-VOL-01-ed02-2023.pdf

Yang, R., Song, S., Chen, S., Du, Z., & Kong, J. (2023). Adaptive evaluation of green manure rotation for a low fertility farmland system: Impacts on crop yield, soil nutrients, and soil microbial community. *Catena*, 222, 106873. https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106873

(e-ISSN: 2805-6604; p-ISSN: 1900-0863)