Recibido, 12/09/2025 Aceptado, 18/11/2025 DOI: 10.25127/agrops.20251.1139
CC BY NC SA
Artículo original

Evaluación del rendimiento del maíz forrajero (*Zea mays* L.) intercalado con frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en el distrito de Molinopampa, Perú

Yield evaluation of forage corn (*Zea mays* L.) intercropped with beans *(Phaseolus vulgaris* L.) in the district of Molinopampa, Peru

Diana Mori-Servan[1*], Malluri Goñas[2], Ligia M. García-Rosero[1], Jorge A. Condori-Apfata[3], Corali Pinedo-Canlla[4]

Merbelita Yalta-Chappa[1], Homar Santillan-Gomez[1], Carmen N. Vigo[1], Duber Banda[1], Wildor Gosgot-Ángeles[1]

RESUMEN

En este estudio se evaluó la intercalación de variedades de maíz forrajero (*Zea mays* L.) y frijol (*Phaseolus vulgaris*) en la región Amazonas, Perú, con el objetivo de identificar combinaciones que optimicen el rendimiento agrícola. Se aplicó un diseño factorial con 11 tratamientos, combinando tres variedades de maíz (Chuska INIA, Marginal 28T, y Advanta) y de frijol (Vidillo y Wasca). Los resultados revelaron que la asociación entre Chuska INIA y frijol Vidillo (T1) obtuvo los mejores resultados en altura de planta (252.13 ± 3.33 cm) y número de hojas (14.08 ± 0.14), lo que sugiere una combinación favorable. Por el contrario, las asociaciones con maíz Advanta mostraron menores valores en estos parámetros, indicando una adaptación limitada a la intercalación. En cuanto a la longitud y el ancho de hoja, no variaron significativamente entre tratamientos, sugiriendo que estos rasgos son menos sensibles a las combinaciones de cultivos. En cuanto al rendimiento forrajero, el tratamiento T1 destacó con los mayores valores de forraje fresco y materia seca, demostrando el potencial de esta asociación para mejorar la productividad. Estos resultados destacan la importancia de seleccionar combinaciones de cultivos que maximicen la producción, promoviendo la sostenibilidad y eficiencia del sistema agrícola en la región. Se concluye que la intercalación de maíz Chuska INIA con frijol Vidillo es una alternativa prometedora para incrementar el rendimiento forrajero en la región de Amazonas, Perú, contribuyendo a la sostenibilidad agrícola mediante la reducción de insumos y la mejora de la salud del suelo.

Palabras clave: biodiversidad agrícola, cultivos asociados, forraje, leguminosas, rendimiento.

ABSTRACT

This study evaluated the intercropping of forage maize (*Zea mays* L.) and common bean (*Phaseolus vulgaris*) varieties in the Amazon region of Peru, with the objective of identifying combinations that optimize agricultural yield. A factorial design with 11 treatments was applied, combining three maize varieties (Chuska INIA, Marginal 28T, and Advanta) and two bean varieties (Vidillo and Wasca). The results showed that the combination of Chuska INIA maize and Vidillo bean (T1) achieved the best performance in terms of plant height (252.13 ± 3.33 cm) and number of leaves (14.08 ± 0.14), indicating a favorable interaction between these varieties. In contrast, combinations involving Advanta maize exhibited lower values for these parameters, suggesting limited adaptation to intercropping. Leaf length and width did not differ significantly among treatments, indicating that these traits are less sensitive to crop combinations. Regarding forage yield, the T1 treatment stood out with the highest values for fresh forage and dry matter yield, demonstrating the potential of this association to enhance productivity. These findings highlight the importance of selecting crop combinations that maximize production while promoting sustainability and efficiency in the region's agricultural systems. It is concluded that intercropping Chuska INIA maize with Vidillo beans is a promising alternative for increasing forage yield in the Peruvian Amazon, contributing to agricultural sustainability by reducing input use and improving soil health.

Keywords: agricultural biodiversity, associated crops, forage, legumes, yield.

[1]Instituto de Investigación para el Desarrollo Sustentable de Ceja de Selva, Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Chachapoyas, Amazonas, Perú.
[2]Centro Experimental Yanayacu, Dirección de Servicios Estratégicos Agrarios (DSEA), Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA).
[3]Facultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias, Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Chachapoyas, Amazonas, Perú.
[4]Investigador independiente, Chachapoyas, Amazonas, Perú.
*Autor de correspondencia. E-mail: diana.mori@untrm.edu.pe

I. INTRODUCCIÓN

Los cereales son fundamentales para la seguridad alimentaria global, desempeñando un papel crucial en la dieta humana (Soto-Gómez & Pérez-Rodríguez, 2022). Entre ellos, el maíz (*Zea mays* L.) ocupa el tercer lugar a nivel mundial después del trigo y el arroz (Gálvez Ranilla., 2020; Guzzon et al., 2021; Saboor et al., 2021). De acuerdo con la OCDE y la FAO, se proyecta que la producción mundial de maíz podría alcanzar 1,4 mil millones de toneladas en 2034, mientras que la de cereales superaría los 3,2 mil millones (FAO, 2024). Sin embargo, para 2050 será necesario aumentar la producción de cereales entre 70 % y 100 % para satisfacer las necesidades alimentarias de aproximadamente 9,8 mil millones de personas Roy et al. (2024), lo que confirma el papel crucial del maíz en la seguridad alimentaria futura. Su versatilidad radica en su capacidad de adaptarse a una amplia gama de condiciones climáticas y en su eficiencia en el uso de insumos agrícolas (Chakrabarti et al., 2022). Además, el maíz es un cultivo clave para la alimentación animal y tiene un rol importante en las industrias alimentarias, energética, farmacéutica y química, contribuyendo significativamente al desarrollo rural y económico en muchas regiones (Assaf et al., 2024; Chakrabarti et al., 2022; Kumar & Narmadha, 2021). El maíz forrajero, en particular, es apreciado por su alto contenido en almidón, carbohidratos hidrosolubles y fibra, lo que lo convierte en una excelente opción para la alimentación de rumiantes, ya sea en forma de heno o ensilado, debido a su capacidad para la degradación microbiana de la fibra (Klevenhusen & Zebeli, 2021; Zhang et al., 2021; Villalba et al., 2021). Sin embargo, una de las principales limitaciones del maíz forrajero es su relativamente bajo contenido proteico, con un promedio cercano al 8 % de la materia seca, en comparación con otros ensilados de leguminosas (Uher et al., 2019; Soe Htet et al., 2021).

No obstante, a pesar de su importancia estratégica para la seguridad alimentaria, el cultivo de maíz enfrenta desafíos relacionados con la sostenibilidad. El monocultivo de maíz, aunque ampliamente practicado, presenta desventajas significativas. Estas incluyen el agotamiento de los nutrientes del suelo y un aumento en la dependencia de fertilizantes químicos, lo que puede llevar a la degradación del suelo y a una mayor susceptibilidad a plagas y enfermedades (Wolińska et al., 2022). En este contexto, la asociación de cereales con leguminosas se ha propuesto como una estrategia efectiva para mejorar tanto el rendimiento como la calidad forrajera, especialmente en áreas con limitaciones en la disponibilidad de tierras (Pierre et al., 2022). Diversos estudios respaldan como el de Di Miceli et al. (2023) han demostrado que la asociación de cultivos como el cacahuete en combinación con el frijol común (*Phaseolus vulgaris)*, puede resultar en un aumento significativo del rendimiento. De manera similar, Chamkhi et al. (2022) obtuvieron resultados favorables en ambientes semiáridos de bajo potencial productivo y recomiendan el uso de caupí (*Vigna unguiculata* L.) Walp. y gandul (*Cajanus cajan* L.).

Además del incremento en el rendimiento, la asociación con leguminosas ofrece ventajas adicionales, como la mejora en la salud del suelo a través de la fijación simbiótica de nitrógeno, lo que reduce la necesidad de aplicaciones de fertilizantes químicos (Dowling et al., 2021; Mupangwa et al., 2021; Zou et al., 2021). Investigaciones previas han evidenciado que esta práctica puede aumentar el contenido de materia orgánica del suelo y mejorar la disponibilidad de nutrientes esenciales, como el nitrógeno, fósforo y potasio, lo que contribuye significativamente a la sostenibilidad del sistema agrícola (Di Miceli et al., 2023; Raza et al., 2020; Silva et al., 2022).

En la región Amazonas, Perú, la ganadería ha experimentado un crecimiento significativo en las últimas décadas, lo que ha provocado cambios en el uso del suelo, como la degradación de pastos y la deforestación (Fuentes et al., 2022). Aunque la ganadería es vital para la economía rural y está estrechamente vinculada a la producción agrícola a través de la generación de pastos y forrajes, enfrenta desafíos importantes, tales como las condiciones climáticas adversas y la baja fertilidad de los suelos (Escobar et al., 2020 ; Fuentes et al., 2022).

En este contexto, se hace evidente la necesidad de mejorar la calidad y disponibilidad de forraje en la región nororiental del Perú, implementando estrategias de manejo que maximicen las sinergias entre cultivos como el maíz y el frijol, evitando efectos negativos en el rendimiento (Beebe et al, 2012; Bourke et al., 2021). La intercalación de estos cultivos ha mostrado un gran potencial para incrementar el rendimiento agrícola, reducir la dependencia de insumos externos y aumentar la resiliencia del sistema agrícola frente a las variaciones climáticas (Bourke et al., 2021; Di Miceli et al., 2023; Pierre et al., 2022). La implementación de prácticas agrícolas más sostenibles, como la asociación de maíz con leguminosas se plantea como una alternativa sostenible para mejorar la producción forrajera y la salud del suelo en la región. Por lo cual, el objetivo general de este estudio fue evaluar el efecto de la intercalación de variedades de maíz y frijol sobre los parámetros agronómicos y de rendimiento, con el fin de identificar las combinaciones que permitan mejorar la producción forrajera y contribuir a la sostenibilidad de los sistemas agrícolas en la región de Amazonas, Perú.

II. MATERIAL Y MÉTODOS

Ubicación del área de estudio

La investigación se realizó en el anexo Ocol, ubicado en las coordenadas geográficas 6°16’29.17” Latitud S; 77°33’57.20” Longitud N, a una altitud de 2280 m.s.n.m., en el distrito de Molinopampa, provincia de Chachapoyas, región Amazonas, norte del Perú. Chachapoyas es una provincia que alcanza hasta los 4 000 m s. n. m., el clima es frío, muy lluvioso con disponibilidad de humedad durante el año. Asimismo, al ser un clima lluvioso y templado, cuenta con deficiencia de humedad en invierno (SENAMHI, 2021)

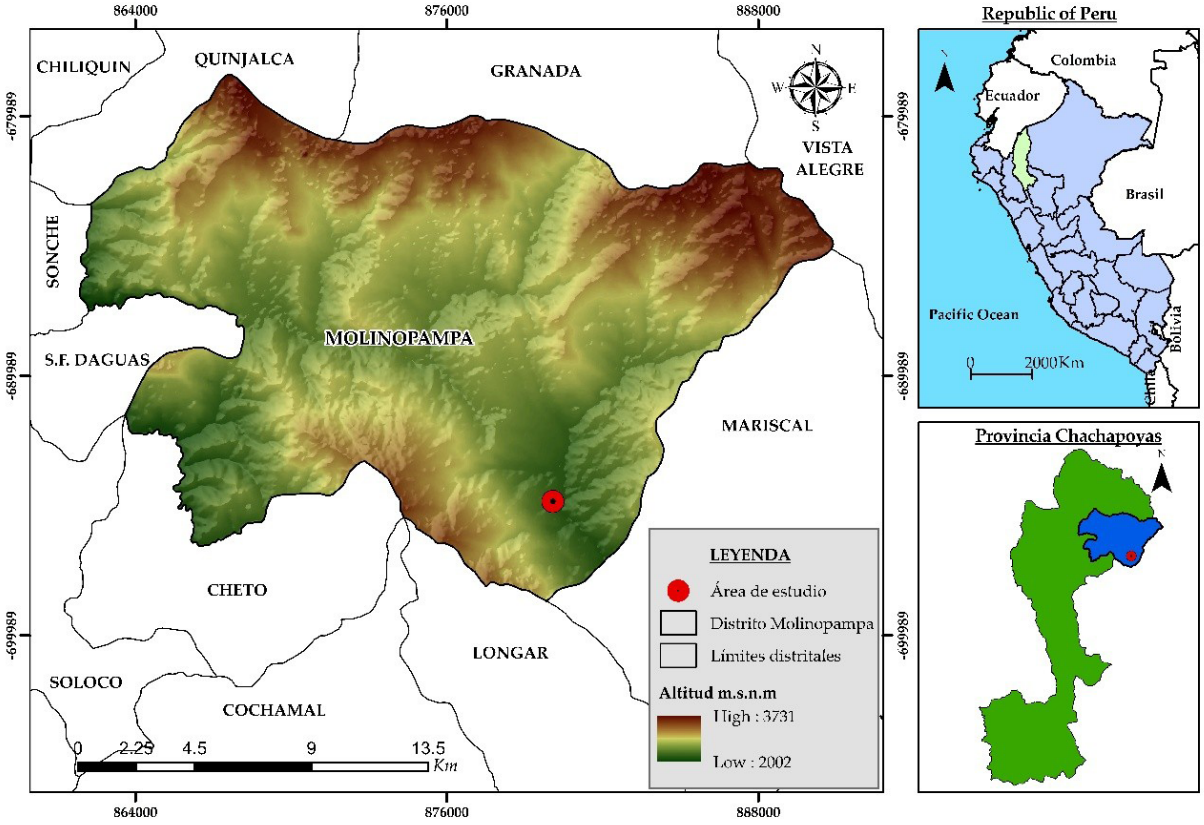

Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio.

Diseño experimental

El diseño experimental se estructuró en un esquema factorial, permitiendo evaluar tanto los efectos individuales de los factores como sus interacciones. Se consideraron dos factores principales: el factor A (variedades de maíz) incluyó tres variedades: Chuska INIA (M-CH), Marginal 28T (M-M28T), y Advanta (M-ADV). El factor B (variedades de frijol) incluyó dos variedades: Vidillo (F-V) y Wasca (F-W). Además, se incluyeron tratamientos de control con cada especie en monocultivo, totalizando 11 tratamientos (Tabla 1). Cada tratamiento se evaluó con tres repeticiones en un Diseño en Bloques Completos al Azar (DBCA).

Tabla 2. Tratamientos

Tratamientos	Factor A	Factor B	Interacciones	Descripción
1	M-CH	F-V	M-CH+F-V	Maíz Chuska INIA+ frijol Vidillo
2	M-CH	F-W	M-CH+F-W	Maíz Chsuka INIA+ frijol Wasca
3	M-CH	-	M-CH	Maiz Chuska INIA
4	M-M28T	F-V	M-M28T+F-V	Maíz Marginal 28T+ frijol Vidillo
5	M-M28T	F-W	M-M28T+F-W	Maíz Marginal 28T+ frijol Waska
6	M-M28T	-	M-M28T	Maíz Marginal 28T
7	M-ADV	F-V	M-ADV+F-V	Maíz Advanta+ frijol Vidillo
8	M-ADV	F-W	M-ADV+F-W	Maíz Advanta+ frijol Wasca
9	M-ADV	-	M-ADV+SF	Maíz Advanta
10	-	F-V	F-V	Frijol Vidillo
11	-	F-W	F-W	Frijol Wasca

Instalación de parcelas experimentales y manejo agronómico

El diseño en campo se instaló en un área de 544 m^2 bajo bloques completos al azar con 11 tratamientos y 3 repeticiones, totalizando 33 unidades experimentales. Cada unidad experimental fue de 4 m de largo y 2 m de ancho, con una división de 1 m entre unidades experimentales y entre bloques. El terreno experimental fue preparado mediante la delimitación del área y la eliminación de malezas, seguidas de labores de arado y cruzado para aflojar el suelo y optimizar las condiciones para la germinación y el crecimiento de las semillas. Este procedimiento sigue las recomendaciones establecidas por Wuest et al., 2021. La siembra se llevó a cabo el 2 de julio del año 2022, utilizando tres semillas de maíz y tres de frijol por golpe, con un distanciamiento de 0.25 m entre golpes y 0.8 m entre surcos. Las unidades experimentales estuvieron conformadas por tres surcos de 2 m de longitud, separados entre sí por una distancia de un metro.

Antes de la siembra, se llevó a cabo un análisis fisicoquímico del suelo con el objetivo de desarrollar un programa de fertilización ajustado a las condiciones del suelo y las necesidades específicas de los cultivos. Las muestras de suelo fueron analizadas en el Laboratorio de Investigación de Suelos y Aguas de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza, obteniéndose los siguientes resultados: pH 5.46, conductividad eléctrica 0.12 dS/m, 5.81 ppm de fósforo, 186.07 ppm de potasio, 2.50% de carbono, 4.31% de materia orgánica, 0.22% de nitrógeno, textura arcillosa y una capacidad de intercambio catiónico de 24 meq/100 g.

Aproximadamente entre los días 10 y 12 posteriores a la siembra, se realizó un raleo, dejando únicamente dos plantas de maíz y dos de frijol por surco para asegurar un desarrollo óptimo de las plantas. La fertilización se aplicó de manera uniforme en todas las unidades experimentales, con una dosificación constante que consistió en 50 g/planta de sulfato de amonio, aplicada en una sola dosis un mes y medio después de la siembra. La primera escarda y el aporcado se llevaron a cabo manualmente y de manera simultánea, con el fin de minimizar la competencia por recursos del suelo y adaptarse a las condiciones

climáticas locales, además de proporcionar un soporte adecuado a las plantas en crecimiento. El cultivo se desarrolló bajo condiciones de precipitación natural, sin la necesidad de riego suplementario.

Parámetros agronómicos del maíz forrajero y frijol

Se evaluaron los siguientes parámetros agronómicos: número de hojas, altura de la planta, diámetro del tallo, longitud y ancho de hoja en maíz y frijol, además del rendimiento de forraje fresco y materia seca de la asociación maíz-frijol, expresado en toneladas por hectárea. El muestreo fue no probabilístico de conveniencia, seleccionando cuatro plantas representativas de los surcos centrales de cada unidad experimental, excluyendo los bordes para garantizar la precisión de los datos. La altura de la planta se midió desde el nivel del suelo hasta el ápice de la planta con un flexómetro, realizándose estas mediciones cada 30 días desde la emergencia hasta el corte. El número de hojas del maíz se contó con la misma frecuencia. La longitud de la hoja se determinó midiendo desde la base del limbo hasta el ápice con una cinta métrica, mientras que el ancho se registró midiendo horizontalmente en la parte central de la hoja central en el momento del corte (Gou et al., 2017).

El rendimiento de forraje se evaluó cuando las plantas de maíz alcanzaron el estado de grano lechoso, seis meses después de la siembra, los días 1 y 2 de enero de 2023, garantizando así la recolección en su punto óptimo de calidad. Para determinar el rendimiento de forraje fresco, se seleccionaron cuatro plantas de *Zea mays* en estado lechoso del surco central de cada tratamiento. En los tratamientos que incluían la combinación de maíz y frijol, se cortaron y pesaron ambas especies conjuntamente, debido al hábito trepador del frijol que dificultaba su separación. Tras el corte, las muestras fueron pesadas en una balanza para estimar el rendimiento en toneladas por hectárea (t/ha), siguiendo las recomendaciones de Andrade et al. (2023); Raghuwanshi et al. (2023). La materia seca, derivada del forraje deshidratado, se evaluó después de cortar el forraje seco. Se tomó una submuestra de 100 gramos de cada tratamiento, la cual fue secada en una estufa eléctrica a 105 ºC durante 24 horas, hasta alcanzar un peso constante, en el Laboratorio de Investigación de Suelos y Aguas de la UNTRM. Con estos datos, se calculó el rendimiento de materia seca utilizando la fórmula recomendada por Wuest et al. (2021).

$$\frac{MS}{m} = \frac{PFXps}{pf}$$

Donde:

PF: peso fresco de la muestra (g/m^2).

Pf: peso fresco de la submuestra (g)

Ps: Peso de la submuestra (g)

Se extrapolaron los datos de rendimiento de forraje verde y materia seca de g a Kg por hectárea (kg/ha) para expresar el rendimiento en kg de materia seca por hectárea (kg/ha). Además, se realizó una evaluación del rendimiento de la asociación forrajera maíz-frijol para determinar la interacción entre gramíneas y leguminosas en el rendimiento de forraje.

Análisis de datos

Para analizar los datos, primero se evaluó la normalidad utilizando el test de Shapiro-Wilk. El análisis se centró en los tratamientos que incluían la asociación de variedades de maíz forrajero y frijol, ya que el rendimiento de forraje fresco y de materia seca se evaluó conjuntamente para ambos cultivos. Las variables que cumplieron con el supuesto de normalidad se sometieron a un análisis de varianza univariado (ANOVA), seguido de pruebas de comparación múltiple para cada tratamiento, utilizando un nivel de significancia del 95%. Para las variables que no presentaron normalidad, se aplicó la prueba de Kruskal-Wallis, seguida de la prueba post hoc de Dunn para identificar diferencias significativas entre grupos. El análisis estadístico se realizó con el software RStudio v.3.1.3, utilizando las librerías dplyr, ggplot2, PMCMRplus, FSA y MultcompView.

III. RESULTADOS

Parámetros agronómicos del maíz forrajero

En la Figura 2A, la altura de las plantas varió significativamente entre tratamientos. El tratamiento T1 (maíz Chuska INIA + frijol Vidillo) presentó la mayor altura con 252.13 ± 3.33 cm, seguido de cerca

por T2 (maíz Chuska INIA + frijol Wasca) y T3 (maíz Chuska INIA) con 248.10 ± 0.85 cm y 242.53 ± 5.61 cm, respectivamente. Los tratamientos T7 (maíz Advanta + frijol Vidillo) y T9 (maíz Advanta) registraron las menores alturas, con valores de 203.20 ± 8.36 cm y 200.70 ± 1.22, lo que indica un efecto considerable del tratamiento sobre el crecimiento en altura.

En la Figura 2B, el número de hojas mostró una tendencia similar. T1 (maíz Chuska INIA + frijol Vidillo) tuvo el mayor número de hojas, con un promedio de 14.08 ± 0.14 hojas por planta, mientras que los tratamientos T6, T7, T8 y T9 tuvieron los menores valores, rondando las 12 hojas por planta. Aunque algunas diferencias no fueron estadísticamente significativas, los tratamientos T1 y T2 se destacaron por su mayor número de hojas.

La Figura 3C indica que la longitud de la hoja no presentó variaciones significativas entre los tratamientos, con todos los tratamientos mostrando longitudes promedio entre 102 y 107 cm. Esto sugiere que la longitud de hoja es un parámetro menos sensible a las variaciones en los tratamientos aplicados.

Por último, en la Figura 4D, el ancho de hoja también mostró poca variabilidad entre los tratamientos, con un promedio cercano a 12 cm en todos los casos. La ausencia de diferencias significativas en la longitud y ancho de hoja indica que estos parámetros no fueron significativamente afectados por los tratamientos, a diferencia de la altura de la planta y el número de hojas.

En la Figura 3, se presenta la distribución del diámetro del tallo en diferentes tratamientos. Los tratamientos T1 (maíz Chuska INIA + frijol Vidillo) y T2 (maíz

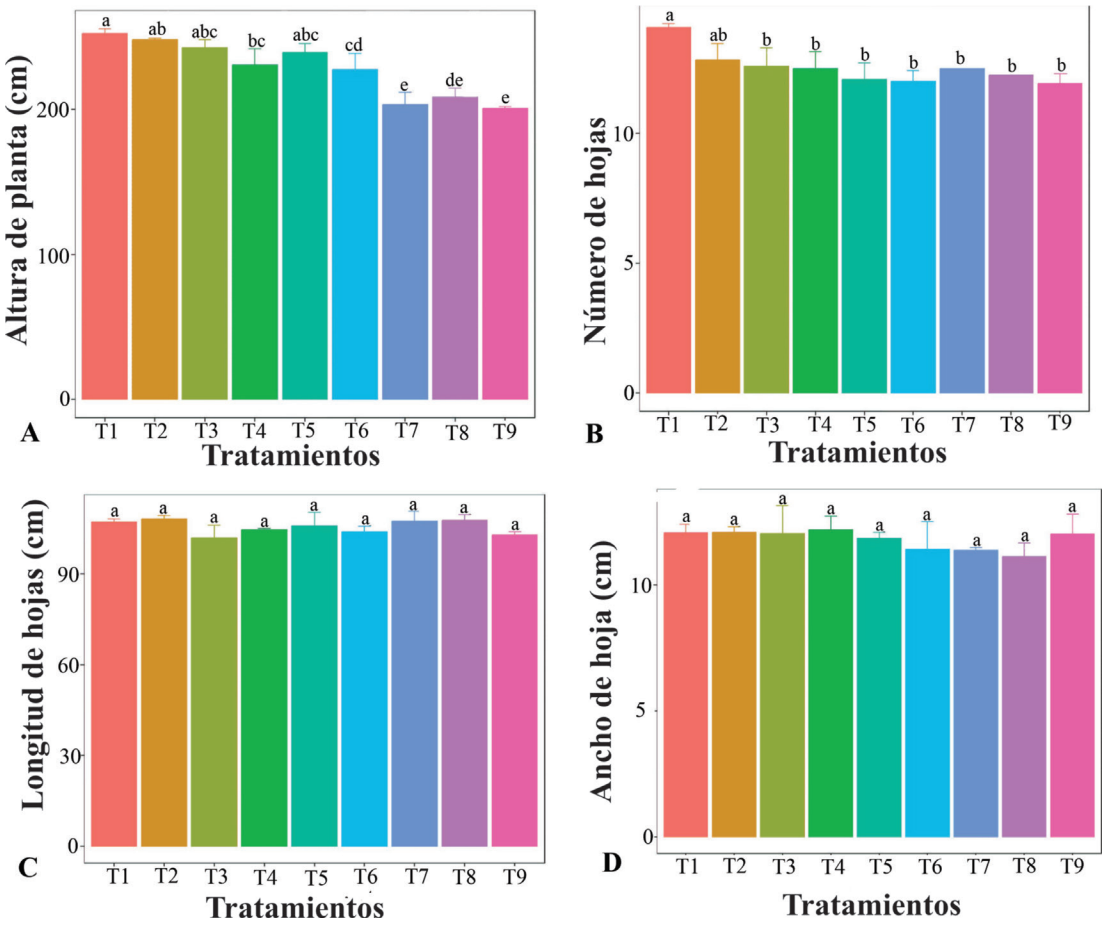

Figura 2. Características agronómicas del maíz forrajero: altura (A), número de hojas (B), longitud de hoja (C) y anchura de hoja (D). Letras distintas entre barras indican diferencias significativas entre tratamientos, según test de Tukey ($p \leq 0,05$).

Chuska INIA + frijol Wasca) destacan con los mayores diámetros promedio de 3.27 ± 0.17 cm y 3.22 ± 0.04 cm, respectivamente, lo que sugiere un crecimiento más vigoroso bajo estas condiciones. El tratamiento T3 (maíz Chuska INIA) también muestra un diámetro promedio relativamente alto de 3.23 ± 0.09 cm. En contraste, los tratamientos T8 y T9 presentan los diámetros más bajos, con medias de 2.80 ± 0.03 cm y 2.59 ± 0.09 cm, respectivamente, indicando que estas condiciones pudieron haber limitado el desarrollo del tallo.

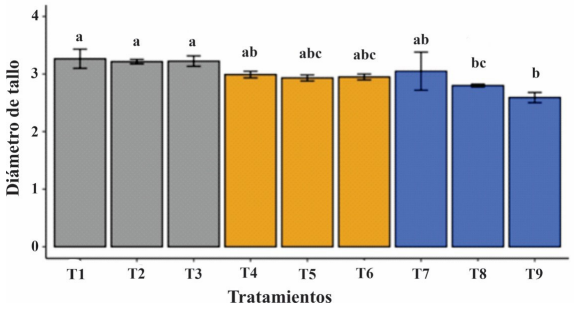

Figura 3. Diámetro del tallo de maíz forrajero.

Determinación del rendimiento de forraje en tres variedades de maíz

Curvas de crecimiento: altura de planta y número de hojas

La curva de crecimiento para la altura de la planta de maíz no presentó diferencias significativas entre los tratamientos a los 45, 75 y 105 días (Figura 4A). Sin embargo, a los 145 y 165 días se observaron diferencias significativas. A los 145 días, se distinguieron siete grupos estadísticos, con el tratamiento T1 (maíz Chuska INIA + frijol Vidillo) alcanzando la mayor altura con 217,75 cm, mientras que el tratamiento T7 (maíz Advanta + frijol Vidillo) mostró la menor altura con 171.83 cm. A los 165 días, se identificaron seis grupos estadísticos, donde el tratamiento T1 nuevamente presentó la mayor altura con 252.08 cm, y el tratamiento T9 (maíz Advanta) registró la menor altura con 200.66 cm.

En cuanto al número de hojas, no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos a los 45, 75 y 105 días (Figura 4B). No obstante, a los 145 y 165 días, se detectaron diferencias significativas. A los 145 días, se formaron tres grupos estadísticos, con el tratamiento T1 (maíz Chuska INIA + frijol Vidillo) exhibiendo 14 hojas como mayor valor, y el tratamiento T9 (maíz Advanta) registrando el menor con 12. A los 165 días, se observaron seis grupos estadísticos, donde el tratamiento T1 mantuvo el mayor número de hojas con 14, mientras que el tratamiento T9 continuó con el menor número, registrando 12 hojas.

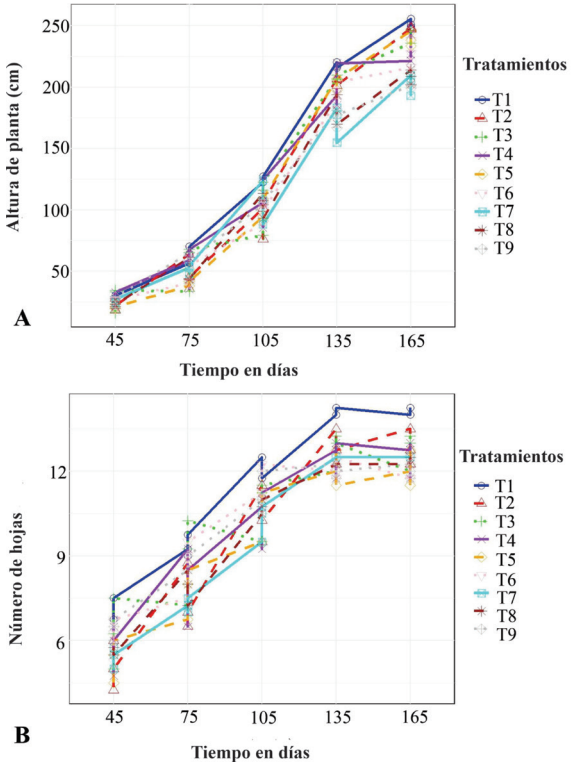

Figura 4. Curva de crecimiento altura de planta (A) y curva de crecimiento del número de hojas (B).

Determinantes del rendimiento forrajero de dos variedades de frejol

Respecto a la longitud de las hojas de frijol, no se encontraron diferencias altamente significativas entre los tratamientos evaluados (Figura 5A). No obstante, el tratamiento T8 (maíz Advanta + frijol Wasca) presentó la longitud de hoja más alta, con un promedio de 24.92 ± 0.51 cm, mientras que el tratamiento T1 (maíz Chuska + frijol Vidillo) registró la longitud más baja, con un promedio de 23.57 ± 0.87

cm. De manera análoga, no se observaron diferencias altamente significativas en el ancho de las hojas entre los tratamientos (Figura 5B). Sin embargo, el tratamiento T8 (maíz Advanta + frijol Wasca) mostró el mayor ancho de hoja, con un promedio de 23.42 ± 0.63 cm, en contraste con el tratamiento T1 (maíz Chuska + frijol Vidillo), que presentó el menor ancho, con un promedio de 22.65 ± 1.17 cm.

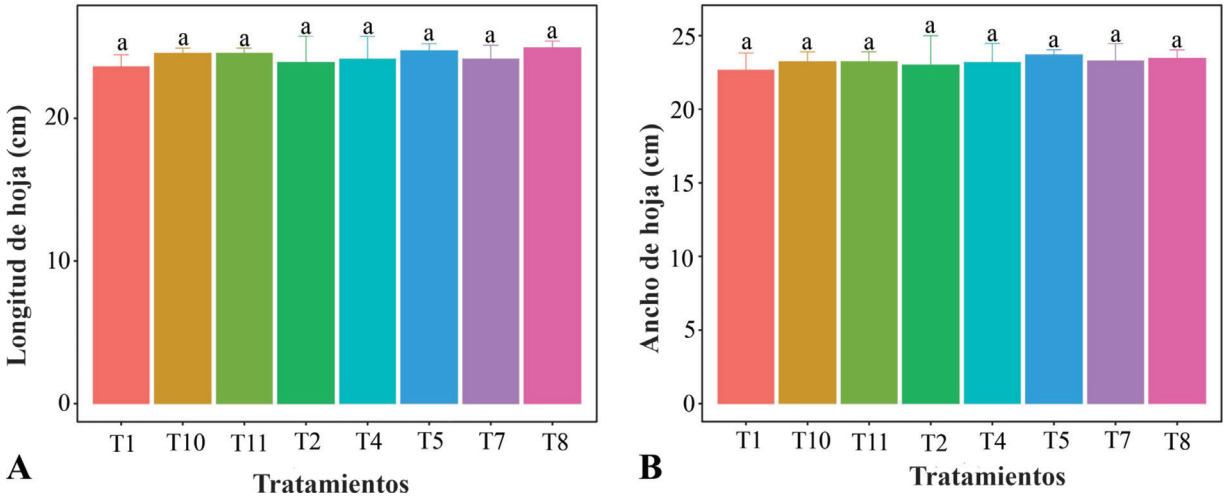

Figura 5. Longitud de hoja (A) y ancho de hoja (B). Letras diferentes entre las barras indican diferencias significativas entre tratamientos, según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

Interacción del maíz y frijol en el rendimiento forrajero

Rendimiento de forraje fresco y seco

El rendimiento de forraje fresco y seco presentaron diferencias significativas. El tratamiento T1 (maíz Chuska INIA + frijol Vidillo) presentó el rendimiento más alto, con 115.63 ± 5.44 t/ha de forraje fresco, mientras que el tratamiento T7 (maíz Advanta + frijol Vidillo) mostró el rendimiento más bajo, alcanzando 97.02 ± 7.98 t/ha. De manera similar, para el rendimiento de forraje seco también el tratamiento T1 (maíz Chuska INIA + frijol Vidillo) volvió a exhibir el mayor rendimiento, con 26.05 ± 3.41 t/ha de materia seca, en contraste con el tratamiento T7 (maíz Advanta + frijol Vidillo), que registró el rendimiento más bajo, con 21.23 ± 2.51 t/ha de materia seca como se muestra en la Figura 6A.

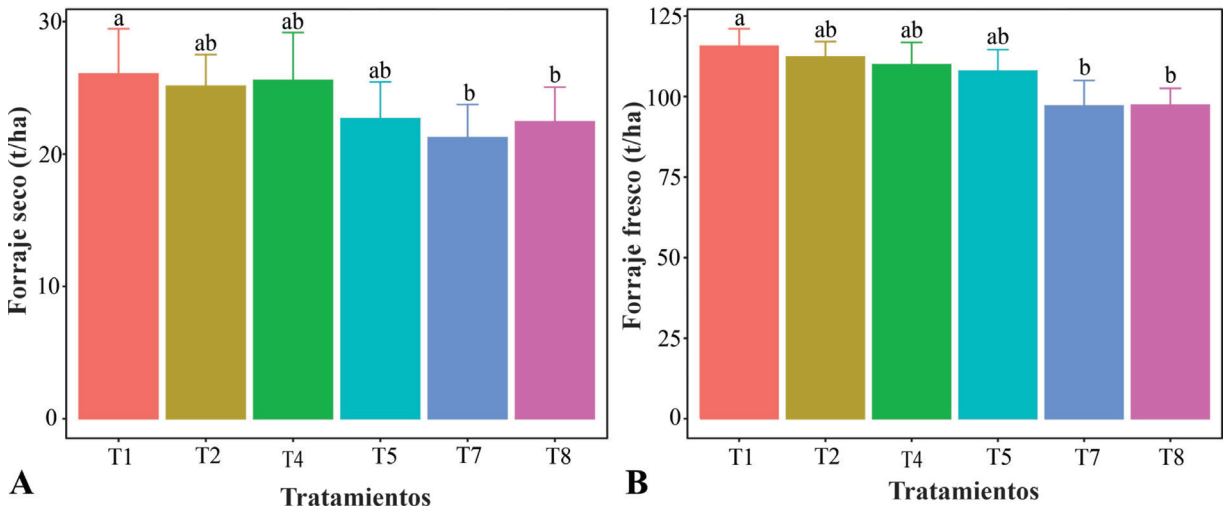

Figura 6. Forraje seco (A) y forraje fresco (B). Letras diferentes entre las barras indican diferencias significativas entre tratamientos, según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

IV. DISCUSIÓN

En el presente estudio se evaluó la interacción entre diferentes variedades de maíz con frijol en sistemas de asociación, observando que el tratamiento T1 (maíz Chuska INIA + frijol Vidillo) alcanzó una altura de 252.08 cm, en contraste con T9 (maíz Advanta), que tuvo una altura significativamente menor de 200.66 cm. Estos resultados son consistentes con lo informado por Wang et al. (2021), quien destacó la superioridad de las asociaciones de cultivos en términos de crecimiento en altura.

La altura de las plantas de maíz es un indicador clave de la salud y vigor de las mismas, y suele correlacionarse positivamente con el rendimiento del forraje, como lo señalaron Barnetson et al., (2020) y Dos Reis et al. (2020). En nuestra investigación, el tratamiento T1 mostró una ventaja significativa en altura, lo cual sugiere un entorno más favorable para el crecimiento cuando se asocia con frijol Vidillo. Este resultado podría estar relacionado con la fijación biológica de nitrógeno realizada por el frijol, la cual ha sido reportada en otros estudios como un factor que mejora la disponibilidad de nutrientes para el maíz y favorece su desarrollo (Lai et al., 2022). Además, la altura alcanzada por el maíz en nuestras parcelas es comparable a la reportada por Collazos Silva et al. (2019) y Maguiña-Maza et al. (2021), quienes observaron alturas promedio de 240-242 cm en diferentes genotipos de maíz. Estas coincidencias refuerzan la validez de nuestros resultados y sugieren que los factores agronómicos y ambientales locales desempeñaron un papel significativo en el crecimiento observado.

Asimismo, Maguiña-Maza et al. (2021), informaron una altura final de 253.95 cm para el maíz Chuska INIA 617, mientras que Vásquez et al. (2024), obtuvieron una altura inferior de 239.82 cm en condiciones similares. Las diferencias observadas entre estos estudios y el nuestro pueden atribuirse a factores climáticos y edáficos específicos del sitio de estudio que afectan el desarrollo del cultivo. A su vez, Vásquez et al. (2024), encontraron que los cultivos asociados de maíz y frijol muestran una mayor variabilidad en la altura y el rendimiento entre los dos años evaluados, lo cual es consistente con la variabilidad observada en nuestro estudio, especialmente en los tratamientos que involucraron maíz Advanta.

En cuanto al número de hojas, nuestros resultados también colocan al tratamiento T1 (maíz Chuska INIA + frijol Vidillo) como el valor más alto con 14.08 unidades, mientras que T6 (maíz Margina l28T) presentó el valor más bajo con 11.91 hojas por planta. Estos valores están dentro del rango reportado por estudios previos, como el de Collazos Silva et al. (2019) y Maguiña-Maza et al. (2021), quienes evaluaron diversas variedades de maíz y reportaron un promedio de 12 a 15 hojas por planta. El número de hojas es un parámetro relevante porque está asociado con la capacidad fotosintética de la planta, y un mayor número de hojas suele indicar una mayor capacidad para captar luz solar y, por ende, una mayor producción de biomasa. En este contexto, Mocek-Płóciniak et al. (2023) y Gurrieri et al. (2020), han demostrado que las asociaciones de cultivos pueden inducir una morfología variable en las plantas, especialmente en las hojas, lo cual podría explicar las diferencias observadas en nuestro estudio.

En cuanto al largo de la hoja, las diferencias fueron mínimas, oscilando entre 101 y 108 cm para T3 (maíz Chuska INIA) y T2 (combinación de maíz Chuska INIA y frijol Wasca), respectivamente. Aunque las diferencias en la longitud de la hoja no fueron estadísticamente significativas, este parámetro sigue siendo importante porque está directamente relacionado con la eficiencia fotosintética y, en última instancia, con el rendimiento del forraje Khaeim et al. (2022), demostraron que, bajo condiciones controladas de temperatura y disponibilidad de agua, se pueden obtener longitudes de hoja superiores a 100 cm, lo que coincide con los resultados obtenidos en

nuestro estudio. Sin embargo, es importante señalar que las condiciones ambientales adversas, como las observadas por Obour et al. (2022), en Ghana, pueden afectar negativamente el crecimiento de las hojas y, por lo tanto, el rendimiento total del maíz.

En lo que respecta al ancho de la hoja, observamos que T4 (maíz Marginal 28T + frijol Vidillo) presentó el mejor valor con 12.18 cm, mientras que el valor más bajo se observó en T8 (maíz Advanta + frijol Wasca) con 11.12 cm. Estos resultados son comparables con los obtenidos por Aakash et al. (2022) y Nigussie et al. (2021), quienes evaluaron diferentes genotipos de maíz y reportaron anchos de hoja que varían entre 6.79 y 11.19 cm Wang et al. (2023), también registraron valores que oscilan entre 7.5 y 12.5 cm, lo cual está en línea con nuestros hallazgos. El ancho de la hoja es un indicador de la capacidad de la planta para interceptar luz y, por lo tanto, es relevante para el rendimiento del forraje. La incorporación de leguminosas como el frijol en el cultivo de maíz podría estar contribuyendo a una mejora en estos parámetros, lo que a su vez maximiza la productividad y el rendimiento forrajero.

En cuanto al rendimiento de forraje fresco y seco, nuestros resultados muestran diferencias significativas entre los tratamientos evaluados. El tratamiento T1 (maíz Chuska INIA + frijol Vidillo) presentó el rendimiento más alto, con 115.62 t/ha de forraje fresco y 26.05 t/ha de materia seca, mientras que el tratamiento T7 (maíz Advanta + frijol Vidillo) mostró los valores más bajos, alcanzando 97.02 t/ha de forraje fresco y 21.23 t/ha de materia seca. Estos resultados son consistentes con lo informado por Zhang et al. (2022), quienes afirmaron que la asociación de cultivos aumenta la biomasa y la calidad del forraje. Además, Balandaitė et al. (2022), mencionaron que los rendimientos en sistemas de asociación pueden ser hasta un 20% superiores a los de monocultivos, lo cual está respaldado por nuestros hallazgos.

En cuanto a la materia seca, los tratamientos asociados de maíz y frijol tuvieron las medias de producción más altas, con el tratamiento de maíz Chuska INIA + frijol Vidillo alcanzando 26.05 t/ha, mientras que M28T logró 15.52 t/ha. Por su parte, Maguiña-Maza et al. (2021), reportaron rendimientos más bajos, con 5.7 t/ha para INIA 617 Chuska y 5.9 t/ha para M28T. La sinergia entre cultivos permite asociarse con soja, como en el caso de Suárez et al. (2022), quienes reportaron 6.7 t/ha en maíz-soja asociado, en comparación con 4.8 t/ha en soja sola, lo que indica la ventaja del cultivo asociado. La variabilidad del rendimiento también está influenciada por factores como la altura de la planta y el índice de área foliar (Palemón Alberto et al., 2019; Suárez et al., 2022; Wolińska et al., 2022; Zhang et al., 2022). Esta interacción, a su vez, permite que los cultivos sean más resistentes a las condiciones climáticas adversas, como la sequía, mejorando la calidad del suelo e incrementando la materia orgánica y el nitrógeno. Aunque un problema común en este cultivo es la presencia de plagas y enfermedades, como el tizón del maíz (*Exserohilum turcicum*), que puede causar pérdidas significativas al atacar las hojas, tallos y mazorcas y provocar manchas necróticas y marchitamiento de las plantas, en este estudio no se evidenció la incidencia de esta enfermedad en ninguna de las variedades evaluadas (Navarro et al., 2020)

Es importante destacar que la asociación de maíz y frijoles en Molinopampa, Amazonas, ha incrementado la producción de materia seca, destacando combinaciones como maíz Chuska INIA y frijol Vidillo. Este sistema de cultivo no solo aumenta la productividad del forraje, sino que también mejora la calidad del suelo y la resistencia a condiciones climáticas adversas. A pesar de la presencia usual de plagas y enfermedades en el maíz, este estudio no registró ningún problema debido al uso de semillas sanas.

V. CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio demuestran que la

asociación de maíz (*Zea mays*) con frijol (*Phaseolus vulgaris*) ofrece ventajas significativas en términos de rendimiento y desarrollo agronómico en comparación con el monocultivo de maíz. En particular, la combinación de maíz Chuska INIA con frijol Vidillo destacó por su mayor altura de planta, mayor número de hojas y mejores rendimientos de forraje fresco y seco. Estos hallazgos subrayan el potencial de las asociaciones de cultivos para mejorar la eficiencia productiva y la sostenibilidad en sistemas agrícolas, especialmente en regiones como Molinopampa, Amazonas, donde las condiciones climáticas y edáficas pueden ser desafiantes.

En cuanto a las implicaciones prácticas, estos resultados sugieren que la adopción de asociaciones de maíz y frijol podría ser una estrategia efectiva para mejorar la productividad y la resiliencia de los sistemas de cultivo en la región. La capacidad de estas asociaciones para mejorar la altura de las plantas, el número de hojas y el rendimiento de forraje es especialmente relevante en el contexto de la creciente demanda de alimentos y forraje en áreas rurales. Sin embargo, a pesar de los resultados positivos, es necesario reconocer que las respuestas observadas en las diferentes combinaciones de maíz y frijol pueden variar según las condiciones ambientales y las prácticas de manejo. Por lo tanto, se recomienda que futuras investigaciones se centren en evaluar la estabilidad de estos resultados en diferentes condiciones agroecológicas y durante ciclos de cultivo sucesivos. Asimismo, sería pertinente investigar más a fondo la interacción entre las especies asociadas en términos de competencia y cooperación por recursos, así como el impacto a largo plazo en la calidad del suelo y la biodiversidad.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

Conceptualización; D.M.S*; L.G.R.; M.G.; Metodología: D.M.S.; J.C.A. Investigación: D.M.S.; C.P.C.; M.Y.C. Validación: M.G; Análisis formal: J.C.A.; C.V; Redacción –borrador original: D.M.S.; H.S.G.; Redacción – revisión y edición: D.B; L.G.R.; W.G.Á.

VII. REFERENCIAS

Aakash, Thakur, N. S., Singh, M. K., Bhayal, L., Meena, K., Choudhary, S. K., Kumawat, N., Singh, R. K., Singh, U. P., Singh, S. K., Sanodiya, P., Kumar, A., & Singh, A. K. (2022). Sustainability in Rainfed Maize (*Zea mays* L.) Production Using Choice of Corn Variety and Nitrogen Scheduling. *Sustainability*, *14*(5), 3116. https://doi.org/10.3390/su14053116

Andrade, B. M. S., Pedrotti, A., Sousa, B. M. L., Holanda, F. S. R., Villwock, A. P. S., & Santana, A. P. S. (2023). Technical efficiency of forage production from residues of green corn (*Zea mays* L.) in Sergipe, Brazil. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences*, *18*(2), 1-12. https://doi.org/10.5039/agraria.v18i2a2971

Assaf, J. C., Mortada, Z., Rezzoug, S.-A., Maache-Rezzoug, Z., Debs, E., & Louka, N. (2024). Comparative Review on the Production and Purification of Bioethanol from Biomass: A Focus on Corn. *Processes*, *12*(5), 1001. https://doi.org/10.3390/pr12051001

Balandaitė, J., Romaneckas, K., Švereikaitė, A., Kimbirauskienė, R., Sinkevičienė, A., & Romaneckas, A. (2022). The Biomass Productivity of Maize, Hemp and Faba Bean Multi-Crops. *Agronomy*, *12*(12), 3193. https://doi.org/10.3390/agronomy12123193

Barnetson, J., Phinn, S., & Scarth, P. (2020). Estimating Plant Pasture Biomass and Quality from UAV Imaging across Queensland's Rangelands. *AgriEngineering*, *2*(4), 523-543. https://doi.org/10.3390/agriengineering2040035

Beebe, S. (s. f.). *Chapter 8: Improving Resource Use Efficiency and Reducing Risk of Common Bean Production in Africa, Latin America, and the Caribbean*.

Bourke, P. M., Evers, J. B., Bijma, P., Van Apeldoorn, D. F., Smulders, M. J. M., Kuyper, T. W., Mommer, L., & Bonnema, G. (2021). Breeding Beyond Monoculture: Putting

the "Intercrop" Into Crops. *Frontiers in Plant Science*, *12*, 734167. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.734167

Chamkhi, I., Cheto, S., Geistlinger, J., Zeroual, Y., Kouisni, L., Bargaz, A., & Ghoulam, C. (2022). Legume-based intercropping systems promote beneficial rhizobacterial community and crop yield under stressing conditions. *Industrial Crops and Products*, *183*, 114958. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114958

Collazos Silva, R., Neri Chavez, J. C., Huamán Huamán, E., & Juárez Contreras, L. D. P. (2019). Cultivo de maíz forrajero (*Zea mays* L.) en el distrito de Molinopampa-Chachapoyas-Amazonas. *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable*, *2*(3), 23. https://doi.org/10.25127/aps.20183.400

Di Miceli, G., Licata, M., & Marceddu, R. (2023). Forage mixture productivity and silage quality from a grass/legume intercrop in a semiarid Mediterranean environment. *Agronomy Journal*, *115*(3), 1131-1145. https://doi.org/10.1002/agj2.21300

Dos Reis, A. A., Werner, J. P. S., Silva, B. C., Figueiredo, G. K. D. A., Antunes, J. F. G., Esquerdo, J. C. D. M., Coutinho, A. C., Lamparelli, R. A. C., Rocha, J. V., & Magalhães, P. S. G. (2020). Monitoring Pasture Aboveground Biomass and Canopy Height in an Integrated Crop–Livestock System Using Textural Information from PlanetScope Imagery. *Remote Sensing*, *12*(16), 2534. https://doi.org/10.3390/rs12162534

Dowling, A., O Sadras, V., Roberts, P., Doolette, A., Zhou, Y., & Denton, M. D. (2021). Legume-oilseed intercropping in mechanised broadacre agriculture – a review. *Field Crops Research*, *260*, 107980. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107980

FAO: Global ag production to increase 14% in next decade | World Grain. (s. f.). Recuperado 7 de octubre de 2025, de https://www.world-grain.com/articles/21657-fao-global-ag-production-to-increase-14-in-next-decade

Fuentes, E., Gómez, C., Pizarro, D., Alegre, J., Castillo, M., Vela, J., Huaman, E., & Vásquez, H. (2022). A review of silvopastoral systems in the Peruvian Amazon region. *Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales*, *10*(2), 78-88. https://doi.org/10.17138/tgft(10)78-88

Gálvez Ranilla, L. (2020). The Application of Metabolomics for the Study of Cereal Corn (*Zea mays* L.). *Metabolites*, *10*(8), 300. https://doi.org/10.3390/metabo10080300

Gou, L., Xue, J., Qi, B., Ma, B., & Zhang, W. (2017). Morphological Variation of Maize Cultivars in Response to Elevated Plant Densities. *Agronomy Journal*, *109*(4), 1443-1453. https://doi.org/10.2134/agronj2016.11.0675

Gurrieri, L., Merico, M., Trost, P., Forlani, G., & Sparla, F. (2020). Impact of Drought on Soluble Sugars and Free Proline Content in Selected Arabidopsis Mutants. *Biology*, *9*(11), 367. https://doi.org/10.3390/biology9110367

Guzzon, F., Arandia Rios, L. W., Caviedes Cepeda, G. M., Céspedes Polo, M., Chavez Cabrera, A., Muriel Figueroa, J., Medina Hoyos, A. E., Jara Calvo, T. W., Molnar, T. L., Narro León, L. A., Narro León, T. P., Mejía Kerguelén, S. L., Ospina Rojas, J. G., Vázquez, G., Preciado-Ortiz, R. E., Zambrano, J. L., Palacios Rojas, N., & Pixley, K. V. (2021). Conservation and Use of Latin American Maize Diversity: Pillar of Nutrition Security and Cultural Heritage of Humanity. *Agronomy*, *11*(1), 172. https://doi.org/10.3390/agronomy11010172

Khaeim, H., Kende, Z., Jolánkai, M., Kovács, G. P., Gyuricza, C., & Tarnawa, Á. (2022). Impact of Temperature and Water on Seed Germination and Seedling Growth of Maize (*Zea mays* L.). *Agronomy*, *12*(2), 397. https://doi.org/10.3390/agronomy12020397

Klevenhusen, F., & Zebeli, Q. (2021). A review on

the potentials of using feeds rich in water-soluble carbohydrates to enhance rumen health and sustainability of dairy cattle production. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *101*(14), 5737-5746. https://doi.org/10.1002/jsfa.11358

Kumar, R. S., & Narmadha, R. (s. f.). *MAIZE WITH GREEN LEGUME FODDER INTERCROPPING SYSTEM*.

Lai, H., Gao, F., Su, H., Zheng, P., Li, Y., & Yao, H. (2022). Nitrogen Distribution and Soil Microbial Community Characteristics in a Legume–Cereal Intercropping System: A Review. *Agronomy*, *12*(8), 1900. https://doi.org/10.3390/agronomy12081900

Maguiña-Maza, R. M., Francisco Perez, S. C., Pando Cárdenas, G. L., Sessarego Dávila, E., Chagray Ameri, N. H., Pujada Abad, H. N., & Airahuacho Bautista, F. E. (2021). Potencial agronómico, productivo, nutricional y económico de cuatro genotipos de maíz forrajero en el valle de Chancay, Perú. *Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, *22*(3). https://doi.org/10.21930/rcta.vol22_num3_art:1931

Mocek-Płóciniak, A., Mencel, J., Zakrzewski, W., & Roszkowski, S. (2023). Phytoremediation as an Effective Remedy for Removing Trace Elements from Ecosystems. *Plants*, *12*(8), 1653. https://doi.org/10.3390/plants12081653

Mupangwa, W., Nyagumbo, I., Liben, F., Chipindu, L., Craufurd, P., & Mkuhlani, S. (2021). Maize yields from rotation and intercropping systems with different legumes under conservation agriculture in contrasting agro-ecologies. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *306*, 107170. https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107170

Navarro, B. L., Hanekamp, H., Koopmann, B., & Von Tiedemann, A. (2020). Diversity of Expression Types of Ht Genes Conferring Resistance in Maize to *Exserohilum turcicum*. *Frontiers in Plant Science*, *11*, 607850. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.607850

Nigussie, A., Haile, W., Agegnehu, G., & Kiflu, A. (2021). Growth, Nitrogen Uptake of Maize (*Zea mays* L.) and Soil Chemical Properties, and Responses to Compost and Nitrogen Rates and Their Mixture on Different Textured Soils: Pot Experiment. *Applied and Environmental Soil Science*, *2021*, 1-12. https://doi.org/10.1155/2021/9931763

Obour, P. B., Arthur, I. K., & Owusu, K. (2022). The 2020 Maize Production Failure in Ghana: A Case Study of Ejura-Sekyedumase Municipality. *Sustainability*, *14*(6), 3514. https://doi.org/10.3390/su14063514

Palemón Alberto, F., Reyes García, G., Gómez Montiel, N. O., Sierra Macías, M., Preciado Ortiz, R. E., & Ortega Acosta, S. Á. (2019). Genotipos de maíz con potencial forrajero para las condiciones de secano del estado de Guerrero, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *10*(8), 1895-1901. https://doi.org/10.29312/remexca.v10i8.1691

Pierre, J. F., Latournerie-Moreno, L., Garruña-Hernández, R., Jacobsen, K. L., Guevara-Hernández, F., Laboski, C. A. M., & Ruiz-Sánchez, E. (2022). Maize legume intercropping systems in southern Mexico: A review of benefits and challenges. *Ciência Rural*, *52*(11), e20210409. https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20210409

Raghuwanshi, M., Jha, A. K., Verma, B., Sahu, M. P., & Dubey, A. (2023). Assessing the Effect of Weed Management Practices on Weed Flora, Growth and Yield of Fodder Maize (*Zea mays* L.). *International Journal of Plant & Soil Science*, *35*(11), 112-120. https://doi.org/10.9734/ijpss/2023/v35i112952

Raza, A., Zahra, N., Hafeez, M. B., Ahmad, M., Iqbal, S., Shaukat, K., & Ahmad, G. (2020). Nitrogen Fixation of Legumes: Biology and Physiology. En M. Hasanuzzaman, S. Araújo, & S. S. Gill (Eds.), *The Plant*

Family Fabaceae (pp. 43-74). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4752-2_3

Roy, A., Moradkhani, H., Mekonnen, M., Moftakhari, H., & Magliocca, N. (2024). Towards strategic interventions for global food security in 2050. *Science of The Total Environment*, *954*, 176811. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176811

Saboor, A., Ali, M. A., Hussain, S., El Enshasy, H. A., Hussain, S., Ahmed, N., Gafur, A., Sayyed, R. Z., Fahad, S., Danish, S., & Datta, R. (2021). Zinc nutrition and arbuscular mycorrhizal symbiosis effects on maize (*Zea mays* L.) growth and productivity. *Saudi Journal of Biological Sciences*, *28*(11), 6339-6351. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.06.096

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2021). *Climas del Perú: Mapa de clasificación climática nacional* (1.ª ed.). Ministerio del Ambiente. https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01404SENA-4.pdf

Silva, L. S., Laroca, J. V. D. S., Coelho, A. P., Gonçalves, E. C., Gomes, R. P., Pacheco, L. P., Carvalho, P. C. D. F., Pires, G. C., Oliveira, R. L., Souza, J. M. A. D., Freitas, C. M., Cabral, C. E. A., Wruck, F. J., & Souza, E. D. D. (2022). Does grass-legume intercropping change soil quality and grain yield in integrated crop-livestock systems? *Applied Soil Ecology*, *170*, 104257. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104257

Soe Htet, M. N., Hai, J.-B., Bo, P. T., Gong, X.-W., Liu, C.-J., Dang, K., Tian, L.-X., Soomro, R. N., Aung, K. L., & Feng, B.-L. (2021). Evaluation of Nutritive Values through Comparison of Forage Yield and Silage Quality of Mono-Cropped and Intercropped Maize-Soybean Harvested at Two Maturity Stages. *Agriculture*, *11*(5), 452. https://doi.org/10.3390/agriculture11050452

Soto-Gómez, D., & Pérez-Rodríguez, P. (2022). Sustainable agriculture through perennial grains: Wheat, rice, maize, and other species. A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *325*, 107747. https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107747

Suárez, J. C., Anzola, J. A., Contreras, A. T., Salas, D. L., Vanegas, J. I., Urban, M. O., Beebe, S. E., & Rao, I. M. (2022). Influence of Simultaneous Intercropping of Maize-Bean with Input of Inorganic or Organic Fertilizer on Growth, Development, and Dry Matter Partitioning to Yield Components of Two Lines of Common Bean. *Agronomy*, *12*(5), 1216. https://doi.org/10.3390/agronomy12051216

Uher, D., Svečnjak, Z., Dujmović-Purgar, D., Jareš, D., & Horvatić, I. (2019). INFLUENCE OF INTERCROPPING MAIZE WITH CLIMBING BEAN ON FORAGE YIELD AND QUALITY. *AGROFOR*, *4*(3). https://doi.org/10.7251/AGRENG1903060U

Vásquez, H. V., Vigo, C. N., Saravia, D., Valqui, L., & Bobadilla, L. G. (2024). Agronomic performance of forage corn for cattle feeding in Amazonas, Peru. *Heliyon*, *10*(9), e30790. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30790

Villalba, J. J., Ates, S., & MacAdam, J. W. (2021). Non-fiber Carbohydrates in Forages and Their Influence on Beef Production Systems. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *5*, 566338. https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.566338

Wang, W., Li, M.-Y., Zhou, R., Mo, F., Khan, A., Batool, A., Zhang, W., Lu, J.-S., Zhu, Y., Wang, B.-Z., Yang, Y.-M., Wang, J., Tao, X.-P., & Xiong, Y.-C. (2023). Leaf senescence, nitrogen remobilization, and productivity of maize in two semiarid intercropping systems. *European Journal of Agronomy*, *150*, 126943. https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126943

Wang, X., Chen, Y., Yang, K., Duan, F., Liu, P., Wang, Z., & Wang, J. (2021). Effects of legume intercropping and nitrogen input on net greenhouse gas balances, intensity, carbon

footprint and crop productivity in sweet maize cropland in South China. *Journal of Cleaner Production*, *314*, 127997. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127997

Wolińska, A., Kruczyńska, A., Podlewski, J., Słomczewski, A., Grządziel, J., Gałązka, A., & Kuźniar, A. (2022). Does the Use of an Intercropping Mixture Really Improve the Biology of Monocultural Soils?—A Search for Bacterial Indicators of Sensitivity and Resistance to Long-Term Maize Monoculture. *Agronomy*, *12*(3), 613. https://doi.org/10.3390/agronomy12030613

Wuest, S. E., Peter, R., & Niklaus, P. A. (2021). Ecological and evolutionary approaches to improving crop variety mixtures. *Nature Ecology & Evolution*, *5*(8), 1068-1077. https://doi.org/10.1038/s41559-021-01497-x

Zhang, H., Shi, W., Ali, S., Chang, S., Jia, Q., & Hou, F. (2022). Legume/Maize Intercropping and N Application for Improved Yield, Quality, Water and N Utilization for Forage Production. *Agronomy*, *12*(8), 1777. https://doi.org/10.3390/agronomy12081777

Zhang, R., Ma, S., Li, L., Zhang, M., Tian, S., Wang, D., Liu, K., Liu, H., Zhu, W., & Wang, X. (2021). Comprehensive utilization of corn starch processing by-products: A review. *Grain & Oil Science and Technology*, *4*(3), 89-107. https://doi.org/10.1016/j.gaost.2021.08.003

Zou, C., Ding, L., Zhang, Y., Wang, P., Chen, C., & Long, Z. (2021). Intercropping Effects of Sophora davidii and Silage Maize on Soil Physicochemical Properties, Enzyme Activities and Yield. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *769*(3), 032032. https://doi.org/10.1088/1755-1315/769/3/032032