

Productividad y calidad nutricional del forraje verde hidropónico de *Zea mays* (maíz) con diferentes tipos de fertilización en el cantón Arosemena Tola, provincia de Napo

Productivity and nutritional quality of hydroponic green fodder of Zea mays (maize) under different fertilization types in Arosemena Tola canton, Napo Province

Lisbeth Analya Moreno López ^{1*} y Javier Ignacio Briones García ²

¹ Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador, Morona Santiago;
<https://orcid.org/0009-0001-0289-8892>

² Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador, Morona Santiago;
<https://orcid.org/0000-0002-2675-3495>; javier.briones@espoch.edu.ec

* Correspondencia: analya.moreno@espoch.edu.ec

Cita: Moreno López, L. A., & Briones García, J. I. (2026). Productividad y calidad nutricional del forraje verde hidropónico de *Zea mays* (maíz) con diferentes tipos de fertilización en el cantón Arosemena Tola, provincia de Napo. *Horizon Nexus Journal*, 4(3), 107-130. <https://doi.org/10.70881/hnj/v4/n3/148>

Recibido: 04/06/2026

Revisado: 16/07/2026

Aceptado: 20/07/2026

Publicado: 24/07/2026



Copyright: © 2026 por los autores. Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la **Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional. (CC BY-NC).**

(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

 <https://doi.org/10.70881/hnj/v4/n3/148>

Resumen: El forraje verde hidropónico (FVH) es una opción alternativa para mejorar la disponibilidad de alimento en aquellos sistemas de ganadería que poseen limitaciones edafoclimáticas. Bajo este contexto, el objetivo fue evaluar la productividad y calidad nutricional del FVH de *Z. mays*, utilizando fertilizantes de origen químico y orgánico en el cantón Arosemena Tola, provincia de Napo. Para ello, se empleó un diseño experimental completamente al azar con arreglo factorial 3 × 3, considerando tres tratamientos (T0: Control, T1: fertilización química y T2: fertilización orgánica) y tres periodos de cosecha (7, 14 y 21 días) y tres repeticiones. Se analizaron variables de crecimiento, biomasa, composición bromatológica, índices integrados de calidad nutritiva y costos variables. T1 obtuvo los mayores valores de altura, biomasa fresca y materia seca con 19,64 cm, 3,73 kg bandeja⁻¹ y 746,80 g bandeja⁻¹, así como el mayor contenido de materia de proteína cruda (14,23 %) y la mayor producción de proteína (0,230 kg por tratamiento). La digestibilidad estimada, el valor relativo del forraje y la energía neta de lactancia disminuyeron con el tiempo de cosecha. La fertilización química (T1) reportó el menor costo por kilo de proteína producida (USD 18,12 kg⁻¹) y optimizó la productividad y eficiencia proteica del FVH de maíz.

Palabras clave: Alimentación animal, digestibilidad, productividad forrajera, proteína cruda, análisis bromatológicos.

Abstract: Hydroponic green forage (HGF) represents an alternative for improving feed availability in livestock production systems constrained by edaphoclimatic conditions. In this context, this study aimed to evaluate the productivity and nutritional quality of *Z. mays* HGF grown with chemical and organic fertilizers in Arosemena Tola Canton, Napo Province, Ecuador. A completely randomized experimental design with a 3 × 3 factorial arrangement was used, comprising three fertilization treatments (T0: unfertilized control, T1: chemical fertilization, and T2: organic fertilization), three harvest times (7, 14, and 21 days), and three replicates. Growth, biomass, bromatological composition, integrated nutritional quality indices,

and variable costs were evaluated. T1 produced the highest plant height, fresh biomass, and dry matter values, reaching 19.64 cm, 3.73 kg tray⁻¹, and 746.80 g tray⁻¹, respectively. It also achieved the highest crude protein content (14.23%) and protein yield (0.230 kg per treatment). Estimated digestibility, relative forage value, and net energy for lactation decreased as harvest time increased. Chemical fertilization (T1) resulted in the lowest cost per kilogram of protein produced (USD 18.12 kg⁻¹) and enhanced the productivity and protein-use efficiency of maize HGF.

Keywords: animal feeding, bromatological analysis, crude protein, digestibility, forage productivity.

1. Introducción

En los sistemas ganaderos tropicales, particularmente en las regiones amazónicas, como la provincia de Napo, la disponibilidad y la calidad del forraje representan factores limitantes fundamentales para la productividad ganadera, atribuibles a la pronunciada estacionalidad del suministro de forraje y a la disminución de la calidad nutricional de los pastos en casos de estrés hídrico o precipitación excesiva (López-Alban et al., 2026; Notenbaert et al., 2021). En este marco, el forraje verde hidropónico (FVH) se ha convertido en una alternativa tecnológica viable para la producción intensiva de biomasa vegetal de alta calidad nutricional en espacios reducidos y con una menor dependencia de las condiciones climáticas y del suelo (Elsallam et al., 2021; Naik et al., 2015).

La FVH se caracteriza por ser el producto derivado de las fases de germinación y crecimiento inicial de semillas forrajeras, principalmente cereales como *Zea mays* L., cultivadas en condiciones controladas de humedad, temperatura y nutrientes, generalmente en sistemas de cultivo sin suelo (González et al., 2015). Numerosas investigaciones han demostrado que la FVH presenta niveles elevados de proteína cruda, una mejor digestibilidad y una disponibilidad de minerales superior en comparación con los forrajes convencionales, lo que lleva a avances importantes en la eficiencia alimentaria y la productividad animal en general (Barquero et al., 2019; Kristley et al., 2023). En particular, *Z. mays* se considera una de las especies más utilizadas en la producción de FVH debido a su notable tasa de germinación, rápido crecimiento y ventajosos atributos nutricionales (Viteri et al., 2023).

Uno de los factores determinantes en la producción y calidad del FVH es el manejo de la fertilización durante el proceso de crecimiento. La nutrición mineral influye directamente en la síntesis de compuestos estructurales y metabólicos, afectando tanto la producción de biomasa como la composición bromatológica del forraje (Barquero et al., 2019). Adicionalmente, se han utilizado soluciones nutritivas de origen químico, caracterizadas por su alta disponibilidad y precisión en la dosificación de nutrientes esenciales. Sin embargo, el uso de fertilizantes orgánicos ha ganado relevancia debido a su menor impacto ambiental, contribución a la sostenibilidad de los sistemas productivos y potencial para mejorar la calidad nutricional mediante la incorporación de compuestos bioactivos (Kristley et al., 2023).

A pesar de los avances en el uso de FVH, existe aún una limitada comprensión sobre las diferencias en productividad y calidad nutricional derivadas del uso de fertilización química versus orgánica en condiciones específicas de la Amazonía ecuatoriana. Estudios previos han reportado variaciones significativas en la producción de biomasa y contenido de proteína dependiendo del tipo de fertilizante utilizado, así como interacciones con factores ambientales y de manejo (Barquero et al., 2019; Viteri et al.,

2023). También la evaluación económica de dichos sistemas es importante y puede permitir la evaluación de su viabilidad en contextos rurales donde la rentabilidad y los costos de insumos hacen la tecnología productiva factible (Yhony et al., 2018).

En esta dirección, la evaluación del FVH de *Z. mays* con la aplicación de esquemas de fertilización también es importante en sistemas productivos amazónicos que se encuentran con la intensificación sostenible como prioridad (estrategia a mediano plazo). La comparación entre la fertilización orgánica y química puede permitir la identificación de opciones productivas y nutricionales más eficientes y participar con la formulación de estrategias de un manejo adaptado a la situación local.

Por lo tanto, el presente estudio tiene como objetivo evaluar la productividad y calidad nutricional del forraje verde hidropónico de *Z. mays*, utilizando fertilizantes de origen químico y orgánico en el cantón Arosemena Tola, provincia de Napo. Específicamente, se busca determinar la productividad del FVH bajo distintos esquemas de fertilización, analizar su composición bromatológica y comparar los costos de producción asociados a cada tratamiento, con el fin de generar información científica que respalde la toma de decisiones en sistemas ganaderos sostenibles de la región amazónica.

2. Materiales y Métodos

2.1. Área de estudio y condiciones experimentales

La investigación se desarrolló en el Centro Experimental de Investigación y Producción Amazónica (CEIPA) de la Universidad Estatal Amazónica, ubicado en el cantón Arosemena Tola, provincia de Napo, Ecuador. El experimento se realizó en condiciones de invernadero, utilizando un sistema de producción hidropónica. El ensayo se llevó a cabo en un módulo protegido, con control parcial de temperatura, humedad relativa y radiación, con el fin de minimizar la variabilidad ambiental externa. Durante el periodo experimental se registraron las condiciones microclimáticas (temperatura media de 26 °C y humedad relativa media del 85%), las cuales fueron monitoreadas diariamente mediante sensores digitales. El riego se llevó a cabo mediante un sistema de nebulización programable establecido en tres momentos al día, en el que el riego se aplicó mediante procedimientos con pulsos de un minuto de duración y un caudal de 2,4 L/min. El sistema de producción de forraje verde hidropónico fue alimentado con agua procedente de la red de abastecimiento del CEIPA, cuya calidad fisicoquímica fue caracterizada previamente. El agua presentó un pH de 6,99, turbidez de 1,26 NTU, oxígeno disuelto de 8,47 mg L⁻¹ y conductividad eléctrica de 18,17 µS cm⁻¹.

2.2. Material vegetal y establecimiento del cultivo

Se utilizaron semillas de *Z. mays* duro de calidad comercial, previamente seleccionadas por uniformidad de tamaño y viabilidad. De acuerdo con lo propuesto por Urbina et al. (2020) las semillas fueron sometidas a un proceso de desinfección con hipoclorito de sodio al 1% durante 5 minutos y posterior lavado con agua destilada. La siembra se realizó en bandejas hidropónicas de polietileno (52 × 25 × 6 cm), distribuyendo de manera homogénea 854 g de semillas alcanzando una densidad constante (6.57 kg m⁻²) (Valverde et al., 2017), asegurando condiciones uniformes entre unidades experimentales.

2.3. Tratamientos y manejo de la fertilización

Se evaluaron tres tratamientos de fertilización:

- T0: Testigo (agua sin fertilización)
- T1: Fertilización química basada en solución nutritiva tipo Sonneveld (Tabla 1a).
- T2: Fertilización orgánica mediante biol líquido fermentado 10 ml/L (Tabla 1b).

Las soluciones nutritivas fueron aplicadas vía radicular mediante riego fraccionado diario, ajustando las dosis en función del contenido de nitrógeno total para garantizar comparabilidad entre tratamientos. La frecuencia de riego se estableció en dos aplicaciones diarias.

Tabla 1

Caracterización química, fisicoquímica y dosis de aplicación de las fuentes de fertilización evaluadas en el cultivo hidropónico de Z. mays

a. Caracterización de la solución nutritiva tipo Sonneveld (HydroLeaf Premium®)

Solución	Elementos principales	Dosis
A (Macro)	Nitrógeno total (N) 10.2%	2 ml/L
	Nítrico 9.8%	
	Amoniacal 0.4%	
	Calcio (Ca) 14.9%	
	Potasio (K ₂ O) 2.8%	
B (Macro)	Fósforo (P ₂ O ₅) 7.8%	3 ml/L
	Potasio (K ₂ O) 8.4%	
	Magnesio (Mg) 4.8%	
	Azufre (S) 6.5%	
	Hierro (Fe) 0.10%	
C (Micro)	Manganeso (Mn) 0.13%	1 ml/L
	Zinc (Zn) 0.04%	
	Cobre (Cu) 0.02%	
	Molibdeno (Mo) 0.005%	

b. Caracterización físico-químico del Biol

Parámetro	Valor	Unidad
pH (10%)	7.15	—
Conductividad eléctrica (1/200)	0.95	dS/m
Densidad (20 °C)	1.00	g/cm ³
Carbono orgánico oxidable total	1.59	%
Nitrógeno total (Kjeldahl)	1.13	%
Fósforo total (P ₂ O ₅)	0.45	%
Potasio total (K ₂ O)	0.83	g/L
Calcio total (CaO)	0.48	g/L
Magnesio total (MgO)	0.087	g/L
Sodio total (Na)	0.317	g/L
Zinc total (Zn)	0.00398	g/L
Níquel total (Ni)	1.12	Ppm
Relación C/N	1.4	—

2.4. Diseño experimental

De acuerdo con lo propuesto por Rivera et al. (2010) con adecuaciones por los autores se empleó un diseño completamente al azar (DCA) con arreglo factorial 3 × 3, correspondiente a tres tipos de fertilización y tres tiempos de evaluación (7, 14 y 21 días post-siembra), con tres repeticiones por tratamiento. En total se establecieron 27

unidades experimentales. El modelo estadístico utilizado fue el modelo lineal general de dos vías (Ecuación 1).

(1)

$$Y_{ijk} = \mu + T_i + D_j + (T \times D)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde (Y_{ijk}) variable respuesta; (μ) media general; (T_i) efecto del tipo de fertilización; (D_j) efecto del tiempo de evaluación; ($(T \times D)_{ij}$) interacción y (ε_{ijk}) error experimental.

2.5. Productividad del forraje

Se evaluó el rendimiento de biomasa de acuerdo con lo establecido por Barquero et al. (2019): Peso fresco (kg/bandeja⁻¹), determinado con balanza digital al momento de la cosecha; Materia seca (g/bandeja⁻¹), obtenida mediante secado en estufa a 65 °C hasta peso constante; Altura de planta (cm), promedio de 20 plántulas por unidad experimental.

2.6. Calidad nutricional

El análisis bromatológico se siguió lo establecido por Herrera et al. (2022) en el cual se determina proteína cruda (PC) a través del método Kjeldahl; fibra detergente neutro (FDN) y ácido (FDA) con el método Van Soest y cenizas a partir de la incineración en mufla a 550 °C.

A partir de los resultados del análisis bromatológico se calcularon diversos indicadores integrados de calidad nutricional con el propósito de evaluar la relación entre el contenido proteico, las fracciones fibrosas, la digestibilidad potencial y el valor energético del FVH de *Z. mays*. Todos los índices fueron calculados individualmente para cada unidad experimental, evitando la estimación a partir de valores promedio, con el fin de preservar la variabilidad experimental y permitir su posterior análisis estadístico.

Las relaciones entre proteína y fibra se calcularon mediante las siguientes expresiones de acuerdo con lo propuesto por Rodrigues et al. (2023):

Relación proteína cruda/fibra detergente neutra (PC/FDN)

(2)

$$PC/FDN = \frac{\text{Proteína cruda (\%)}}{\text{FDN (\%)}}$$

Relación proteína cruda/fibra detergente ácida (PC/FDA)

(3)

$$PC/FDA = \frac{\text{Proteína cruda (\%)}}{\text{FDA (\%)}}$$

Relación fibra detergente ácida/fibra detergente neutra (FDA/FDN)

(4)

$$FDA/FDN = \frac{\text{FDA (\%)}}{\text{FDN (\%)}}$$

Estas relaciones constituyen indicadores descriptivos ampliamente utilizados para evaluar el equilibrio entre el contenido de proteína y la fracción estructural del forraje, proporcionando una medida complementaria a los análisis bromatológicos convencionales (Guo et al., 2025).

La digestibilidad estimada de la materia seca (DMS) se obtuvo mediante la ecuación propuesta por Rohweder et al. (1978):

(5)

$$DMS(\%) = 88,9 - (0,779 \times FDA)$$

donde FDA corresponde al contenido de fibra detergente ácida expresado como porcentaje de materia seca.

El consumo potencial de materia seca (CMS) se estimó utilizando la ecuación propuesta por Folina et al. (2025):

(6)

$$CMS(\%PV) = \frac{120}{FDN}$$

donde FDN representa el contenido de fibra detergente neutra (% de materia seca).

Posteriormente, el valor relativo del forraje (RFV) fue calculado mediante:

(7)

$$RFV = \frac{DMS \times CMS}{1,29}$$

El RFV integra simultáneamente el consumo potencial y la digestibilidad de la materia seca, siendo uno de los índices más utilizados para comparar la calidad relativa entre diferentes forrajes. Estudios recientes continúan empleándolo como indicador de referencia para caracterizar el valor nutritivo de gramíneas y leguminosas, aunque reconocen sus limitaciones al no considerar directamente la digestibilidad de la fibra ni otros componentes nutricionales (Folina et al., 2025; Guo et al., 2025).

La energía neta de lactancia (ENL) se estimó mediante las ecuaciones propuestas por Jeon et al. (2022):

(8)

$$ENL (Mcal lb^{-1}) = 1,085 - (0,0124 \times FD)$$

Los valores obtenidos fueron posteriormente convertidos a Mcal kg⁻¹ de materia seca mediante:

(9)

$$ENL (Mcal kg^{-1}) = ENL (Mcal lb^{-1}) \times 2,2046$$

La ENL es un estimador del potencial energético del forraje para Lácteos. Diferentes investigaciones recientes han concluido que, aunque la ENL continúe siendo un índice muy utilizado para la comparación de tratamientos, su precisión puede aumentar utilizando ecuaciones basadas en la digestibilidad de la fibra o usando los modernos sistemas de evaluación energética (Anger et al., 2024; Jeon et al., 2022).

2.7. Evaluación económica

El análisis de la evaluación económica se realizó a partir del análisis de costos variables propuestos por Elmulthum et al. (2023), Ghasemi-Mobtaker et al. (2022) y Masucci et al. (2024) con adecuaciones de los autores debido al alcance de la investigación. Se tomó en consideración tan solo los insumos y recursos empleados en la producción de FVH de *Z. mays*, excluyéndose todos los costos en infraestructuras, bandejas, estanterías, el sistema de riego, herramientas y demás equipos, en virtud de que todos ellos fueron comunes a todos los tratamientos y no ejercieron influencia sobre la comparación estrictamente experimental. El tratamiento por sí solo estuvo caracterizado por tres bandejas hidropónicas de polietileno ($52 \times 25 \times 6$ cm), sembradas cada una de ellas con 854 g de semilla, lo que equivale a 2,562 kg de semilla por tratamiento. Los costos variables considerados fueron los relativos a semilla, fertilización, agua y mano de obra.

El costo total variable (CTV) se calculó mediante la siguiente expresión:

(10)

$$CTV = CS + CF + CA + CMO$$

donde:

- CS = costo de la semilla (USD);
- CF = costo del fertilizante químico o biol (USD);
- CA = costo del agua utilizada (USD);
- CMO = costo de la mano de obra (USD).

Para el tratamiento químico (T1) se utilizó una solución nutritiva comercial HydroLeaf Premium® compuesta por las soluciones concentradas A, B y C, aplicadas a dosis de 2, 3 y 1 mL L⁻¹ de agua, respectivamente. La estimación del uso de fertilizante se basa en el volumen total de la solución nutritiva utilizada durante las tres semanas de trabajo en el invernadero. Si consideramos tres riegos diarios con el caudal total de 2,4 L min⁻¹, podemos calcular un consumo total de 50,4 L de solución nutritiva por tratamiento, que equivale a 302,4 mL de concentrado HydroLeaf Premium®. Si tomamos en cuenta el costo comercial del producto (USD 65 por tres galones), el costo de fertilización efectivo fue de USD 1,73 por tratamiento.

Para el tratamiento orgánico (T2) se aplicó biol a la concentración de 10 mL L⁻¹. Aplicando el mismo volumen de solución utilizado en T1 (recuerde que sólo utilizamos la concentración equivalente a la base de trabajo), el consumo total fue de 504 mL de biol para cada tratamiento; considerando el costo comercial de USD 8 por galón (3,785 L), el costo imputado fue de USD 1,07 por tratamiento.

El costo de mano de obra es el resultado de tomar el salario básico unificado vigente en Ecuador en el año 2026 (USD 482 mes⁻¹), lo que equivale a un costo de mano de obra de USD 2,01 h⁻¹; se considera una jornada laboral de 240 horas mensuales. Se estimó

un tiempo total de trabajo de dos horas para las nueve bandejas del experimento, distribuido proporcionalmente entre tratamientos, obteniéndose un costo de USD 1,34 por tratamiento.

La eficiencia económica se evaluó mediante los siguientes indicadores:

Costo por kilogramo de forraje fresco

(11)

$$C_{FVH} = \frac{CTV}{PF}$$

Costo por kilogramo de materia seca

(12)

$$C_{MS} = \frac{CTV}{PMS}$$

Costo por kilogramo de proteína producida

(13)

$$C_{PC} = \frac{CTV}{PPC}$$

donde:

- PF = producción total de forraje fresco (kg);
- PMS = producción total de materia seca (kg);
- PPC = producción total de proteína cruda (kg).

La producción de proteína cruda se estimó mediante:

(14)

$$PPC = PMS \times \frac{PC}{100}$$

donde PC corresponde al contenido de proteína cruda expresado en porcentaje de materia seca.

Adicionalmente, se calcularon los índices de conversión de semilla a biomasa fresca y materia seca para evaluar la eficiencia biológica de cada tratamiento:

(15)

$$ICSF = \frac{PF}{QS}$$

(16)

$$ICSMS = \frac{PMS}{QS}$$

donde QS representa la cantidad total de semilla utilizada por tratamiento.

Debido a la inexistencia de un precio de mercado estandarizado para el forraje verde hidropónico en la Amazonía ecuatoriana, el análisis económico se limitó a determinar los costos unitarios y la eficiencia productiva de los tratamientos y no se estimaron ingresos y rentabilidad comercial.

2.8. *Análisis estadístico*

Los datos obtenidos fueron analizados mediante un diseño completamente al azar con arreglo factorial 3×3 , considerando como factores el tipo de fertilización (T0: control, T1: fertilización química y T2: fertilización orgánica) y el tiempo de cosecha (7, 14 y 21 días). Para las variables productivas, bromatológicas e indicadores integrados de calidad nutricional se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de dos vías para evaluar los efectos principales de los factores y su interacción.

Las medias fueron comparadas mediante la prueba de Tukey cuando se observaron diferencias significativas ($p \leq 0,05$). De forma previa, se comprobaron los supuestos de normalidad de los residuos y de homogeneidad de varianzas por medio de las pruebas de Shapiro–Wilk y Levene, respectivamente. Los resultados se expresaron como media $\pm$ error estándar (Herrera et al., 2022). Todos los análisis estadísticos fueron elaborados con el programa OriginLab Pro-2024, considerando un nivel de significación del 5 %.

3. Resultados

3.1. *Efecto de la fertilización sobre la productividad del FVH*

La Tabla 2 evidenció que el tipo de fertilización tuvo un efecto significativo en las variables de crecimiento y producción forrajera verde hidropónico de *Z. mays* ($p < 0,05$). En todas las variables analizadas, el tratamiento de fertilización química (T1) presentó los mayores valores, seguido de la fertilización orgánica (T2), mientras que el testigo (T0) fue el que presentó los rendimientos menores.

En lo que respecta al crecimiento de las plantas, la altura osciló entre 12,57 y 19,64 cm. El tratamiento T1 fue el que obtuvo la mayor altura ($19,64 \pm 0,36$ cm), siendo significativamente mayor a T2 ($17,56 \pm 0,74$ cm) y T0 ($12,57 \pm 0,99$ cm). En comparación al control, la fertilización química elevó la altura de planta en 56,2 % mientras que con fertilización orgánica se observaron incrementos de 39,7 %, lo que indica que el cultivo responde favorablemente a la mayor disponibilidad de nutrientes en las primeras etapas de crecimiento.

Con respecto a la productividad de la biomasa fresca, se observaron diferencias significativas entre tratamientos. El mayor rendimiento se correspondió con T1 ($3,73 \pm 0,11$ Kg bandeja⁻¹) seguido de T2 ($3,39 \pm 0,10$ Kg bandeja⁻¹) y de T0 ($3,10 \pm 0,05$ kg bandeja⁻¹). La fertilización química permitió incrementar la producción de biomasa fresca en 20,2 % respecto el tratamiento sin fertilización, mientras que la aplicación de biol incrementó la producción de biomasa fresca en 9,4 %.

Un comportamiento muy similar se observó para lo que respecta a la producción de biomasa seca. T1 alcanzó el mayor valor con $746,80 \pm 22,41$ g por bandeja, seguido por T2 ($679,80 \pm 20,51$ g bandeja⁻¹) y T0 ($621,53 \pm 11,74$ g bandeja⁻¹).

Tabla 2*Efecto de los tratamientos sobre la altura de planta, peso fresco y peso seco.*

Tratamiento	Altura (cm)	Peso fresco (g)	Peso seco (g)
T0	12,57 ± 0,99 ^c	3,10 ± 0,05 ^c	621,53 ± 11,74 ^c
T1	19,64 ± 0,36 ^a	3,73 ± 0,11 ^a	746,80 ± 22,41 ^a
T2	17,56 ± 0,74 ^b	3,39 ± 0,10 ^b	679,80 ± 20,51 ^b

Leyenda: Los valores representan la media ± desviación estándar (DE). Letras distintas dentro de la misma columna indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

3.2. Dinámica temporal del crecimiento del FVH

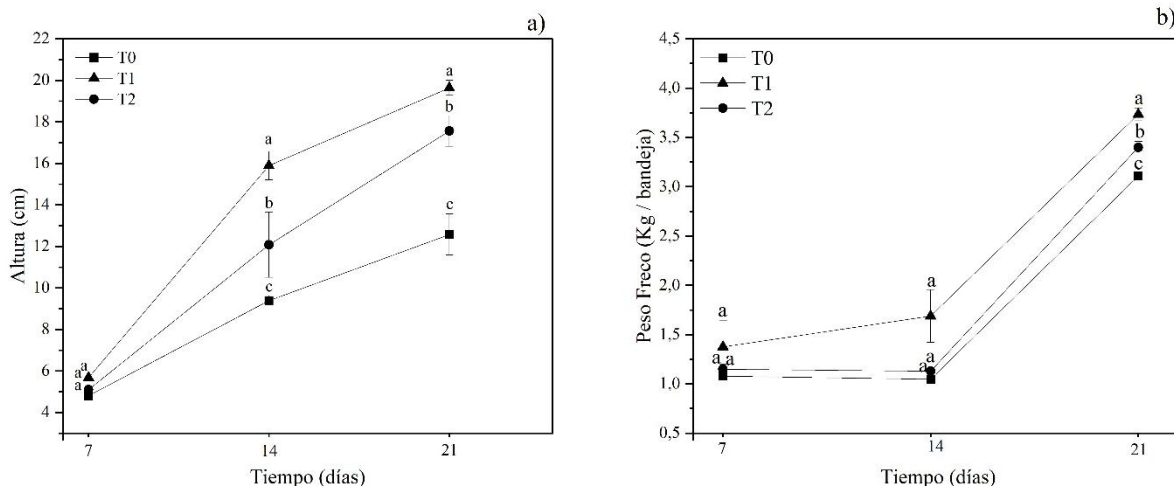
La dinámica temporal del crecimiento del FVH de *Z. mays* evidenció un incremento progresivo de las variables productivas a medida que avanzó el ciclo de cultivo, observándose una respuesta diferenciada según el tipo de fertilización aplicada. En términos generales, los mayores valores de altura de planta, biomasa fresca y biomasa seca se registraron a los 21 días de evaluación, siendo la fertilización química (T1) la que promovió el mayor desempeño productivo en todas las etapas analizadas (Figura 1 y 2).

En la (Figura 1a) se evidenció que durante los primeros siete días de crecimiento no se detectaron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos para la altura de planta, registrándose valores comprendidos entre 4,80 y 5,67 cm. Sin embargo, a partir de los 14 días comenzaron a evidenciarse respuestas diferenciadas, donde T1 alcanzó una altura promedio de 15,89 cm, significativamente superior a T2 (12,08 cm) y T0 (9,39 cm). Esta tendencia se mantuvo hasta los 21 días, cuando la fertilización química produjo la mayor altura (19,64 ± 0,36 cm), seguida por la fertilización orgánica (17,56 ± 0,74 cm) y el tratamiento control (12,57 ± 0,99 cm), confirmando una mayor eficiencia en la promoción del crecimiento vegetativo bajo condiciones de nutrición mineral balanceada.

La acumulación de biomasa fresca presentó un patrón similar durante los primeros 14 días no se observaron diferencias significativas entre tratamientos, aunque se evidenció una tendencia favorable hacia T1, que registró valores de 1,37 y 1,67 Kg bandeja⁻¹ por bandeja a los 7 y 14 días, respectivamente. No obstante, las diferencias quedaron establecidas al final del ciclo de producción de T1 donde se obtuvieron 3,73 Kg bandeja⁻¹, que fueron cifras claramente superiores a la de T2 (3,39 Kg bandeja⁻¹) y T0 (3,10 Kg bandeja⁻¹) de ahí que estos resultados se evidenciaron el efecto de la fertilización sobre la producción se intensificara al aumentar el ciclo de crecimiento, ya que las exigencias nutricionales del cultivo también aumentaron (Figura 1b).

Figura 1

Efecto de la fertilización y el tiempo de cosecha sobre el crecimiento y la productividad del forraje verde hidropónico de *Z. mays*

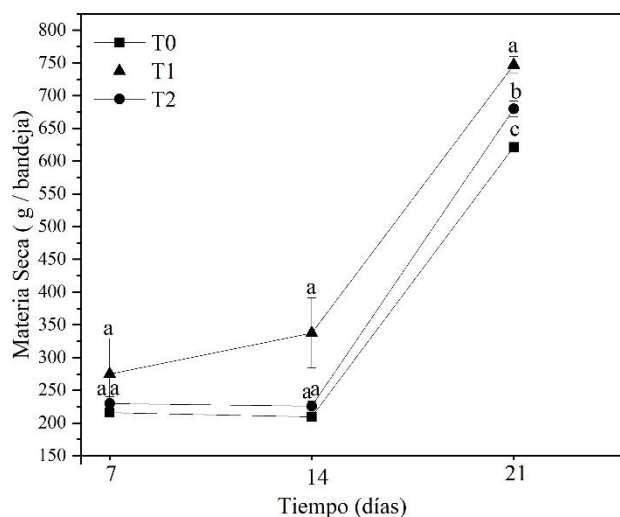


Leyenda: Respuesta del forraje verde hidropónico de *Z. mays* a diferentes esquemas de fertilización durante el periodo de crecimiento. (a) Altura de planta (cm) y (b) peso fresco por bandeja (kg bandeja^{-1}) evaluados a los 7, 14 y 21 días después de la siembra. T0: control sin fertilización; T1: fertilización química; T2: fertilización orgánica. Los valores representan la media $\pm$ error estándar ($n = 3$). Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos dentro de cada tiempo de evaluación, de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$).

De forma similar, la producción de materia seca fue incrementándose de forma progresiva en el periodo experimental. A los siete días, los tratamientos también presentaron valores estadísticamente similares, esto es, de 215,93 a 274,93 g bandeja^{-1} . Con 14 días, se observó un gran incremento en T1 (337,47 g bandeja^{-1}) y en los tratamientos T0 y T2 se registraban 209,33 y 225,80 g bandeja^{-1} , respectivamente. Al finalizar el ensayo, la fertilización química había generado la mayor acumulación de biomasa seca (746,80 $\pm$ 22,41 g bandeja^{-1}), seguida por la fertilización orgánica (679,80 $\pm$ 20,51 g bandeja^{-1}) y el tratamiento control (621,53 $\pm$ 11,74 g bandeja^{-1}), evidenciando diferencias significativas entre tratamientos (Figura 2).

Figura 2

Dinámica temporal de la acumulación de materia seca del forraje verde hidropónico de *Z. mays* bajo diferentes esquemas de fertilización



Leyenda: T0 (control), T1 (fertilización química) y T2 (fertilización orgánica), evaluados a los 7, 14 y 21 días después de la siembra. Los puntos representan la media $\pm$ error estándar ($n = 3$). Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos dentro de cada tiempo de evaluación, según la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$).

3.3. Interacción entre fertilización y tiempo sobre el crecimiento y la acumulación de biomasa

El análisis factorial evidenció una interacción significativa entre el tiempo de evaluación y el tratamiento de fertilización para la variable altura de planta ($F = 18,44$; $p < 0,0001$), indicando que la magnitud de la respuesta al suministro de nutrientes varió en función de la etapa de crecimiento del FVH. El modelo presentó un elevado poder explicativo ($R^2 = 0,99$) y una baja variabilidad experimental ($CV = 6,44 \%$), lo que confirma la robustez de los resultados obtenidos (Tabla 3a).

Hasta cumplir los primeros siete días de cultivo, no se encontraron diferencias significativas en los tratamientos, la altura cultivo varió entre 4,80 a 5,67 cm (Tabla 3b). Esta secuencia indica que durante la fase de inicio del establecimiento el crecimiento estuvo determinado fundamentalmente por las reservas de la semilla y no por la fuente externa de nutrientes. Sin embargo, a partir de los 14 días la respuesta diferencial a la fertilización se hizo evidente.

De este modo, la fertilización química (T1) dio como resultado una altura media de 15,89 cm, muy por encima de la del tratamiento orgánico (T2; 12,08 cm) y del tratamiento control (T0; 9,39 cm). Se produjo un incremento entre tratamientos que se incrementó hasta el final del ciclo productivo. Así, en el día 21, el crecimiento alcanzó sus máximos valores, con T1 evidenciando 19,64 cm, T2 17,56 cm y T0 12,57 cm. Comparado con el tratamiento sin fertilización, el uso de solución nutritiva química incrementó la altura de planta en aproximadamente 56 %, mientras que la fertilización orgánica produjo un aumento cercano al 40 %, evidenciando una mayor eficiencia de la fertilización mineral para promover el crecimiento vegetativo durante las fases de máxima demanda nutricional.

En contraste, la interacción Tiempo $\times$ Tratamiento no fue significativa para la producción de biomasa fresca ($p = 0,5543$) ni para la acumulación de materia seca ($p = 0,5543$), indicando que el efecto de la fertilización sobre estas variables fue consistente a lo largo del periodo experimental (Tabla 4a). Aunque las diferencias entre tratamientos no dependieron estadísticamente del tiempo para las variables de biomasa, se observó una marcada respuesta temporal. Bajo esta premisa, la producción de biomasa fresca aumentó desde 1,05–1,69 kg bandeja⁻¹ hasta 3,11–3,73 kg bandeja⁻¹ desde el día 14 hasta el día 21 y, a su vez la biomasa seca pasó de 209,33–337,47 g bandeja⁻¹ al inicio del ciclo en el día 14 a valores de 621,53–746,80 g bandeja⁻¹ al final. En los dos parámetros estudiados, los tres tratamientos mostraron un comportamiento paralelo, que se caracteriza por una intensa acumulación de biomasa en el periodo final del ciclo de desarrollo (Tabla 3a).

Tabla 3

Efectos del tiempo de cultivo, la fertilización y su interacción sobre el crecimiento y la productividad del forraje verde hidropónico de Z. mays.

a. Resumen del análisis de varianza factorial

Variable respuesta	Tiempo F (p)	Fertilización F (p)	Tiempo × fertilización F (p)	R ² ajustado	CV (%)
Altura de planta (cm)	555,41 (<0,0001)	96,96 (<0,0001)	18,44 (<0,0001)	0,98	6,44
Peso fresco (kg bandeja ⁻¹)	266,16 (<0,0001)	12,20 (0,0004)	0,78 (0,5543)	0,96	11,71
Materia seca (g bandeja ⁻¹)	266,16 (<0,0001)	12,20 (0,0004)	0,78 (0,5543)	0,96	11,71

b. Descomposición de la interacción significativa para la altura de planta

Tiempo de cultivo	T0: testigo	T2: fertilización orgánica	T1: fertilización química
7 días	4,80 ± 0,42 ^a	5,10 ± 0,42 ^a	5,67 ± 0,42 ^a
14 días	9,39 ± 0,42 ^b	12,08 ± 0,42 ^c	15,89 ± 0,42 ^d
21 días	12,57 ± 0,42 ^c	17,56 ± 0,42 ^{de}	19,64 ± 0,42 ^e

Nota: Los valores del panel b corresponden a medias ajustadas ± error estándar. Medias con al menos una letra común no difieren significativamente según la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$). La comparación de medias de la interacción se presenta únicamente para la altura de planta, debido a que la interacción tiempo × fertilización no fue significativa para el peso fresco ni para la materia seca.

3.4. Efecto de la fertilización sobre la calidad nutricional del forraje verde hidropónico

La calidad nutricional del FVH de *Z. mays* fue significativamente influenciada tanto por el tipo de fertilización como por el tiempo de cosecha (Figura 3). A lo largo de todos los periodos de evaluación, la fertilización química (T1) mostró los mayores valores de contenido de proteína cruda, cenizas, fibra detergente neutra (FDN) y fibra detergente ácida (FDA) en los forrajes obtenidos, dejando a la fertilización orgánica (T2) detrás de T1, mientras que el tratamiento sin fertilización (T0) presentó inequívocamente los valores más bajos de cada una de las variables evaluadas ($p < 0,05$). El contenido de proteína cruda se fue reduciendo durante el ciclo de crecimiento, independientemente del tratamiento aplicado (figura 3a). En los 7 días, T1 alcanzó el contenido máximo de concentración proteica ($14,23 \pm 0,43$ %) superando significativamente a T2 ($12,64 \pm 0,38$ %) y a T0 ($10,14 \pm 0,30$ %) ($p < 0,05$); este contenido de proteína cruda fue también muy superior a los 14 (T1 = $10,82 \pm 0,08$ %) y los 21 días (T1 = $10,27 \pm 0,07$ %), aunque uno de los resultados observados en la cosecha fue la reducción gradual de la proteína conforme aumentaba la edad de cosecha, si bien la fertilización química permitió realizar la conservación del forraje con concentraciones superior durante la realización de todo el período experimental.

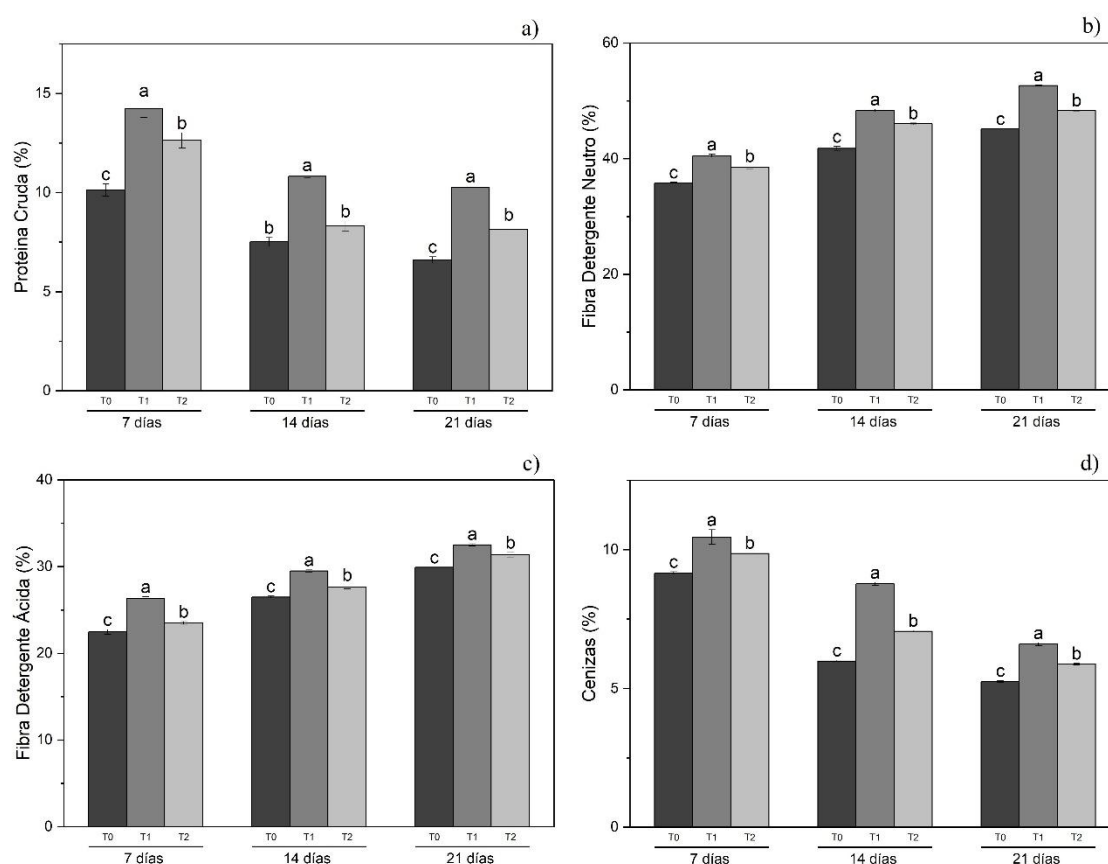
En contraste, las fracciones fibrosas mostraron una tendencia creciente con el tiempo (Figura 3b-c). La FDN aumentó desde valores de 35,84–40,51 % a los 7 días hasta 45,17–52,67 % a los 21 días, mientras que la FDA se incrementó de 22,47–26,36 % a 29,92–32,52 % durante el mismo periodo. Los mayores valores fueron registrados sistemáticamente en T1, alcanzando $52,67 \pm 0,10$ % de FDN y $32,52 \pm 0,14$ % de FDA

a los 21 días, lo que representa incrementos de 16,2 % y 23,4 %, respectivamente, en comparación con el tratamiento control. Estos resultados evidencian una mayor acumulación de componentes estructurales de la pared celular conforme avanzó la maduración del forraje.

El contenido de cenizas presentó un comportamiento inverso al observado para las fibras (Figura 3d). Se registró una disminución progresiva a medida que aumentó la edad de cosecha, pasando de 9,17–10,46 % a los 7 días a valores entre 5,25 y 6,60 % a los 21 días. No obstante, en todos los tiempos de evaluación, la fertilización química mantuvo concentraciones significativamente superiores a las observadas en T2 y T0. A los 21 días, T1 presentó un contenido de cenizas de $6,60 \pm 0,05$ %, mientras que T2 y T0 registraron $5,88 \pm 0,03$ % y $5,25 \pm 0,04$ %, respectivamente.

Figura 3

Efecto de la fertilización química (T1), fertilización orgánica (T2) y tratamiento control (T0) sobre la composición nutricional del forraje verde hidropónico de Z. mays cosechado a los 7, 14 y 21 días. (a) Proteína cruda; (b) fibra detergente neutra (FDN); (c) fibra detergente ácida (FDA); y (d) cenizas



Leyenda: Las barras representan la media $\pm$ error estándar ($n = 3$). Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos dentro de cada tiempo de evaluación según la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$).

3.5. Análisis integrado de la calidad nutricional del FVH

El análisis integrado de la calidad nutricional evidenció que tanto el tiempo de cosecha como el tipo de fertilización influyeron significativamente sobre todos los indicadores evaluados, observándose además una interacción significativa entre ambos factores para las relaciones proteína:fibra (PC/FDN y PC/FDA), la relación FDA/FDN, la

digestibilidad estimada de la materia seca (DMS), el valor relativo del forraje (RFV) y la energía neta de lactancia (ENL) ($p < 0,05$). Los modelos presentaron elevados coeficientes de determinación ajustados ($R^2_{aj} = 0,81-0,997$) y bajos coeficientes de variación ($0,37-5,05\%$), indicando una alta capacidad explicativa y precisión experimental (Tabla 4).

Tabla 4

Resumen del análisis de varianza factorial para los indicadores integrados de calidad nutricional del forraje verde hidropónico de Z. mays.

Variable	Tiempo	Tratamiento	Tiempo × Tratamiento	R ² ajustado	CV (%)
PC/FDN	<0,0001	<0,0001	0,0497	0,974	5,05
PC/FDA	<0,0001	<0,0001	0,0147	0,978	4,73
FDA/FDN	<0,0001	0,0006	<0,0001	0,809	1,53
DMS	<0,0001	<0,0001	0,0032	0,990	0,37
RFV	<0,0001	<0,0001	0,0049	0,997	0,91
ENL	<0,0001	<0,0001	0,0032	0,990	0,54

Nota: Se presentan los valores de probabilidad (p) correspondientes a los efectos principales de tiempo de cosecha (T), fertilización (F) y su interacción ($T \times F$), así como el coeficiente de determinación ajustado (R^2_{aj}) y el coeficiente de variación (CV). PC/FDN: relación proteína cruda:fibra detergente neutra; PC/FDA: relación proteína cruda:fibra detergente ácida; FDA/FDN: relación fibra detergente ácida:fibra detergente neutra; DMS: digestibilidad estimada de la materia seca; RFV: valor relativo del forraje (Relative Feed Value); ENL: energía neta de lactancia. Los valores de $p \leq 0,05$ indican efectos estadísticamente significativos.

Las proporciones de PC/FDN y PC/FDA mostraron un descenso gradual conforme se elevó la edad de recolección, aludiendo así a una reducción relativa del contenido proteico en relación a la fracción estructural del forraje. Los mayores valores se registraron a los siete días en los tratamientos fertilizados, particularmente en T1, con relaciones de 0,351 y 0,540, respectivamente, sin diferencias estadísticas respecto a T2 para ambas variables. En contraste, los menores valores se observaron en el tratamiento control cosechado a los 21 días (0,146 y 0,221), evidenciando una pérdida progresiva de calidad proteica relativa asociada al proceso de maduración del cultivo (Tabla 5).

La relación FDA/FDN presentó un comportamiento diferente, siendo significativamente influenciada por la interacción entre fertilización y tiempo de cosecha. Los menores valores fueron observados en T2 a los 14 días (0,601) y en T1 a los 14 días (0,610), mientras que el mayor valor correspondió al tratamiento control cosechado a los 21 días (0,662) (Tabla 5).

Tabla 5

Relaciones proteína:fibra del forraje verde hidropónico de Z. mays en función del tiempo de cosecha y el tipo de fertilización.

Tiempo	Trat.	PC/FDN	PC/FDA	FDA/FDN
7 días	T0	0,283 ± 0,012 ^b	0,451 ± 0,019 ^b	0,627 ± 0,010 ^{bc}
7 días	T1	0,351 ± 0,009 ^a	0,540 ± 0,015 ^a	0,651 ± 0,006 ^{ab}
7 días	T2	0,328 ± 0,008 ^a	0,538 ± 0,021 ^a	0,610 ± 0,010 ^d
14 días	T0	0,180 ± 0,006 ^d	0,284 ± 0,009 ^d	0,634 ± 0,010 ^{bc}
14 días	T1	0,224 ± 0,004 ^c	0,367 ± 0,005 ^c	0,610 ± 0,008 ^d
14 días	T2	0,181 ± 0,008 ^d	0,301 ± 0,014 ^d	0,601 ± 0,009 ^d
21 días	T0	0,146 ± 0,004 ^e	0,221 ± 0,006 ^e	0,662 ± 0,002 ^a

Tiempo	Trat.	PC/FDN	PC/FDA	FDA/FDN
21 días	T1	0,195 ± 0,003 ^c	0,316 ± 0,003 ^d	0,617 ± 0,005 ^{cd}
21 días	T2	0,169 ± 0,004 ^d	0,260 ± 0,006 ^e	0,649 ± 0,008 ^{ab}

Nota: PC: proteína cruda; FDN: fibra detergente neutra; FDA: fibra detergente ácida; Los valores corresponden a la media ± error estándar ($n = 3$). Letras diferentes dentro de cada columna indican diferencias significativas entre combinaciones tiempo × tratamiento según la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$).

La digestibilidad estimada de la materia seca disminuyó de forma significativa con el tiempo de cosecha en los tres tratamientos, siendo los mayores valores los que se obtuvieron en los primeros siete días, donde se alcanzó el 71,39 % para el tratamiento T0 y un 70,59 % para el tratamiento T2; los menores valores correspondieron a los tratamientos T1 a los 21 días de cosecha, donde se dio un 63,57 %. Aunque la fertilización química incrementó la producción de biomasa y la concentración de proteína cruda, también promovió una mayor acumulación de fibra estructural, reduciendo la digestibilidad potencial del forraje en comparación con las cosechas tempranas (Tabla 6).

Una tendencia similar fue observada para el valor relativo del forraje. Los mayores índices de calidad se registraron a los siete días, con valores de 185,31, 170,48 y 156,99 para T0, T2 y T1, respectivamente. Conforme con el avance del ciclo de crecimiento, el RFV fue decreciendo claramente en todos los tratamientos, obteniendo su valor más bajo en T1 a los 21 días (112,27). La magnitud de esta reducción, pone de manifiesto que la edad de cosecha es uno de los factores más importantes que afectan la calidad nutricional del forraje verde hidropónico (Tabla 6).

La energía neta de lactancia mostró un comportamiento consistente con el observado para la digestibilidad. Los valores más elevados se registraron en los tratamientos cosechados a los siete días, oscilando entre 1,67 y 1,78 Mcal kg⁻¹ de materia seca, mientras que los menores valores se observaron en T1 a los 21 días (1,50 Mcal kg⁻¹ de materia seca). La reducción progresiva de la ENL estuvo estrechamente asociada al incremento de las fracciones fibrosas FDA y FDN durante el proceso de maduración del cultivo.

Tabla 6

Indicadores integrados de calidad nutricional del forraje verde hidropónico de Z. mays en función del tiempo de cosecha y el tratamiento de fertilización.

Tiempo	Trat.	DMS (%)	RFV	ENL (Mcal kg ⁻¹ MS)
7 días	T0	71,39 ± 0,24 ^a	185,31 ± 1,37 ^a	1,78 ± 0,01 ^a
7 días	T1	68,37 ± 0,24 ^c	156,99 ± 1,27 ^c	1,67 ± 0,01 ^c
7 días	T2	70,59 ± 0,35 ^b	170,48 ± 1,46 ^b	1,75 ± 0,01 ^b
14 días	T0	68,26 ± 0,14 ^c	151,90 ± 1,18 ^d	1,67 ± 0,01 ^c
14 días	T1	65,92 ± 0,18 ^e	126,80 ± 0,93 ^f	1,59 ± 0,01 ^e
14 días	T2	67,35 ± 0,24 ^d	136,04 ± 1,18 ^e	1,64 ± 0,01 ^d
21 días	T0	65,59 ± 0,03 ^e	135,08 ± 0,14 ^e	1,57 ± 0,00 ^e
21 días	T1	63,57 ± 0,14 ^g	112,27 ± 0,46 ^h	1,50 ± 0,00 ^g
21 días	T2	64,46 ± 0,24 ^f	124,08 ± 0,71 ^g	1,53 ± 0,01 ^f

Nota: DMS: digestibilidad estimada de la materia seca; RFV: valor relativo del forraje; ENL: energía neta de lactancia; MS: materia seca; Los valores corresponden a la media ± error

estándar ($n = 3$). Letras diferentes dentro de cada columna indican diferencias significativas entre combinaciones tiempo $\times$ tratamiento según la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$).

3.6. Evaluación económica de los tratamientos

La estructura de costos variables presentó diferencias moderadas entre los tratamientos evaluados (Tabla 7). El tratamiento control (T0) registró el menor costos de producción con USD 2,44 se logró producir tres bandejas, y la fertilización orgánica (T2), así como la fertilización química (T1), alcanzaron costos de producción de USD 3,51 y USD 4,17, respectivamente. El incremento encontrado en T1 se asoció al consumo de las soluciones nutritivas HydroLeaf, mientras que el incremento en el costo de producción medido para el tratamiento fertilización orgánica (T2) fue debido a la aplicación de biol al ciclo de producción.

Tabla 7
Costos variables de producción del forraje verde hidropónico de Z. mays bajo diferentes esquemas de fertilización

Componente de costo	T0 (USD)	T1 (USD)	T2 (USD)
Semilla	1,05	1,05	1,05
Fertilización	0,00	1,73	1,07
Agua	0,05	0,05	0,05
Mano de obra	1,34	1,34	1,34
Costo total variable	2,44	4,17	3,51

A pesar de presentar el mayor costo de producción, T1 alcanzó el mayor rendimiento acumulado de biomasa, con 11,19 kg de forraje fresco y 2,240 kg de materia seca por tratamiento, seguido por T2 con 10,17 kg y 2,039 kg, respectivamente. El tratamiento control dio como resultado la producción de 9,30 kg de forraje fresco y de 1,865 kg de materia seca (Tabla 8).

Minimizando la expresión de la eficiencia económica en función del costo de un kilogramo de forraje fresco, T0 dio el valor más bajo (USD 0,26 kg⁻¹), y para continuar T2 (USD 0,35 kg⁻¹) y T1 (USD 0,37 kg⁻¹) (Tabla 8). En el costo de un kilogramo de materia seca se observó la misma tendencia, de nuevo T0 dio USD 1,31 kg⁻¹ en la medida de la eficiencia y T2 y T1 USD 1,72 y USD 1,86 kg⁻¹ respectivamente. Sin embargo, la incorporación del contenido de proteína cruda modificó la interpretación económica de los tratamientos. La fertilización química permitió obtener la mayor producción de proteína (0,230 kg por tratamiento), superando en 38,5 % a T2 y en 86,9 % al tratamiento control. Como consecuencia, T1 presentó el menor costo por kilogramo de proteína producida (USD 18,12 kg⁻¹), seguido por T0 (USD 19,83 kg⁻¹) y T2 (USD 21,12 kg⁻¹).

Tabla 8
Indicadores de eficiencia productiva y económica del forraje verde hidropónico de Z. mays.

Tratamiento	Forraje fresco (kg)	Materia seca (kg)	Proteína producida (kg)	Costo total (USD)	USD kg ⁻¹ FVH	USD kg ⁻¹ MS	USD kg ⁻¹ proteína
T0	9,30	1,865	0,123	2,44	0,26	1,31	19,83
T1	11,19	2,240	0,230	4,17	0,37	1,86	18,12
T2	10,17	2,039	0,166	3,51	0,35	1,72	21,12

Desde una perspectiva de costo incremental, la inversión adicional de USD 1,73 en T1 respecto al control permitió obtener 1,89 kg adicionales de forraje fresco, 0,375 kg adicionales de materia seca y aproximadamente 0,107 kg adicionales de proteína. Por su parte, T2 requirió una inversión adicional de USD 1,07 respecto a T0, generando incrementos de 0,87 kg de forraje fresco, 0,174 kg de materia seca y 0,043 kg de proteína.

4. Discusión

4.1. *Respuesta productiva del forraje verde hidropónico a la fertilización*

La fertilización ejerció un efecto significativo sobre la productividad del forraje verde hidropónico (FVH) de *Z. mays*, evidenciado por el incremento de biomasa fresca y materia seca en los tratamientos fertilizados respecto al control. La aplicación de fertilización química (T1) reportó los máximos rendimientos en toda la duración de la evaluación, por su parte, la fertilización orgánica (T2) consiguió los valores intermedios. Esto se deduce que las reservas que contiene el grano son la principal fuente de energía durante la germinación; sin embargo, un aumento en el suministro de recursos nutricionales favorece el crecimiento de la superficie foliar y de las raíces para aumentar la eficiencia de conversión de la semilla a la biomasa (Viteri et al., 2023).

La superioridad de T1 puede atribuirse a la disponibilidad inmediata de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y micronutrientes suministrados por la solución nutritiva. El nitrógeno desempeña un papel fundamental en la síntesis de aminoácidos, proteínas y clorofila, mientras que el fósforo participa en los procesos de transferencia energética y el potasio regula el transporte de fotoasimilados y el equilibrio osmótico (Valverde et al., 2017). En conjunto, estos elementos favorecen una mayor actividad metabólica y una tasa de crecimiento superior durante las primeras etapas de desarrollo.

Los resultados están en sintonía con otros trabajos actuales que afirman que el uso de soluciones nutritivas minerales equilibradas presenta incrementos en la biomasa del FVH de maíz. Herrera et al. (2022) y Ojo et al. (2024) demuestran que la disponibilidad de los nutrientes de forma continua incrementó la producción de biomasa fresca, a la vez que también potenció la utilización de agua de sistemas hidropónicos. Un estudio similar es el de Mahesh et al. (2024), llega a la conclusión de que la fertilización mineral es uno de los factores de manejo que tiene un impacto positivo importante sobre la producción de FVH, más aún cuando se le añade una adecuación de la densidad de siembra.

Aunque T2 presentó menores rendimientos que T1, la respuesta positiva respecto al control indica que el biol constituye una fuente nutricional viable para sistemas de producción sostenibles. La lenta disponibilidad de los nutrientes, así como la escasa concentración de los elementos limitan la velocidad de absorción y, por ende, el crecimiento de las plántulas (Viteri et al., 2023).

4.2. *Efecto de la fertilización sobre la calidad nutricional*

La fertilización no solo modificó la productividad del FVH, sino también su composición nutricional. La aplicación de fertilizantes incrementó de forma significativa el contenido de proteína cruda en comparación con el control, siendo la fertilización química la que produce las concentraciones de proteína cruda más elevadas independientemente de

la fase del ciclo de cultivo. Este comportamiento se encuentra estrechamente relacionado con la disponibilidad de nitrógeno en la solución nutritiva, el cual es un elemento imprescindible para la síntesis de aminoácidos, de proteínas estructurales y de enzimas que intervienen en el metabolismo de las plantas (Rengel et al., 2023).

El aumento de proteínas que se observó en T1 se encuentra en concordancia con las conclusiones de Borah et al. (2023), las cuales definitivamente afirman que la fertilización mineral aplicada en sistemas de FVH incrementando los contenidos de nitrógeno de los tejidos vegetales y alcanzado así un mejor nivel de calidad de los forrajes. Del mismo modo, diversos estudios han puesto de manifiesto que una apropiada disponibilidad de nitrógeno durante la fase de crecimiento incrementará la concentración de compuestos nitrogenados que finalmente favorecen el valor nutritivo del recurso vegetal destinado a la alimentación de animales (Adeyemi et al., 2020; Mahesh et al., 2024). Por otro lado, el incremento del contenido proteico estuvo asociado a los incrementos en los valores de FDN y FDA, siendo más evidente durante las cosechas más tardías. Tal hecho da cuenta del avance del proceso de maduración fisiológica de la planta, en el que han de incrementarse las tasas de deposición de hemicelulosa, celulosa y lignina en las paredes celulares. Por lo tanto, puede afirmarse que efectivamente, el forraje tiene mayor estructura y acumula más biomasa; sin embargo, tal fenómeno lleva a una disminución progresiva de la proporción de tejidos metabólicamente activos y muy digestibles (Ojo et al., 2024).

Los indicadores integrados de calidad nutritiva confirmaron la tendencia. Las relaciones de PC/FDN y PC/FDA fueron más altas en los tratamientos fertilizados, siendo T1 el que presentó valores superiores, por otro lado, la digestibilidad estimada de la MS, el valor relativo del forraje y la energía neta de lactancia disminuyeron a medida que aumentó la edad de cosecha. Los resultados indicaron que la fertilización aumenta el contenido nutritivo absoluto del forraje, aunque sus efectos hay que entenderlos en el marco de los cambios estructurales que se producen por el crecimiento de la planta (Guo et al., 2025; Jeon et al., 2022; Rodrigues et al., 2023). Por lo tanto, la calidad nutritiva del FVH depende no solo de la fertilización que se utiliza, sino también de la época de la cosecha que se realiza.

4.3. *Compromiso entre productividad y calidad nutricional*

Uno de los hallazgos más relevantes de esta investigación fue la existencia de un compromiso entre productividad y calidad nutricional. A medida que aumentó la edad de cosecha, la producción de biomasa fresca y materia seca se incrementó significativamente; sin embargo, varios indicadores asociados a la calidad nutritiva mostraron una tendencia opuesta. Este patrón ha sido ampliamente documentado en gramíneas forrajeras y responde a cambios fisiológicos inherentes al desarrollo vegetal (Rodrigues et al., 2023).

El FVH en los primeros estadios de desarrollo es principalmente formulado por tejidos jóvenes con alta actividad metabólica, alta concentración de proteínas solubles y baja proporción de los componentes de estructura. Durante la fase avanzada del crecimiento, se incrementa la deposición de celulosa y hemicelulosa en las paredes celulares de las plantas. Tal circunstancia propicia el crecimiento de la biomasa del FVH, pero disminuye la digestibilidad potencial del forraje, lo que explicaría la disminución en los números de DMS, RFV y ENL a medida que se retrasa la fecha de cosecha (Guo et al., 2025; Jeon

et al., 2022). La fertilización con productos químicos intensificó parcialmente esta situación. Aunque T1 exhibió los mayores rendimientos y contenidos proteicos, también mostró las mayores concentraciones de fibra cuando se lo compara con las cosechas precoces. Este comportamiento indica que el aumento de los nutrientes disponibles activa de manera simultánea la producción de los tejidos metabólicos y los tejidos estructurales, de manera que las ventajas del incremento de la biomasa no siempre se ven reflejadas en mejoras suficientes de la digestibilidad o del valor energético.

Desde una perspectiva nutricional, estos resultados indican que la optimización del FVH requiere encontrar un equilibrio entre cantidad y calidad. Las cosechas tempranas proporcionan forrajes que son más digestibles y poseen un mayor valor energético, en tanto que las cosechas tardías incrementan la producción de biomasa y de proteína total (Jeon et al., 2022). Por lo tanto, la decisión del momento de la cosecha dependerá del objetivo productivo buscado. En este sentido, cosechas tempranas son más adecuadas para los sistemas con orientaciones que buscan maximizar el valor energético y la digestibilidad de la producción, mientras que los sistemas que persiguen maximizar la disponibilidad de biomasa y proteína pueden emplear cosechas más tardías y esquemas de fertilización mineral.

4.4. Implicaciones económicas para sistemas ganaderos amazónicos

La evaluación económica evidenció que la fertilización modificó significativamente la eficiencia productiva del sistema. Aunque el tratamiento control presentó los menores costos unitarios para la producción de biomasa fresca y materia seca, la fertilización química generó una mayor producción de proteína por unidad de costo, lo que demuestra que la rentabilidad técnica de un sistema no siempre coincide con el menor costo de producción.

El tratamiento T1 presentó el menor costo por kg de proteína producida, resultado que podría asociarse con las altas producciones de MS y las elevadas concentraciones de PC que al final de la etapa se obtuvieron. Este hecho podría ser importante para los sistemas ganaderos de la Amazonía ecuatoriana, donde la disponibilidad de proteína suele ser uno de los principales factores que limitan la productividad animal, sobre todo en épocas de lluvia extrema o de mala calidad de los pastos. La fertilización orgánica presentó unos costos unitarios similares a los de T1 y una respuesta intermedia en términos de la producción. Desde el punto de vista de la sostenibilidad, puede ser una alternativa interesante para pequeños productores que puedan disponer de fuentes locales de materia orgánica y que deseen reducir la dependencia de fertilizantes sintéticos. Diferentes estudios recientes indican que la combinación de bio-fertilizantes y la hidroponía pueden ayudar a mejorar la circularidad de nutrientes a la vez que disminuyen la huella medioambiental de los sistemas de producción animal (Barquero et al., 2019; Elsallam et al., 2021; Kristley et al., 2023; Viteri et al., 2023; Yhony et al., 2018).

También, el FVH presenta beneficios estratégicos para la zona amazónica por su escaso requerimiento de superficie, bajo consumo de agua y la posibilidad de producir forraje de manera continua, durante todo el año. Tal cual se desarrolló el FVH, permite reducir la vulnerabilidad de los sistemas ganaderos frente al escaso recurso forrajero de pasturas, en épocas de estaciones secas y húmedas. De este modo, la práctica de FVH fertilizado podría representar una herramienta adicional para el aumento de la resiliencia

alimentaria de las explotaciones ganaderas de pequeña y mediana escala en ambientes tropicales húmedos.

5. Conclusiones

La adición de fertilizantes químicos mejoró notablemente la productividad del forraje verde hidropónico de *Z. mays* con incrementos aproximados del 20% en lo que respecta a biomasa fresca y a materia seca respecto de los controles.

El tipo de fertilización utilizado y la edad de la cosecha modificaron la calidad nutricional. La T1 proporcionó mayor proteína cruda y proporcionó mejores relaciones proteína:fibra, mientras que el avance del ciclo cultivado incrementó la FDN y la FDA y redujo la DMS, el RFV y el ENL.

Se constató una clara relación inversamente proporcional entre rendimiento y calidad, ya que las cosechas más tardías maximizaron la biomasa total y la proteína total, y las cosechas más tempranas mantuvieron la digestibilidad y el valor energético.

Económicamente, la T0 proporcionó los menores costos por kilo de biomasa; pero la T1 presentó los menores costos por kilo de proteína producida, evidenciando una mayor eficiencia nutricional del gasto.

Contribución de los autores: Conceptualización: M.L.L.A y B.G.J.I.; Metodología: M.L.L.A y B.G.J.I.; Análisis formal: M.L.L.A y B.G.J.I.; Validación: B.G.J.I.; Investigación: M.L.L.A; Recursos: M.L.L.A; Curación de datos: M.L.L.A; Visualización: M.L.L.A; Redacción borrador original: M.L.L.A; Redacción, revisión y edición: M.L.L.A y B.G.J.I.; Supervisión: B.G.J.I. Todos los autores han leído y aprobado la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento: Esta investigación no recibió financiación externa.

Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Declaración de disponibilidad de datos: Los datos están disponibles previa solicitud a los autores de correspondencia: anaya.moreno@epoch.edu.ec

Referencias Bibliográficas

- Adeyemi, T. A., Adeoye, S. A., Ogunyemi, T. J., Adedeji, E. A., Oluyemi, B., & Ojo, V. O. A. (2020). Comparisons of nutrient solutions from organic and chemical fertilizer sources on herbage yield and quality of hydroponically produced maize fodder. *Journal of Plant Nutrition*, 44(9), 1258–1267. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1845382>
- Anger, J. C., Loncke, C., Omphalius, C., Boutinaud, M., Guinard-Flament, J., Lapierre, H., & Lemosquet, S. (2024). Synthesis of milk components involves different mammary metabolism adaptations in response to net energy and protein supplies in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 107(5), 2883–2899. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-23826>
- Barquero, V., Nieuwenhuyse, A., & García-Arguedas, R. (2019). Efecto de diferentes concentraciones de sales fertilizantes sobre la producción primaria de forraje verde hidropónico de maíz (*Zea mays* L.), San Carlos, Costa Rica. *Revista*

- AgroInnovación En El Trópico Húmedo*, 2(1), 12–17.
<https://doi.org/10.18860/rath.v2i1.4688>
- Borah, L., Bhuyan, R., Saikia, B., Bordoloi, J., Kalita, U., & Kalita, M. (2023). Nutritive value of hydroponic and conventionally grown maize fodder in Assam: a comparative study. *Pharma Innov. J*, 1459–1461.
- Elmulthum, N. A., Zeineldin, F. I., Al-Khateeb, S. A., Al-Barrak, K. M., Mohammed, T. A., Sattar, M. N., & Mohmand, A. S. (2023). Water Use Efficiency and Economic Evaluation of the Hydroponic versus Conventional Cultivation Systems for Green Fodder Production in Saudi Arabia. *Sustainability (Switzerland)*, 15(1), 822.
<https://doi.org/10.3390/SU15010822/S1>
- Elsallam, M. E. A., EL-Moslami, S. H., El-Al, A. A., & Zahran, H. F. (2021). Scaling-up production of cost-effective and eco-friendly bio-fertilizer and its application on Barley green fodder via IoT hydroponic system. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 19(1), 97. <https://doi.org/10.1186/S43141-021-00196-1>
- Folina, A., Kakabouki, I., Stavropoulos, P., Mavroeidis, A., Tsiplakou, E., & Bilalis, D. (2025). Proximate Composition and Nutritional Indices of Fenugreek Under Salinity Stress: The Role of Biocyclic Vegan and Other Organic Fertilization Systems in Forage Quality. *Crops* 2025, Vol. 5, Page 24, 5(3), 24.
<https://doi.org/10.3390/CROPS5030024>
- Ghasemi-Mobtaker, H., Sharifi, M., Taherzadeh-Shalmai, N., & Afrasiabi, S. (2022). A new method for green forage production: Energy use efficiency and environmental sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 363, 132562.
<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.132562>
- González, E., Ceballos, J., & Benavides, O. (2015). Producción de forraje verde hidropónico de maíz Zea mays L. en invernadero con diferentes niveles de silicio. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 32(1), 75–83.
<https://doi.org/10.22267/RCIA.153201.26>
- Guo, C., Pu, X., Zhao, Y., Fu, Y., Wei, X., & Xu, C. (2025). Regulatory effects of row spacing on plant-soil feedbacks in an oat-forage pea intercropping system: a two-year, dual-location study. *BMC Plant Biology*, 25(1), 1762.
<https://doi.org/10.1186/S12870-025-07797-9>
- Herrera, J. P. N., & Guerrero, E. M. (2022). Forraje verde hidropónico y organopónico de maíz como suplemento nutricional para ovinos del Piedemonte Amazónico. *RIAA, ISSN-e 2145-6453, Vol. 13, N°. 1, 2022, 13(1), 8*.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8202373&info=resumen&idioma=ENG>
- Jeon, S., Kang, H., Park, S., & Seo, S. (2022). Evaluation of the Equations to Predict Net Energy Requirement for Lactation in the Cattle Feeding System: Based on the Literature Database. *Agriculture (Switzerland)*, 12(5), 654.
<https://doi.org/10.3390/AGRICULTURE12050654/S1>
- Kristley, D., Celi, S., Tairy, E., Torres, A., Mariana, U., Juan De Pasto, S., Nariño, C., David, K., & Sabando, C. (2023). Producción de forraje verde hidropónico de maíz

- (*Zea mays* L.) con aplicación de microorganismos eficientes. *Revista Criterios*, ISSN-e 2256-1161, ISSN 0121-8670, Vol. 30, N°. 2, 2023 (Ejemplar Dedicado a: Revista Criterios), Págs. 43-50, 30(2), 43–50. <https://doi.org/10.31948/rev.criterios>
- López-Alban, A., Moreno-López, L., Medina-Gahona, A., & Ureta-Leones, D. (2026). Evaluación del almacenamiento de carbono en un sistema silvopastoril amazónico tradicional y su contribución en la mitigación del cambio climático. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 14(1), e950–e950. <https://cfores.upr.edu.cu/index.php/cfores/article/view/950>
- Mahesh, M. S., Chaudhary, S. K., Tewari, D., & Dutta, N. (2024). Hydroponic forage for ruminant feeding: A comprehensive review. *Animal Nutrition and Feed Technology*, 24(2), 441–459. <https://doi.org/10.5958/0974-181X.2024.00034.9>
- Masucci, F., Serrapica, F., Cutrignelli, M. I., Sabia, E., Balivo, A., & Di Francia, A. (2024). Replacing maize silage with hydroponic barley forage in lactating water buffalo diet: Impact on milk yield and composition, water and energy footprint, and economics. *Journal of Dairy Science*, 107(11), 9426–9441. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-24902>
- Naik, P. K., Swain, B. K., & Singh, N. P. (2015). Production and Utilisation of Hydroponics Fodder. *Indian Journal of Animal Nutrition Indian J. Anim. Nutr.* 2015, 32(1), 1–9. www.IndianJournals.com
- Notenbaert, A. M. O., Douchamps, S., Villegas, D. M., Arango, J., Paul, B. K., Burkart, S., Rao, I., Kettle, C. J., Rudel, T., Vázquez, E., Teutscherova, N., Chirinda, N., Groot, J. C. J., Wironen, M., Pulleman, M., Louhaichi, M., Hassan, S., Oberson, A., Nyawira, S. S., ... Peters, M. (2021). Tapping Into the Environmental Co-benefits of Improved Tropical Forages for an Agroecological Transformation of Livestock Production Systems. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 742842. <https://doi.org/10.3389/FSUFS.2021.742842/FULL>
- Ojo, V., Adeoye, S., Adeyemi, T., Oyaniran, D., Bode-Thomas, E., Hassan, V., Okunlola, M., & Arigbede, O. (2024). Agronomic characteristics and chemical composition of hydroponic maize fodder as influenced by animal waste solutions. *TH*, 7(1), 4062-. <https://doi.org/10.24294/TH.V7I1.4062>
- Rengel, Z., Cakmak, I., & White, P. J. (2023). Marschner's Mineral Nutrition of Plants. *Marschner's Mineral Nutrition of Plants*, 1–795. <https://doi.org/10.1016/C2019-0-00491-8>
- Rivera, A., Moronta, M., González-Estopiñán, M., González, D., Perdomo, D., García, D. E., & Hernández, G. (2010). Producción de forraje verde hidropónico de maíz (*Zea mays* L.) en condiciones de iluminación deficiente Hydroponic forage production of corn (*Zea mays* L.) under natural conditions of light deficiency. *Zootecnia Tropical*, 28(1), 33–41. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-72692010000100005&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Rodrigues, J. G., dos, G., Ítavo, L. C. V., Pereira, M. D. G., Gurgel, A. L. C., da Costa, A. B. G., Vêras, E. L. D. L., Monteiro, G. O. D. A., Dias, A. M., & Ítavo, C. C. B. F. (2023). Forage Accumulation and Nutritional Characteristics of *Brachiaria* Cultivars

- Grown in a Semi-arid Environment. *Tropical Animal Science Journal*, 46(1), 85–96. <https://doi.org/10.5398/TASJ.2023.46.1.85>
- Rohweder, D. A., Barnes, R. F., & Jorgensen, N. (1978). Proposed Hay Grading Standards Based on Laboratory Analyses for Evaluating Quality. *Journal of Animal Science*, 47(3), 747–759. <https://doi.org/10.2527/JAS1978.473747X>
- Urbina, M. A., Correa, F., Aburto, F., & Ferrio, J. P. (2020). Adsorption of polyethylene microbeads and physiological effects on hydroponic maize. *Science of The Total Environment*, 741, 140216. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.140216>
- Valverde, Y. A., Mera, A., Castro, C., & Gabriel-Ortega, J. (2017). Producción de forraje hidropónico de maíz (*Zea mays* L.) utilizando fertilizantes químicos y orgánicos. *Journal of the Selva Andina Biosphere*, 5(2), 144–151. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2308-38592017000200009&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Viteri, L. H. A., Chalaca, M. F. C., & Buitrón, K. T. G. (2023). Efecto del uso de tres dosis de biol en la producción de forraje verde hidropónico de maíz (*Zea mays*) en la Granja Experimental Mishilí. *Reincisol.*, 2(4), 146–160. [https://doi.org/10.59282/REINCISOL.V2\(4\)146-160](https://doi.org/10.59282/REINCISOL.V2(4)146-160)
- Yhony, V.-L., Fernando, A.-V., Francisco, O.-I., Luis, A.-C. J., Julio, G.-O., Del, D., Resumen, A., & De, D. (2018). Producción de tres variedades de Forraje verde hidropónico con diferentes dosis de fertilizante nitrogenado. *Journal of the Selva Andina Research Society*, 9(2), 120–126. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2072-92942018000200008&lng=es&nrm=iso&tlng=es