

Artículo:

Síntesis cuantitativa multiambiental de la producción y calidad del forraje y estabilidad del rendimiento en genotipos de sorgo forrajero

Multi-environment quantitative synthesis of forage production and quality, and yield stability in forage sorghum genotypes

Ulises Aranda-Lara¹, Moisés Felipe-Victoriano², Jesús A. López-Guzmán³, Fernando Lucio-Ruiz⁴, Jorge Elizondo-Barrón⁵, Jonathan Raúl Garay-Martínez^{2*}

Revista Interdisciplinaria de Ingeniería Sustentable y Desarrollo Social

Editada por el **Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Tantoyuca**

Desv. Lindero Tametate, S/N
Col. La Morita
C.P. 92100
Tantoyuca, Veracruz, México.

Correo electrónico:
revistadigital@itsta.edu.mx

Sitio WEB
<https://revista-riisds.mx/>

ISSN [2448-8003](https://doi.org/10.63728/riisds.v12i1.416)

Editor responsable:
Dr. Horacio Bautista Santos

Recibido: **05 de enero de 2026**
Aceptado: **25 de febrero de 2026**
Publicado: **01 de marzo de 2026**

Como citar este artículo:

Aranda-Lara, U., Felipe-Victoriano, M., López-Guzmán, J. A., Lucio-Ruiz, F., Elizondo-Barrón, J., & Garay Martínez, J. R. (2026). Síntesis cuantitativa multiambiental de la producción y calidad del forraje y estabilidad del rendimiento en genotipos de sorgo forrajero. *Revista Interdisciplinaria De Ingeniería Sustentable Y Desarrollo Social*, 12(1).

<https://doi.org/10.63728/riisds.v12i1.416>

Copyright: Este artículo es de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Bajío, Guanajuato, México.

² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Las Huastecas, Tamaulipas, México.

³ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Valle de Culiacán, Sinaloa, México.

⁴ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental San Luis, San Luis Potosí, México.

⁵ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Río Bravo, Tamaulipas, México.

* Autor corresponsal: garay.jonathan@inifap.gob.mx

Resumen: El sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] es un cultivo estratégico para sistemas de producción pecuaria en regiones con alta variabilidad ambiental, debido a su elevada capacidad de producción de biomasa y su utilidad para la conservación de forraje. El objetivo de este estudio fue evaluar de manera integrada el rendimiento, la estabilidad y la adaptación multiambiental de cinco genotipos de sorgo forrajero (197-1, Arcos, Fortuna, Paloma y Williams), mediante la síntesis cuantitativa de información proveniente de tres estudios independientes considerados como ambientes contrastantes. Se analizaron variables de producción, calidad del forraje y composición morfológica, utilizando medianas como estimadores robustos del desempeño típico, se aplicaron análisis descriptivos de estabilidad y representaciones gráficas tipo GGA con base en la materia seca total (MST). Los resultados mostraron que 197-1 presentó las mayores medianas de materia verde total (64.9 t ha⁻¹) y de MST (15.3 t ha⁻¹), superando a Fortuna en un 34 % y duplicando el rendimiento típico de Paloma y Williams. El análisis GGA indicó que 197-1 fue el mejor genotipo en dos de los tres ambientes y el más cercano al genotipo ideal, combinando un alto rendimiento promedio con una estabilidad aceptable. En términos de calidad, los genotipos de menor rendimiento presentaron mayores concentraciones de proteína cruda (72-76 g kg⁻¹ MS) y de digestibilidad in vitro (>700 g kg⁻¹ MS), lo que evidencia un gradiente rendimiento-calidad. En conjunto, los resultados confirman el alto potencial productivo y la adaptación multiambiental del genotipo 197-1, particularmente adecuado para sistemas de producción de forraje orientados a la conservación.

Palabras clave: estabilidad productiva, interacción genotipo × ambiente, análisis GGA.

Abstract

Sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] is a strategic crop for livestock production systems in regions with high environmental variability, due to its high biomass production capacity and suitability for forage conservation. The objective of this study was to integratively evaluate the yield, stability, and multi-environment adaptation of five forage sorghum genotypes (197-1, Arcos, Fortuna, Paloma, and Williams) through a quantitative synthesis of data from three independent studies, each conducted in a contrasting environment. Production traits, forage quality variables, and morphological composition were analyzed using medians as robust estimators of typical performance, and descriptive stability analyses and GGE biplot representations were applied based on total dry matter (TDM). The results showed that 197-1 had the highest medians for total fresh biomass (64.9 t ha⁻¹) and total dry matter (15.3 t ha⁻¹), outperforming Fortuna by 34 % and doubling the typical yields of Paloma and Williams. GGE analysis indicated that 197-1 was the winning genotype in two of the three environments and the closest to the ideal genotype, combining high average yield with acceptable stability. In contrast, lower-yielding genotypes showed higher crude protein concentrations (72-76 g kg⁻¹ DM) and in vitro digestibility (>700 g kg⁻¹ DM), confirming a yield-quality gradient. Overall, the results confirm the high productive potential and multi-environment adaptation of genotype 197-1, making it particularly suitable for forage production systems oriented toward conservation.

Keywords: yield stability, genotype × environment interaction, GGE analysis.

Introducción

El sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] es uno de los cultivos más utilizados en sistemas de producción pecuaria de regiones tropicales y subtropicales, debido a su alta capacidad de producción de biomasa, tolerancia relativa a condiciones de estrés hídrico y versatilidad en su uso como forraje verde o ensilaje (Rosa *et al.*, 2022; Guzmán-Ochoa *et al.*, 2026). Estas características lo convierten en un componente estratégico para sistemas forrajeros que buscan maximizar la producción de materia seca por unidad de superficie y asegurar la disponibilidad de alimento durante periodos de escasez estacional (Garay-Martínez *et al.*, 2025).

No obstante, el desempeño productivo de los genotipos de sorgo forrajero está fuertemente condicionado por la interacción genotipo \times ambiente (G \times A), ya que factores ambientales, condiciones edáficas y el manejo agronómico pueden modificar significativamente el rendimiento, la composición morfológica y la calidad del forraje. Como resultado, los estudios monoambientales suelen reportar respuestas contrastantes, lo que dificulta la comparación directa entre ensayos y limita la identificación de genotipos con adaptación amplia y desempeño consistente en diferentes ambientes productivos (Yan *et al.*, 2000; Yan y Kang, 2003; Williams *et al.*, 2021).

En este contexto, los enfoques de análisis multiambientales y de estabilidad se han utilizado ampliamente para integrar información de múltiples ensayos y evaluar conjuntamente el rendimiento promedio y la consistencia inter-ambiental de los genotipos. Entre estos enfoques, el análisis GGA (genotipo + interacción genotipo \times ambiente) permite visualizar patrones de adaptación específica y general, identificar genotipos ganadores por ambiente y evaluar el equilibrio entre productividad y estabilidad, sin requerir supuestos estrictos de homogeneidad de las varianzas (Yan *et al.*, 2000; Yan y Kang, 2003; Aranda *et al.*, 2024).

Cuando la información disponible proviene de estudios independientes y heterogéneos, una limitación frecuente es la falta de uniformidad en el reporte de varianzas, errores estándar o tamaños de muestra, lo que restringe la aplicación de meta-análisis formales. En estos casos, las síntesis cuantitativas descriptivas, apoyadas en estadísticos robustos y en herramientas gráficas de estabilidad, representan una alternativa metodológica válida para consolidar la evidencia y comparar patrones productivos entre genotipos bajo diferentes condiciones ambientales (Brown *et al.*, 2020; Nakagawa *et al.*, 2023).

Desde una perspectiva forrajera, la materia seca total (MST) constituye una variable central de evaluación, ya que determina la eficiencia en la producción de forraje conservable (Guzmán-Ochoa *et al.*, 2026) y la capacidad de generar reservas estratégicas para la alimentación animal (Márquez-Godoy *et al.*, 2025). Sin embargo, incrementos en la producción de biomasa suelen estar asociados con cambios en la composición estructural del cultivo y con un gradiente rendimiento-calidad, lo que obliga a interpretar los resultados de forma integral, considerando tanto la cantidad producida como sus implicaciones agronómicas y nutricionales (Capstaff y Miller, 2018; Da Silva *et al.*, 2026).

El objetivo del presente estudio fue evaluar de manera integrada el rendimiento, la estabilidad y su adaptación multiambiental de cinco genotipos de sorgo forrajero, mediante la síntesis cuantitativa de resultados provenientes de tres estudios independientes, utilizando la materia seca total como variable central, junto con indicadores complementarios de calidad, composición morfológica y análisis de estabilidad tipo GGA, con énfasis en su utilidad para sistemas de producción y conservación de forraje.

Materiales y métodos

Diseño general del estudio

El estudio se desarrolló como una síntesis cuantitativa multiambiental basada en la integración y el análisis comparativo de resultados experimentales de tres estudios independientes previamente publicados. En este enfoque, cada estudio se consideró un ambiente, debido a que los ensayos difirieron en el año, en las condiciones edafoclimáticas y en el manejo agronómico. Este tipo de integración es útil cuando se busca consolidar evidencia cuantitativa disponible y comparar patrones productivos y de estabilidad sin aplicar un meta-análisis ponderado por varianza; por ejemplo, cuando no se reportan errores estándar o varianzas de forma homogénea (Brown *et al.*, 2020; Nakagawa *et al.*, 2023).

Estudios incluidos y definición de ambientes

Se integraron datos de tres estudios arbitrados, considerados ambientes independientes para el análisis comparativo y de estabilidad:

- Ambiente 1 (Estudio 1): Evaluación del rendimiento y del valor nutritivo de genotipos de sorgo forrajero bajo condiciones contrastantes relacionadas con el crecimiento y el desempeño productivo (Lucio-Ruiz *et al.*, 2023).
- Ambiente 2 (Estudio 2): Evaluación del rendimiento de forraje y de rasgos morfológicos en condiciones cálido-subhúmedas (Guzmán-Ochoa *et al.*, 2025).
- Ambiente 3 (Estudio 3): Evaluación del rendimiento, de la composición nutricional y de la estabilidad aeróbica de ensilados elaborados con genotipos de sorgo. (Guzmán-Ochoa *et al.*, 2026).

A partir de estos estudios, se extrajeron valores reportados explícitamente (Cuadros/Figuras) y se organizaron en una matriz genotipo × ambiente, con tres repeticiones por genotipo en cada ambiente (cuando estuvieron disponibles en la base consolidada).

Material genético evaluado

Se evaluaron cinco genotipos de sorgo forrajero: 197-1, Arcos, Fortuna, Paloma y Williams, seleccionados por su recurrencia en los estudios integrados y por su relevancia comparativa (Lucio-Ruiz *et al.*, 2023; Guzmán-Ochoa *et al.*, 2025). Para evitar errores de asignación, se verificó la nomenclatura del material 197-1, diferenciándolo de otras denominaciones similares que podrían inducir confusión en fuentes secundarias.

Variables analizadas y estandarización

Se integraron variables de productividad y calidad del forraje:

- Materia verde total (MVT; t ha⁻¹) y materia seca total (MST; t ha⁻¹).
- Proteína cruda (PC) estandarizada a g kg⁻¹ de MS. Cuando PC estuvo reportada como % MS, se convirtió en g kg⁻¹ MS al multiplicarla por 10.
- Digestibilidad *in vitro* (DIV) de la MS, en g kg⁻¹ de MS (se respetó el valor publicado; no se recalculó debido a cambios metodológicos entre los estudios).
- Para la composición morfológica, se integraron proporciones (%) de hoja, tallo, panoja y materia muerta, y se resumieron como media multiambiental y su variación relativa.

Procedimiento de extracción y estandarización de datos

Los datos se integraron mediante un flujo estandarizado:

1. Identificación de cuadros/figuras con valores promedio por genotipo.
2. Captura por genotipo × ambiente y por repetición cuando estuvo disponible.
3. Homologación de unidades (especialmente PC y DIV).
4. Verificación de la consistencia en los nombres de los genotipos.
5. Cálculo estadístico de síntesis (medias, medianas, dispersión y estabilidad relativa).

Dado que la base consolidada integra estudios con diferencias en condiciones edafoclimáticas, manejo y forma de reporte, y que este tipo de datos multiambientales puede presentar asimetría y valores extremos (respuestas altas o bajas en ambientes particulares), además de tamaños de muestra reducidos por ambiente, los resultados descriptivos por genotipo se resumieron principalmente mediante la mediana, como estimador del valor “típico”. La mediana es una medida de tendencia central robusta, con alta resistencia a los valores atípicos (punto de quiebre cercano a 50 %) y menor sensibilidad que la media, cuando la distribución no es aproximadamente normal o está afectada por observaciones extremas;

por ello, su uso reduce el sesgo interpretativo en comparaciones multiambientales y complementa la visualización con boxplots (Rousseeuw y Hubert, 2018; 2011)

Análisis de estabilidad productiva (MST) y su representación

Debido a que los estudios fuente no necesariamente reportan de forma consistente errores estándar, tamaños de muestra comparables o varianzas, no se aplicó un modelo formal AMMI/GGA (efectos principales aditivos e interacción multiplicativa/genotipo + interacción genotipo \times ambiente) con inferencia estadística completa. En su lugar, se aplicó un análisis de estabilidad comparativo y descriptivo, ampliamente utilizado para clasificar genotipos según la producción y la consistencia entre ambientes, mediante medidas basadas en la media y la variabilidad relativa (Francis y Kannenberg, 1978). El análisis se realizó utilizando la ecuación 1, como variable principal la materia seca total (MST).

Rendimiento promedio inter-ambientes (media de MST).

$$\bar{Y}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n Y_{ij} \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde: Y_{ij} es el valor de la variable de respuesta del genotipo i en el ambiente j , y n es el número total de ambientes evaluados.

Coefficiente de variación (CV, %) como medida de variabilidad relativa inter-ambientes (Ecuación 2).

$$CV_i(\%) = \frac{SD_i}{\bar{Y}_i} \times 100 \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde: SD_i es la desviación estándar del rendimiento del genotipo i a través de los ambientes (estudios).

Como complemento visual, se aplicó una representación tipo GGA (biplot “¿quién gana dónde?” y “genotipo ideal”) para MST, como herramienta gráfica para interpretar el desempeño y la adaptación en ensayos multiambientales (Yan *et al.*, 2000; Yan y Kang, 2003). Además, se generó un biplot de estabilidad (MST), en el que el eje principal representa el desempeño promedio de los genotipos, mientras que el eje secundario expresa la inestabilidad relativa, de acuerdo con la interpretación clásica del análisis GGA (Yan *et al.*, 2000; Yan y Kang, 2003).

El procesamiento de la base de datos y la generación de las figuras se realizaron utilizando el lenguaje de programación Python (Versión 3.10). La organización, el filtrado y el cálculo de estadísticos descriptivos (medianas, rangos intercuartílicos y coeficientes de variación) se

llevaron a cabo mediante la librería *pandas*, apoyada por *NumPy* para las operaciones numéricas. La visualización de los resultados se realizó con *Matplotlib* y *Seaborn*, empleados para la construcción de diagramas de caja y mapas de calor. Para la representación gráfica tipo GGA biplot, los componentes principales se obtuvieron mediante rutinas de análisis multivariado basadas en *SciPy*, y su interpretación se realizó siguiendo un enfoque descriptivo orientado a la comparación del desempeño y la estabilidad de los genotipos entre ambientes (Harris *et al.*, 2020; Virtanen *et al.*, 2020; Chaudekar, 2022).

Resultados y discusión

Rendimiento de materia verde (MVT) y materia seca total (MST)

Con base en la distribución multiambiental de los datos, el genotipo 197-1 presentó la mayor mediana de materia verde total (64.9 t ha^{-1}) y de materia seca total (15.3 t ha^{-1}), superando consistentemente a los demás materiales evaluados (Figura 1). Fortuna mostró un desempeño intermedio, mientras que Paloma y Williams registraron las medianas de rendimiento más bajas (Figura 1). Esta jerarquía confirma que algunos genotipos presentan una mayor tendencia fisiológica a acumular biomasa en un conjunto de ambientes variables, lo cual es clave en sistemas ganaderos con alta demanda de forraje (Nava-Berumen *et al.*, 2018; Lucio-Ruiz *et al.*, 2023).

En contraste con la producción, los genotipos de menor rendimiento (Paloma y Williams) presentaron valores medianos elevados de digestibilidad *in vitro* de la MS ($>700 \text{ g kg}^{-1}$ de MS) y contenidos relativamente altos de proteína cruda (entre 72 y 75 g kg^{-1} de MS), lo que evidencia un gradiente rendimiento-calidad entre los materiales (Figura 1). Este patrón es consistente con la literatura que documenta que mayores rendimientos de biomasa suelen asociarse con menores valores de calidad nutricional, particularmente de digestibilidad y concentración de proteína, debido a efectos de dilución de nutrientes en tejidos estructurales más abundantes (Capstaff y Miller, 2018; Guzmán-Ochoa *et al.*, 2026).

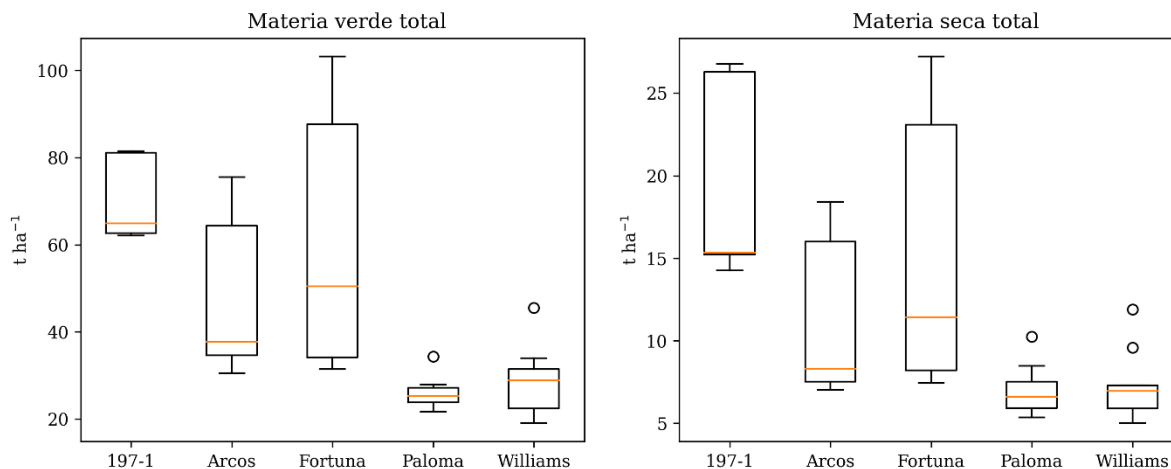


Figura 1. Distribución multiambiental de la producción de materia verde y materia seca en cinco genotipos de sorgo forrajero. Los boxplots integran tres ambientes con repeticiones. Las cajas representan el rango intercuartílico (Q1–Q3), la línea, la mediana; los bigotes, los valores no atípicos ($1.5 \times$ rango intercuartílico); y los puntos, los valores atípicos.

El genotipo 197-1 presentó la mayor mediana de MST (15.33 t ha^{-1}) en la síntesis cuantitativa multiambiental considerada (Fig. 1). En comparación con Fortuna (11.43 t ha^{-1}), la mediana de MST de 197-1 fue aproximadamente 34 % superior; mientras que frente a Arcos (8.29 t ha^{-1}), Paloma (6.60 t ha^{-1}) y Williams (6.94 t ha^{-1}) las diferencias fueron aún más marcadas, superándolos en más de 80 %. Estos resultados evidencian una clara diferenciación genética en la capacidad de acumulación de materia seca, un atributo clave en sorgos forrajeros destinados a sistemas de corte y conservación. Desde una perspectiva productiva, mayores rendimientos de MST implican una mayor eficiencia en la producción de forraje por unidad de superficie, lo cual resulta particularmente relevante en sistemas forrajeros donde la disponibilidad de suelo, agua o insumos puede ser limitada (Ramírez *et al.*, 2024). En este contexto, la superioridad de 197-1 sugiere un mayor potencial para maximizar la oferta de forraje conservable (ensilado), en comparación con materiales de menor producción típica (Guzmán-Ochoa *et al.*, 2026).

Además, en cultivos forrajeros anuales como el sorgo, la acumulación de materia seca es un criterio determinante para la viabilidad y eficiencia de la conservación, ya que un mayor volumen de MS por hectárea permite incrementar las reservas estratégicas de alimento para la época seca, reducir la dependencia de insumos externos y mejorar la estabilidad del sistema de alimentación animal (Bautista-Martínez *et al.*, 2021; Garay-Martínez *et al.*, 2025). En este

sentido, genotipos con medianas elevadas y consistentes de MST, como 197-1, representan una ventaja operativa para programas de producción de forraje conservado, al facilitar la planificación de la cosecha, el llenado de silos y la obtención de mayores volúmenes de alimento por ciclo agrícola.

Proteína cruda (PC) y digestibilidad in vitro (DIV)

La PC mostró un patrón distinto al observado en las variables productivas (MVT y MST). Con base en las medianas multiambientales, el genotipo 197-1 presentó valores relativamente más bajos de PC (66 g kg⁻¹ de MS), mientras que Fortuna alcanzó las mayores concentraciones (76 g kg⁻¹ de MS), lo que representa una diferencia cercana al 15 % respecto a 197-1. De manera similar, Paloma, Williams y Arcos registraron valores de PC superiores a 197-1, con medianas de 72 a 76 g kg⁻¹ de MS (Figura 2). Este comportamiento indica que la ventaja principal de 197-1 se concentra en la acumulación de biomasa, más que en la maximización de la concentración proteica, lo cual concuerda con una relación inversa habitual entre el rendimiento y la concentración de algunos componentes químicos en gramíneas forrajeras (Capstaff y Miller, 2018; Lucio *et al.*, 2023).

Se observó un patrón análogo en la DIV (Figura 2). El genotipo 197-1 presentó una mediana cercana a 660 g kg⁻¹ de MS, mientras que Paloma y Williams alcanzaron los valores más altos (705 y 702 g kg⁻¹ de MS, respectivamente), superando a 197-1 en aproximadamente un 6-7 %. Fortuna y Arcos también mostraron medianas superiores (679 y 676 g kg⁻¹ de MS), lo que confirma que los materiales de menor rendimiento tienden a presentar una mayor digestibilidad del forraje (Figura 2). Este comportamiento ha sido ampliamente documentado en cultivos forrajeros, donde una mayor proporción de tejidos estructurales, asociada a altos rendimientos de biomasa, suele traducirse en menores coeficientes de digestibilidad (Capstaff y Miller, 2018; Guzmán-Ochoa *et al.*, 2026).

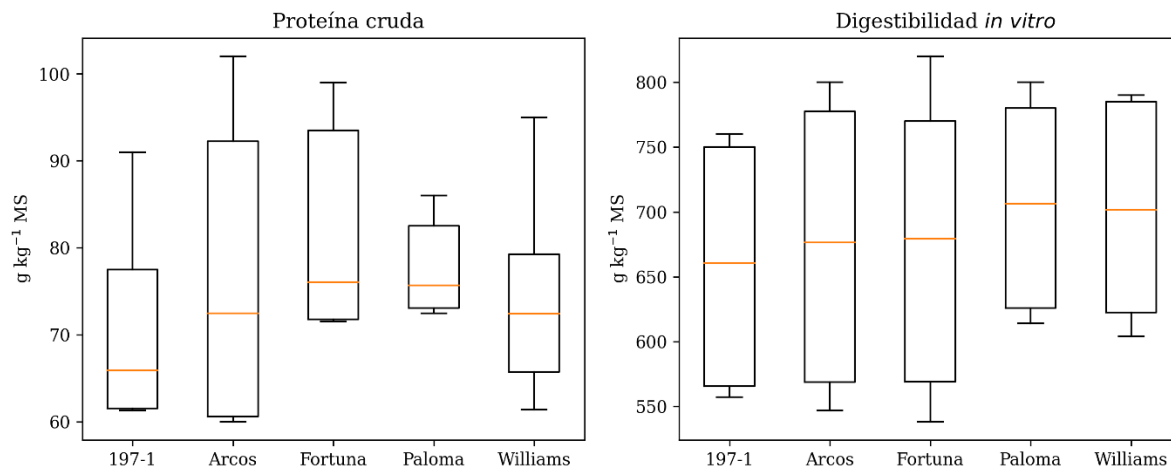


Figura 2. Distribución multiambiental de la proteína cruda y digestibilidad *in vitro* en cinco genotipos de sorgo forrajero. Los boxplots integran tres ambientes con repeticiones. Las cajas representan el rango intercuartílico (Q1–Q3), la línea, la mediana y los bigotes, los valores no atípicos ($1.5 \times$ rango intercuartílico).

En conjunto, los resultados de PC y DIV refuerzan la idea de que el perfil agronómico de 197-1 es predominantemente productivo, mientras que genotipos como Paloma y Williams destacan por una mayor calidad relativa del forraje. Por ello, la interpretación integral del comportamiento multiambiental debe considerar el equilibrio entre rendimiento y calidad, según el destino del forraje (verde, heno o ensilaje), la categoría animal y la estrategia de suplementación, más que privilegiar un solo atributo de manera aislada (Cooke *et al.*, 2025; Guzmán-Ochoa *et al.*, 2026).

Composición morfológica de genotipos de sorgo

La composición morfológica de los genotipos de sorgo mostró patrones contrastantes entre los materiales, tanto en la proporción relativa de sus componentes como en su estabilidad multiambiental (Figura 3). En términos de hoja, las mayores proporciones correspondieron al genotipo Fortuna (43.0 %), seguido de Williams (36.5 %), Arcos (34.3 %) y Paloma (33.2 %), mientras que 197-1 presentó la menor proporción foliar (26.3 %). No obstante, los coeficientes de variación ($CV \approx 17\text{--}21\%$) indican una estabilidad moderada de este componente entre los ambientes para todos los genotipos, lo que sugiere que la fracción de hoja es relativamente menos sensible a la variación ambiental que otros órganos. El tallo fue el componente dominante en 197-1 (55.9 %), superando ampliamente al resto de los genotipos, cuyos valores oscilaron entre 30.3 y 43.2 %. Esta característica explica, en parte,

su elevado rendimiento de biomasa y su estabilidad productiva, ya que el tallo constituye el principal reservorio de materia seca en sorgos forrajeros destinados al corte y la conservación (Rosa *et al.*, 2022; Guzmán-Ochoa *et al.*, 2026).

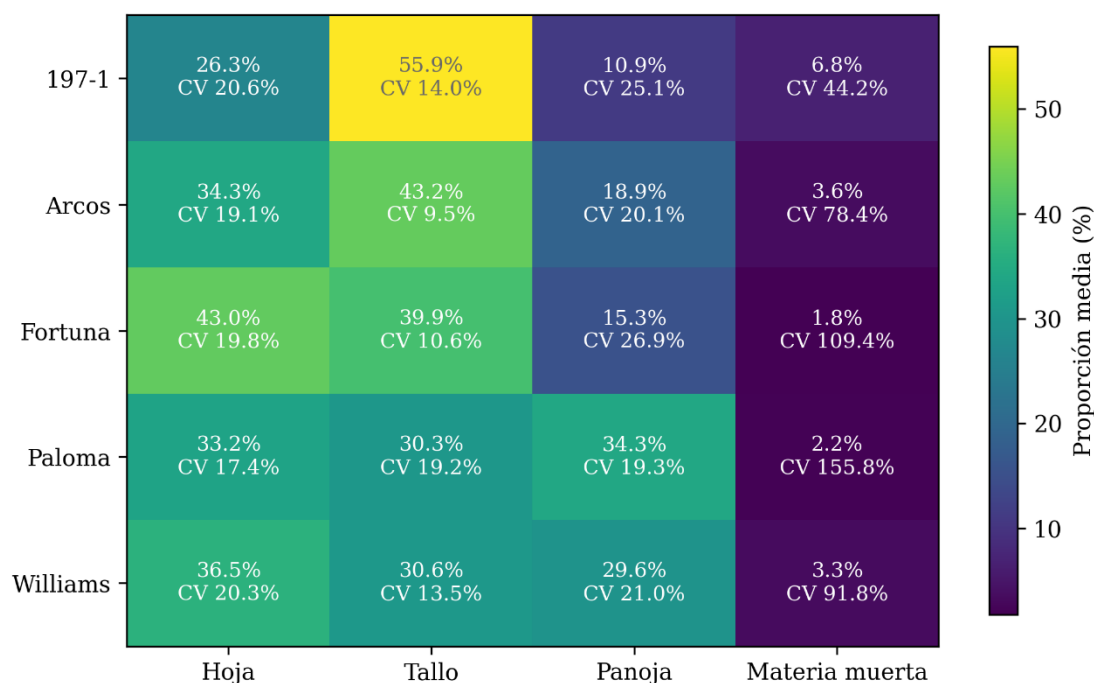


Figura 3. Mapa de calor fusionado de la partición morfológica del forraje (proporción de hoja, tallo, panoja y materia muerta, %) en cinco genotipos de sorgo forrajero, integrando tres ambientes. El color de cada celda representa la proporción media multiambiental (%) y el texto dentro de la celda muestra: arriba la media (%) y abajo el coeficiente de variación (CV, %) entre ambientes/repeticiones, como indicador de consistencia relativa de la partición morfológica.

La panoja mostró una mayor participación en Paloma (34.3 %) y en Williams (29.6 %), mientras que 197-1 presentó la menor proporción (10.9 %). En general, la fracción panoja presentó CV moderados a altos (≈ 19 –27 %), lo que refleja una respuesta más dependiente del ambiente y del estado fenológico, particularmente en genotipos con mayor tendencia reproductiva. La mayor contribución de panoja en algunos materiales puede influir positivamente en el contenido energético del forraje, pero también implica un menor aporte relativo de tejidos vegetativos, relevantes para la producción total de biomasa conservable (Rosa *et al.*, 2022; Da Silva *et al.*, 2026).

La materia muerta representó una fracción minoritaria en todos los genotipos (< 7 %), aunque con CV extremadamente altos (44–156 %), lo que evidencia una alta variabilidad ambiental y fenológica de este componente. Esta variabilidad sugiere que la presencia de material

senescente está fuertemente influenciada por factores como el momento de corte, el estrés hídrico y la duración del ciclo, más que por diferencias genéticas *per se*. A pesar de su baja proporción, la materia muerta puede afectar negativamente la calidad del forraje conservado si no se controla adecuadamente el momento de cosecha (Oliveira *et al.*, 2024; Guzmán-Ochoa *et al.*, 2025).

En conjunto, los resultados indican que 197-1 presenta un perfil morfológico claramente orientado a la producción de biomasa, caracterizado por una alta proporción y estabilidad del tallo, lo cual resulta ventajoso para sistemas de producción de forraje destinados al ensilaje o la henificación, donde el volumen de materia seca por unidad de área es prioritario. En contraste, genotipos como Fortuna, Paloma y Williams muestran una mayor participación de hoja y panoja, lo que refleja estrategias morfológicas más balanceadas, potencialmente asociadas con una mejor calidad relativa, pero con menor acumulación total de biomasa. Estos contrastes refuerzan la necesidad de seleccionar genotipos en función del objetivo productivo, considerando tanto la cantidad de forraje como su composición estructural y su estabilidad en diferentes ambientes (Rosa *et al.*, 2022; Oliveira *et al.*, 2024; Da Silva *et al.*, 2026).

Adaptación, desempeño y estabilidad de genotipos en ambientes contrastantes (análisis GGA)

El biplot GGA de “¿quién gana dónde?” permitió identificar patrones de adaptación específicos y amplios entre los genotipos evaluados (Figura 4). Los genotipos ubicados en los vértices del polígono corresponden a los de mayor respuesta relativa en al menos uno de los sectores del espacio GGA, lo que facilita la identificación de genotipos ganadores por ambiente.

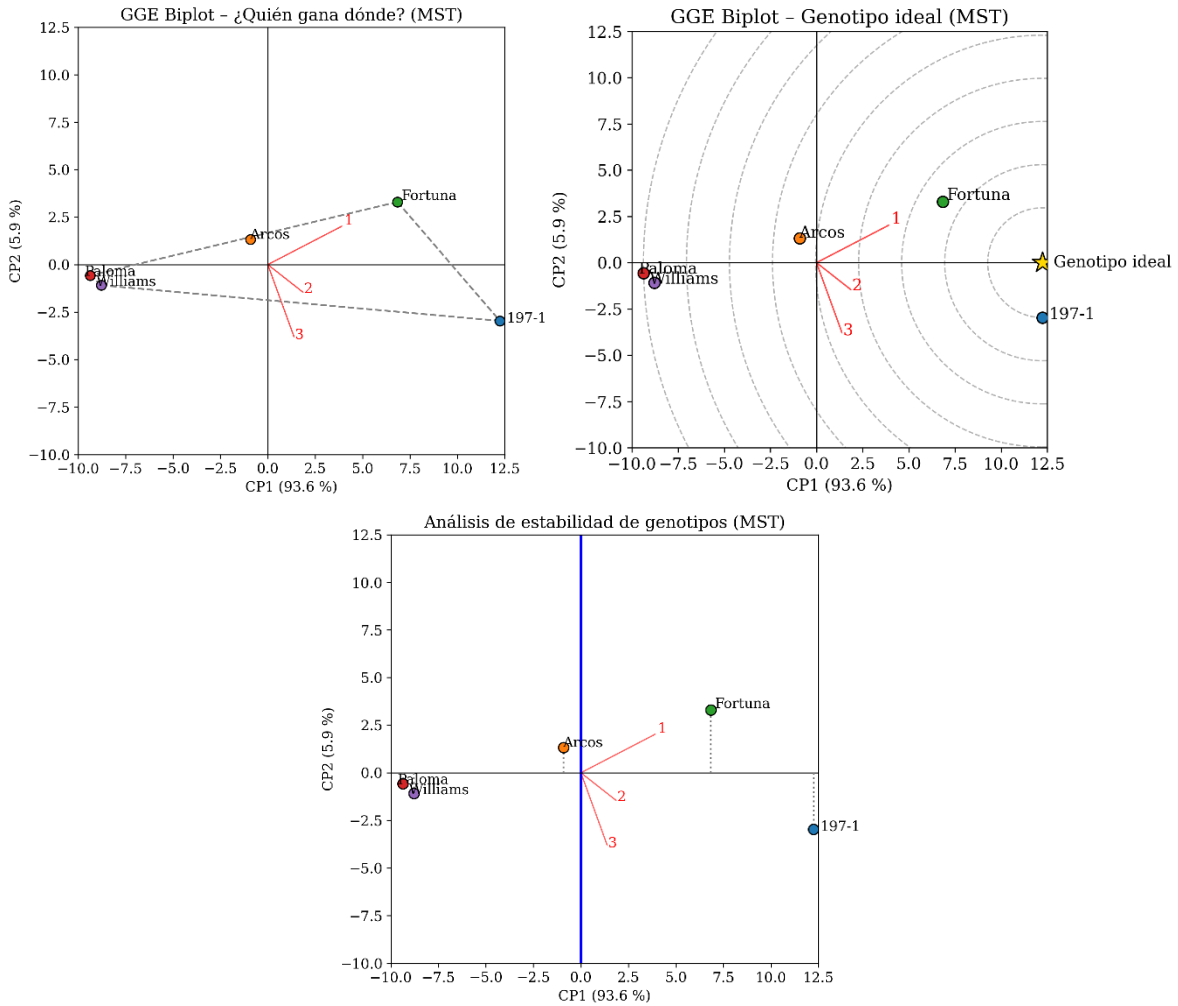


Figura 4. Biplot del análisis GGA de la materia seca total (MST) en cinco genotipos de sorgo forrajero evaluados en tres ambientes. Los gráficos se construyeron a partir de los dos primeros componentes principales (CP1 = 93.6 % y CP2 = 5.9 %), que concentran la mayor proporción de la variación del rendimiento promedio y de la interacción genotipo × ambiente, e integran las vistas estándar de “quién gana dónde”, genotipo ideal y estabilidad del rendimiento.

En este sentido, el Ambiente 1 se proyectó hacia el sector dominado por Fortuna, lo que indica que este genotipo presentó el mejor desempeño relativo en dichas condiciones. En contraste, los Ambientes 2 y 3 se asociaron con el sector donde se localiza 197-1, lo que sugiere que este material fue el de mayor rendimiento relativo en ambos ambientes. Este patrón indica que 197-1 combina una respuesta productiva dominante en dos de los tres ambientes evaluados, mientras que Fortuna exhibe una adaptación más específica, concentrando su ventaja en un solo ambiente. La coexistencia de estos comportamientos refleja una interacción genotipo × ambiente y ejemplifica la capacidad del enfoque GGA para

discriminar entre adaptación amplia y adaptación específica en términos de rendimiento de materia seca (Yan *et al.*, 2000; Yan y Kang, 2003). En el biplot de “genotipo ideal” (Figura 4), el punto ideal representa teóricamente al genotipo con rendimiento promedio máximo e inestabilidad mínima, mientras que los círculos concéntricos permiten comparar la proximidad relativa de cada material con este referente (Figura 4).

Bajo esta representación, 197-1 se ubicó como el genotipo más cercano al punto ideal, al combinar el mayor valor asociado al rendimiento promedio de MST con una desviación moderada respecto al eje de estabilidad. Fortuna se posicionó como el segundo competidor más cercano al genotipo ideal, reflejando un buen rendimiento medio, aunque con una mayor distancia al ideal que en 197-1. Por el contrario, Paloma y Williams se localizaron próximos al eje de estabilidad, pero claramente del lado del bajo rendimiento, por lo que no cumplen con el criterio de genotipo ideal desde una perspectiva productiva del rendimiento de MST. Esta representación confirma que 197-1 ofrece el mejor equilibrio entre la productividad y la estabilidad relativa entre los genotipos evaluados (Yan *et al.*, 2000; Yan y Kang, 2003).

El biplot de estabilidad con ambientes resume de manera integrada la relación entre rendimiento promedio e inestabilidad (Figura 4), donde el CP1 explicó la mayor proporción de la variación (93.6 %), asociada principalmente al desempeño medio en MST, mientras que el CP2 (5.9 %) reflejó la variación residual vinculada a la estabilidad (Figura 4). En este contexto, 197-1 y Fortuna se ubicaron en el lado positivo de CP1, lo que confirma su mayor potencial productivo en términos de materia seca total, mientras que Paloma y Williams quedaron en el lado negativo, asociados con menor producción de MST. Desde la perspectiva de la estabilidad, la cercanía al eje horizontal ($CP2 \approx 0$) indica una menor contribución de la interacción genotipo \times ambiente. Según este criterio, Paloma y Williams mostraron una mayor estabilidad relativa, aunque a costa de un bajo rendimiento, lo que limita su interés cuando el objetivo principal es maximizar la producción de forraje. En contraste, 197-1 mantuvo una clara ventaja productiva y una estabilidad aceptable, lo que lo posiciona como un material de adaptación amplia, capaz de sostener altos rendimientos de MST bajo condiciones ambientales contrastantes. Fortuna, aunque altamente productivo, mostró una mayor sensibilidad ambiental, lo cual es coherente con su comportamiento como genotipo ganador, especialmente en el Ambiente 1. En conjunto, estos resultados evidencian que el análisis GGA permite distinguir con claridad entre genotipos de adaptación amplia y

específica, proporcionando una base objetiva para priorizar materiales como 197-1, que combinan alto rendimiento promedio y estabilidad funcional, frente a genotipos con respuestas más localizadas o estables, pero de bajo potencial productivo (Yan *et al.*, 2000; Yan y Kang, 2003).

Conclusiones

La síntesis cuantitativa multiambiental de información de tres estudios independientes permitió evaluar conjuntamente el desempeño productivo y la estabilidad de genotipos de sorgo forrajero bajo condiciones contrastantes. En este contexto, el genotipo 197-1 destacó de manera consistente por presentar los mayores rendimientos de materia verde total y de materia seca total, lo que confirma su alto potencial productivo. Los análisis de estabilidad y los biplots GGA indicaron que 197-1 mantiene un comportamiento productivo competitivo en los ambientes evaluados, lo que evidencia una amplia adaptación y un desempeño confiable. El enfoque integrador empleado permitió identificar patrones de respuesta y de consistencia productiva que no resultan evidentes cuando los estudios se analizan de forma aislada. Estos resultados respaldan el potencial del genotipo 197-1 como material forrajero de alto rendimiento, particularmente adecuado para sistemas de producción que priorizan la disponibilidad de biomasa y la estabilidad interambiental.

Agradecimientos

Se agradece al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, por el financiamiento con fondos fiscales del proyecto: 10403734893- Obtención de híbridos o variedades de sorgo grano para las regiones productoras de México.

Referencias bibliográficas

- Aranda-Lara, U., Ledesma-Ramírez, L., Hernández Martínez, R., Ruiz-Ramírez, S., Gayosso-Barragán, O., Cid-Río, J., & Flores-Gallardo, H. (2024). Genotype by environment interaction of maize (*Zea mays* L.) hybrid yield in Guanajuato, Mexico. *Agro Productividad*, 17(9), 15-26. <https://doi.org/10.32854/agrop.v17i9.3024>
- Bautista-Martínez, Y., Granados-Zurita, L., Joaquín-Cancino, S., Ruiz-Albarrán, Garay-Martínez, J. R., Infante-Rodríguez, & Granados-Rivera, L. D. (2021). Factores que

- determinan la producción de becerros en el sistema vaca-cría del Estado de Tabasco, México. *Nova scientia*, 12(25), 1-22. <https://doi.org/10.21640/ns.v12i25.2117>
- Brown, D., Van Den Bergh, I., de Bruin, S., Machida, L., & van Etten, J. (2020). Data synthesis for crop variety evaluation: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 40(4), 25. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00630-7>
- Capstaff, N. M., & Miller, A. J. (2018). Improving the yield and nutritional quality of forage crops. *Frontiers Plant Science*, 9, 535. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00535>
- Chaudekar, S. 2022. An overview of Python for data analytics. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 9:461-468.
- Cooke, A. S., Storkey, J., Acquah, G. E., Lee, M. R. F., & Rivero, M. J. (2025). Trade-offs between forage nutrition and ruminant carrying capacity in response to fertiliser application – Findings from the Park Grass long-term experiment (1860–2020). *Field Crops Research*, 324, 109791. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2025.109791>
- Da Silva, M.F.P., Rigueira, J.P.S., da Silva, P.H.F., Portugal, A. F., Parrella, F. A. C., Monção, F. P., Júnior, V. R. R., Pereira, M. I. B., Araújo, I. V., S., & dos Santos, A. S. (2026). Selecting high-yield forage sorghum genotypes for ensiling: agronomic traits, fermentation parameters, and nutritional value. *Scientific Reports*, 16, 3815. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-34020-4>
- Francis, T. R., & Kannenberg, L. W. (1978). Yield stability studies in short-season maize. I. A descriptive method for grouping genotypes. *Canadian Journal of Plant Science*, 58(4), 1029-1034. <https://doi.org/10.4141/cjps78-157>
- Garay-Martínez, J. R., Godina-Rodríguez, J. E., Hernández-Rodríguez, B., Maldonado-Torres, A., López-Cantú, D. G., & Joaquín-Cancino, S. (2025). Caracterización de unidades de producción pecuaria en Aldama, Tamaulipas, México: productores, hato y alimentación animal. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 11(4), e4091. <https://doi.org/10.19136/era.a11niv.4091>
- Guzmán-Ochoa, G., Felipe-Victoriano, M., Aranda-Lara, U., Estrada-Drouaillet, B., & Garay-Martínez, J. R. (2025). Rendimiento de forraje y características morfológicas de genotipos de sorgo forrajero y mijo perla en condiciones cálido-subhúmedas. *Revista Mexicana de Ingeniería y Ciencias*, 10(2), 33-40. <https://doi.org/10.29059/rmic.v1i1.6>

- Guzmán-Ochoa, G., Felipe-Victoriano, M., Aranda-Lara, U., Joaquín-Cancino, S., Estrada-Drouaillet, B., & Garay-Martínez, J. R. (2026). Forage yield, nutritional composition, and aerobic stability of silages from sorghum genotypes under warm subhumid conditions. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 86(1), 92-101. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392026000100092>
- Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J., Gommers, R., Virtanen, P., Cournapeau, D., Wieser, E., Taylor, J., Berg, S., Smith, N. J., Kern, R., Picus, M., Hoyer, S., van Kerkwijk, M. H., Brett, M., Haldane, A., Fernández del Río, J., Wiebe, M., Peterson, P., Gérard-Marchant, P., Sheppard, K., Reddy, T., Weckesser, W., Abbasi, H., Gohlke, C., & Oliphant, T. E. (2020). Array programming with NumPy. *Nature*, 585(7825), 357-362. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>
- Lucio-Ruiz, F., Aranda-Lara, U., Garay-Martínez, J. R., Estrada-Drouaillet, B., & Joaquín-Cancino, S. (2023). Requerimiento térmico, producción y valor nutritivo de forraje de genotipos de sorgo forrajero. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 46(4-A), 521-528. <https://doi.org/10.35196/rfm.2023.4A.521>
- Lucio-Ruiz, F., Joaquín-Cancino, S., Godina-Rodríguez, J. E., & Garay-Martínez, J. R. (2023). Yield and chemical composition of forage and silage of native maize under irrigated semi-arid conditions. *Agrociencia*, 57(4), 1-11. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v57i4.2918>
- Márquez-Godoy, J. N., Ramírez-Segura, E., Garay-Martínez, J. R., Espinoza-Canales, A., & Muñoz-Salas, L. C. (2025). Importancia de la gestión del pastoreo sobre la ecología del suelo. *Revista Interdisciplinaria de Ingeniería Sustentable y Desarrollo Social*, 11(1), 217-238. <https://doi.org/10.63728/riisds.v11i1.170>
- Nakagawa, S., Yang, Y., Macartney, E. L., Spake, R., & Lagisz, M. (2023). Quantitative evidence synthesis: A practical guide on meta-analysis, meta-regression, and publication bias tests for environmental sciences. *Environmental Evidence*, 12, 8. <https://doi.org/10.1186/s13750-023-00301-6>
- Nava-Berumen, C. A., Rosales-Serna, R., Carrete-Carreón, F. O., Jiménez-Ocampo, R., Domínguez-Martínez, P. A., & Reyes-Estrada, O. (2018). Productividad y calidad de forraje de pastos cultivados durante la época seca en Durango, México. *Agrociencia*, 52(6), 803-816.

- Oliveira, R. F., Perazzo, A. F., dos S. Pina, D., Alba, H. D. R., Leite, V. M., dos Santos, M. M., Santos, E. M., de A. Sobrinho, L. E. C., Pinheiro, R. L. S., Aquino, E. L., & de Carvalho, G. G. P. (2024). Productive and qualitative traits of sorghum genotypes used for silage under tropical conditions. *Crops*, 4(2), 256-269. <https://doi.org/10.3390/crops4020019>
- Ramírez, D. E., Olmos, J. J., Peña, A., Sánchez, J. I., Medina, E., Gallardo, S., & Santana, O. I. (2024). Dry matter accumulation, yield, and nutritional quality of forage of corn hybrids harvested at different days after sowing. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 15(2), 287-301. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v15i2.6554>
- Rosa, M. A. B., Tardin, F. D., Souza, J. M. S., Santos, J. A. P., Macedo, T. F., Santos, J., Freitas, M. H., Todescatto, F., Parrella, R. A. C., Figueiredo, J. E. F., Behling Neto, A., & Pereira, D. H. (2022). Characterization of forage, sweet and biomass sorghum for agronomic performance and ensilability. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, 21, e1239. <https://doi.org/10.18512/rbms2022v21e1239>
- Rousseeuw, P. J., & Hubert, M. (2011). Robust statistics for outlier detection. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, 1(1), 73-79. <https://doi.org/10.1002/widm.2>
- Rousseeuw, P. J., & Hubert, M. (2018). Anomaly detection by robust statistics. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, 8(2), e1236. <https://doi.org/10.1002/widm.1236>
- Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D., Burovski, E., Peterson, P., Weckesser, W., Bright, J., van der Walt, S. J., Brett, M., Wilson, J., Millman, K. J., Mayorov, N., Nelson, A. R. J., Jones, E., Kern, R., Larson, E., Carey, C. J., Polat, İ., Feng, Y., Moore, E. W., VanderPlas, J., & SciPy 1.0 Contributors. (2020). SciPy 1.0: Fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature Methods*, 17(3), 261-272. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>
- Williams-Alanís, H., Aranda-Lara, U., Arcos-Cavazos, G., Zavala-García, F., Rodríguez-Vázquez, M. D. C., & Olivares-Sáenz, E. (2021). Potencial productivo de variedades experimentales de sorgo blanco para el sur de Tamaulipas. *Nova Scientia*, 13(2), 1-19. <https://doi.org/10.21640/ns.v13i26.2688>

- Yan, W., & Kang, M. S. (2003). *GGE biplot analysis: A graphical tool for breeders, geneticists, and agronomists*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420040371>
- Yan, W., Hunt, L. A., Sheng, Q., & Szlavnic, Z. (2000). Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot. *Crop Science*, 40(3), 597-605. <https://doi.org/10.2135/cropsci2000.403597x>