



EFFECTO DE LA NUTRICIÓN MINERAL EN EL RENDIMIENTO DEL FORRAJE VERDE HIDROPÓNICO DE CEBADA (*HORDEUM VULGARE* L.)

EFFECT OF MINERAL NUTRITION ON THE YIELD OF HYDROPONIC GREEN BARLEY FORAGE (*HORDEUM VULGARE* L.)

EFEITO DA NUTRIÇÃO MINERAL NO RENDIMENTO DA FORRAGEM VERDE HIDROPÔNICA DE CEVADA (*HORDEUM VULGARE* L.)

Autores:

✉ **Abraham Gavilanes***

cvasqz@hotmail.com

✉ **Carlos Vásquez**

ca.vasquez@uta.edu.ec

✉ **Olguer León-Gordon**

oa.leon@uta.edu.ec

¹Universidad Técnica de Ambato, Cevallos, Ecuador

* Autor para correspondencia.

Editor Académico

Jean Carlos Pérez Parra

Citación sugerida: Gavilanes, A. , Vásquez, C. , León-Gordon, O. (2025). Efecto de la nutrición mineral en el rendimiento del forraje verde hidropónico de cebada (*Hordeum vulgare* L.). *Revista Bases de la Ciencia*, 10(3), 20-29. DOI: 10.33936/revbasdelaciencia.v10i3.8132

Recibido: 21/09/2025

Aceptado: 22/10/2025

Publicado: 31/10/2025

Resumen

La producción de forraje hidropónico constituye una tecnología relevante para la obtención de forraje de alta calidad en cortos periodos de tiempo. La presente investigación tuvo como objetivo determinar el rendimiento del forraje verde hidropónico de cebada (*Hordeum vulgare* L.) bajo el uso de dos soluciones nutritivas. Cada solución presentó variaciones en el contenido de nutrientes como N, P y K, así como de macronutrientes secundarios (Mg, S y Ca) y micronutrientes, y se evaluó su efecto sobre los días hasta la germinación, altura de planta, peso fresco y seco de la raíz y de la parte aérea, incidencia de contaminantes y rendimiento en peso fresco del brote. Los resultados mostraron que la solución con mayor contenido de nutrientes (solución nutritiva A) produjo los mayores valores de altura de planta (19.1 cm), grosor del tapete radicular (5.8 cm), peso fresco y seco de la parte aérea (60.9 y 24.9 g, respectivamente), así como de peso fresco y seco del tapete radicular (147.7 y 77.3 g, respectivamente), y el mayor rendimiento (13.9 kg/m²). No se observaron efectos significativos de las soluciones nutritivas sobre el número de hojas, la calidad del tapete radicular, la incidencia de contaminantes ni los días a la cosecha. Si bien esta tecnología es poco conocida en Ecuador, la alta calidad del forraje obtenido mediante hidroponía sugiere la necesidad de promover su difusión entre los productores de la región, con el fin de demostrar la factibilidad de su implementación.

Palabras clave: Cebada, forraje verde, hidroponía.

Abstract

Hydroponic forage production constitutes a relevant technology for obtaining high-quality forage within short production cycles. The objective of this study was to determine the yield of hydroponic green barley forage (*Hordeum vulgare* L.) under two nutrient solutions. Each solution differed in the content of nutrients such as N, P, and K, as well as secondary macronutrients (Mg, S, and Ca) and micronutrients, and their effects were evaluated on days to germination, plant height, fresh and dry weight of roots and aerial parts, incidence of contaminants, and fresh biomass yield. The results showed that the solution with the higher nutrient content (nutrient solution A) produced the greatest plant height (19.1 cm), root mat thickness (5.8 cm), fresh and dry weight of the aerial part (60.9 and 24.9 g, respectively), fresh and dry weight of the root mat (147.7 and 77.3 g, respectively), and the highest yield (13.9 kg/m²). No significant effects of the nutrient solutions were observed on the number of leaves, root mat quality, incidence of contaminants, or days to harvest. Although this technology is still little known in the country, the high quality of hydroponically produced forage highlights the need to promote its dissemination among producers in the region in order to demonstrate the feasibility of its adoption.

Keywords: Barley, green forage, hydroponics.

Resumo

A produção de forragem hidropônica constitui uma tecnologia relevante para a obtenção de forragem de alta qualidade em curtos períodos de produção. O objetivo deste estudo foi determinar o rendimento da forragem verde hidropônica de cevada (*Hordeum vulgare* L.) sob o uso de duas soluções nutritivas. Cada solução apresentou variações no conteúdo de nutrientes como N, P e K, bem como de macronutrientes secundários (Mg, S e Ca) e micronutrientes, e avaliou-se o seu efeito sobre os dias até a germinação, altura das plantas, peso fresco e seco das raízes e da parte aérea, incidência de contaminantes e rendimento em biomassa fresca. Os resultados demonstraram que a solução com maior conteúdo de nutrientes (solução nutritiva A) proporcionou os maiores valores de altura de planta (19.1 cm), espessura do tapete radicular (5.8 cm), peso fresco e seco da parte aérea (60.9 e 24.9 g, respectivamente), peso fresco e seco do tapete radicular (147.7 e 77.3 g, respectivamente), além do maior rendimento (13.9 kg/m²). Não foram observados efeitos significativos das soluções nutritivas sobre o número de folhas, a qualidade do tapete radicular, a incidência de contaminantes ou os dias até a colheita. Embora essa tecnologia ainda seja pouco conhecida no país, a alta qualidade da forragem produzida por hidroponia indica a necessidade de promover sua divulgação entre os produtores da região, a fim de demonstrar a viabilidade de sua adoção.

Palavras chave: Cevada, forragem verde, hidroponia.





1. Introducción

La nutrición animal constituye un factor de suma relevancia para garantizar la seguridad alimentaria; sin embargo, en la actualidad existe una marcada brecha entre la oferta y la demanda de alimentos, atribuida a diversos factores, entre los que destacan el cambio climático, el crecimiento poblacional y la progresiva escasez de tierras fértiles (Ghorbel & Koşum, 2022). Frente a este escenario, la producción de forraje mediante sistemas hidropónicos surge como una alternativa viable, ya que permite asegurar la disponibilidad de alimento para el ganado en zonas donde existe acceso al recurso hídrico, pero donde los costos de mano de obra y fertilizantes resultan elevados (Shit, 2019).

La producción de forraje hidropónico es una técnica que se remonta al siglo XIX y se basa en la obtención de forraje fresco a partir de granos de cereales, utilizando únicamente agua o soluciones nutritivas ricas en elementos esenciales como nitrógeno, fósforo, potasio, azufre, calcio y magnesio, los cuales favorecen la germinación y el crecimiento vegetal. Mediante este sistema es posible producir plantas verdes en periodos cortos, que oscilan entre 6 y 9 días (Wang et al., 2019). Además de permitir la obtención de forraje de alta calidad nutricional, este método reduce significativamente la incidencia de insectos plaga, enfermedades y la contaminación por malezas, debido a que las plantas se desarrollan en bandejas y no tienen contacto directo con el suelo (Bakshi et al., 2017).

El forraje verde hidropónico (FVH) es un sistema de producción de biomasa vegetal obtenido mediante la germinación y crecimiento temprano de semillas en ausencia de suelo, bajo condiciones controladas y con el uso de agua o soluciones nutritivas, en ciclos cortos de aproximadamente 7 a 12 días (Reddy & Harani, 2023). El FVH es obtenido a partir de cultivos como cebada, trigo, maíz, alfalfa y avena representa un insumo estratégico para la nutrición animal, ya que mediante esta tecnología se pueden producir entre 6 y 10 kg de forraje fresco a partir de 1.0 kg de grano, en un periodo de 7 a 10 días y bajo condiciones ambientales controladas de temperatura, humedad y luz (Ahamed et al., 2023). Este sistema resulta especialmente relevante en regiones donde la escasez de agua y la variabilidad climática, asociada a periodos de sequía o exceso de lluvias, limitan la producción ganadera convencional (Saidi & Abo Omar, 2015).

Diversos estudios han documentado los beneficios del uso del forraje verde hidropónico en la alimentación animal. En particular, el forraje obtenido a partir de granos de cebada ha cobrado creciente importancia, ya que constituye una alternativa eficiente para la producción de forraje sin requerir suelo agrícola, con altas tasas de germinación y un rápido crecimiento (Al-Baadani et al., 2022). Durante el proceso de germinación, la activación de enzimas hidrolíticas transforma proteínas, almidón y lípidos en compuestos más simples y fácilmente digeribles, como aminoácidos, azúcares y ácidos grasos. Asimismo, se incrementa el contenido de fibra cruda y se reduce la concentración de ácido fítico, inhibidores de proteasa y otros antinutrientes quelantes de minerales, lo que mejora la digestibilidad y el aprovechamiento de los nutrientes (Girma & Gebremariam, 2018).

Adicionalmente, se ha demostrado que la inclusión de forraje hidropónico de cebada en la dieta animal mejora el desempeño productivo en animales que presentan deficiencias de proteínas, energía o minerales. Este efecto se ve reforzado cuando se combina con alimentos de baja calidad nutricional. En este contexto, Yisif et al. (2023) evidenciaron que la suplementación con cebada hidropónica y concentrado incrementó tanto la producción total de leche como el contenido de grasa y sólidos totales en ovejas Hamdani. Otro beneficio relevante de la producción de cebada hidropónica es su bajo consumo de agua en comparación con los sistemas de producción convencionales. Bajo este enfoque, la germinación se convierte en un proceso de bajo costo y sostenible, que mejora la calidad nutricional y el contenido de compuestos funcionales del grano, así como su palatabilidad, digestibilidad y biodisponibilidad (Cáceres et al., 2017). Considerando los múltiples beneficios asociados a la producción de forraje hidropónico, el presente estudio se planteó evaluar el efecto de la nutrición mineral en la producción de forraje verde hidropónico de cebada (*Hordeum vulgare* L.).

2. Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio se desarrolló entre enero y febrero de 2024 bajo condiciones controladas de invernadero en una granja agrícola ubicada en la localidad de San Pedro, cantón Cevallos, provincia de Tungurahua, Ecuador, a una altitud de 3030 m s. n. m. (1°21'55,71" S; 78°37'26,59" O). Según lo reportado por Aguirre (2012), la zona se caracteriza por una temperatura media anual de 13.7 °C y una precipitación promedio anual de 1464 mm.



Manejo del experimento

Se evaluó el efecto de dos soluciones nutritivas (A y B), las cuales difirieron en la concentración de macronutrientes primarios, macronutrientes secundarios y micronutrientes, sobre el rendimiento de cebada (Tabla 1). La solución B no contenía potasio, lo que permitió evaluar el efecto de su omisión parcial sobre el crecimiento del forraje hidropónico. Adicionalmente, se consideró un tratamiento testigo sin aplicación de solución nutritiva (control). El experimento se condujo bajo un diseño completamente al azar con tres repeticiones.

Tabla 1. Composición de las soluciones nutritivas evaluadas.

Nutriente	Solución nutritiva A (g/L)	Solución nutritiva B (g/L)
Nitrógeno (N)	49.0	12.0
Fósforo (P)	26.0	4.0
Potasio (K)	75.7	—
Calcio (Ca)	40.3	10.5
Magnesio (Mg)	12.8	2.8
Azufre (S)	10.4	0.8
Hierro (Fe)	0.45	0.10
Boro (B)	0.1125	0.05
Manganeso (Mn)	0.25	0.025
Zinc (Zn)	0.0518	0.0014
Cobre (Cu)	0.375	0.0037
Molibdeno (Mo)	0.202	0.0007

Las concentraciones mostradas corresponden a soluciones madre concentradas preparadas en tres fracciones químicas, las cuales se diluyeron a razón de 3 mL de cada fracción por litro de agua para obtener la solución nutritiva final. Los niveles se seleccionaron para generar dos gradientes contrastantes de disponibilidad mineral (alta y baja concentración) con el fin de evaluar respuesta productiva y fisiológica del cultivo. Se utilizó 1 kg de semillas por tratamiento, distribuidos equitativamente entre las tres repeticiones, las cuales fueron previamente desinfectadas por inmersión en una solución de hipoclorito de sodio al 5 % durante 15 min y enjuagadas con agua. Las semillas fueron aireadas durante 25 min posteriores al remojo mediante drenado completo y exposición en bandeja perforada antes de la siembra.

Se registró el peso inicial de las semillas y posteriormente se distribuyeron de manera homogénea en bandejas germinadoras (50 × 35 × 5 cm) y se cubrieron con plástico oscuro para favorecer el proceso de germinación. Se registró el número de días a la germinación (medido como el tiempo transcurrido hasta la emergencia) y el porcentaje de germinación (número de plántulas y el número de semillas germinadas).

La aplicación de las soluciones nutritivas se realizó con la aparición de las primeras hojas, aplicando diariamente las soluciones nutritivas correspondientes junto con el riego, el cual fue aplicado mediante aspersores con un caudal aproximado de 525 mL/min durante 1 min por evento, equivalente a 525 mL/bandeja/día. Dos días antes de la cosecha, se suspendió la aplicación de las soluciones nutritivas y se utilizó únicamente agua, con el fin de eliminar posibles residuos de sales minerales en hojas y raíces. Al momento de la cosecha, se evaluaron 10 plantas al azar por bandeja y se determinó la altura de planta, medida desde el cuello hasta el ápice de la hoja. Asimismo, se determinó el número de hojas por planta, el peso fresco y seco de la planta determinado en plantas sometidas a secado en estufa a 40 °C hasta alcanzar peso constante. El contenido de materia seca se calculó mediante la expresión:

$$\%MS = \frac{\text{Peso de materia seca (g)}}{\text{Peso de materia fresca (g)}} \times 100$$

Adicionalmente, se evaluó la calidad del tapete radicular mediante la observación de sus características físicas, la incidencia de contaminantes (colonias visibles de hongos, bacterias u otros organismos y cuya incidencia se expresó como porcentaje de superficie afectada por bandeja) y los días requeridos para la cosecha.





Análisis estadístico

Los datos obtenidos fueron sometidos a análisis de varianza (ANOVA) y, cuando se detectaron diferencias significativas, las medias se compararon mediante la prueba de Tukey con un nivel de significancia de $p < 0.05$ usando el paquete estadístico Statistix versión 10.0.

3. Resultados

Días a la germinación y porcentaje de germinación

La germinación de las semillas de cebada ocurrió de manera uniforme a los tres días después de haber sido sumergidas en agua cuando se alcanzó el 98 % de la germinación (Figura 1).

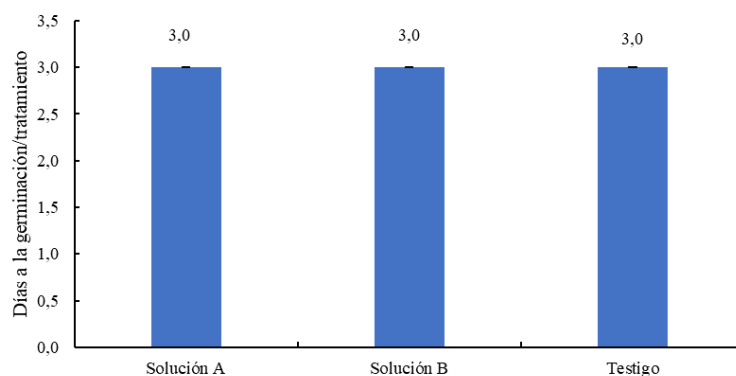


Figura 1. Días requeridos para alcanzar el 98 % de la germinación en semillas de cebada sometidas a diferentes soluciones nutritivas.

Altura de planta y número de hojas

La altura de las plantas de cebada fue afectada por el tipo de solución nutritiva y las plantas tratadas con la solución nutritiva A alcanzaron los máximos valores (19.1 cm), seguidos de las plantas tratadas con la solución nutritiva B que alcanzaron 14.3 cm, que representó una reducción de 25.1 % respecto a la solución nutritiva A. Asimismo, las plantas del tratamiento control (testigo) alcanzaron el menor valor de altura de planta (13.1 cm), siendo 31.2 % menor que las plantas del tratamiento con solución nutritiva A (Figura 2). Por otra parte, el número de hojas por planta no fue afectado significativamente por el tipo de solución nutritiva, variando entre 1 y 3 en todos los tratamientos.

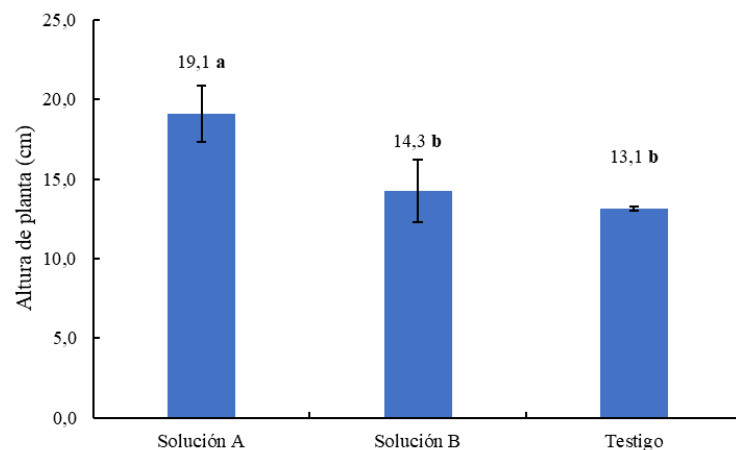


Figura 2. Altura de plantas de cebada hidropónica sometidas a dos tipos de soluciones nutritivas.



Grosor del tapete radicular

El grosor del tapete radicular también mostró diferencias significativas por efecto del tipo de solución nutritiva, puesto que las plantas tratadas con la solución nutritiva A alcanzaron el mayor grosor del tapete radicular, con un promedio de 5.8 cm, mientras que las plantas tratadas con la solución nutritiva B no mostraron diferencias con los resultados observados en el tratamiento testigo, las cuales mostraron valores de 4.6 y 4.2 cm, respectivamente, lo cual representó una disminución de 20.6 y 27.6 % en cada caso (Figura 3).

Con relación a la calidad del tapete, en todos los tratamientos se observaron raíces de excelente condición asimismo no se observó la presencia de ningún tipo de contaminantes.

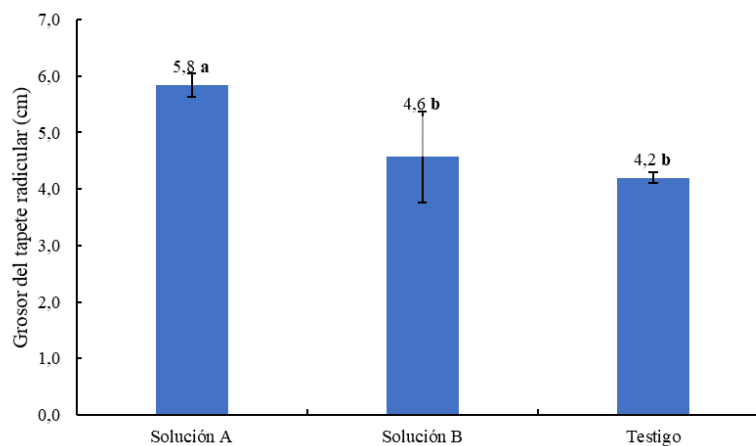


Figura 3. Grosor del tapete radicular en plantas de cebada hidropónica sometidas a dos tipos de soluciones nutritivas.

Peso fresco y peso seco del tapete radicular y de la parte aérea de plantas de cebada producidas por hidroponía

Se detectó un efecto altamente significativo del tipo de solución nutritiva sobre el peso fresco y peso seco del tapete radicular y parte aérea de las plantas de cebada producidas por hidroponía (Figuras 4 A-B). El peso fresco del tapete radicular fue significativamente mayor en las plantas sometidas a fertilización con la solución nutritiva A, en las que el peso fresco alcanzó un valor promedio de 147.7 g. Seguidamente, las plantas sometidas a la solución nutritiva B alcanzaron un valor promedio ligeramente inferior (134.5 g de peso fresco) lo que representó un 9.0 % de disminución con respecto a la solución nutritiva A. Sin embargo, una disminución significativamente mayor fue observada en las plantas del tratamiento testigo que mostraron un 54.7 % de variación en el peso fresco, ubicándose en 66.8 g (Figura 4A). Un comportamiento similar fue observado en el peso fresco de la parte aérea de las plantas de cebada, siendo estos valores superiores en plantas que fueron mantenidas con la solución nutritiva A, con un promedio de 60.9 g de peso fresco, mostrándose una tendencia a disminuir tanto en el tratamiento con la solución nutritiva B (43.4 g) como en el tratamiento testigo (37.9 g), siendo 28.8 y 37.7 % menor que en el mejor tratamiento (Figura 4B). En cuanto al peso seco, se observó un comportamiento similar al registrado para el peso fresco del tapete radicular y la parte aérea. Aunque las plantas de cebada tratadas con la solución nutritiva A presentaron valores numéricamente superiores, en comparación con aquellas sometidas a la solución B (que mostraron reducciones del 14.1 % en el tapete radicular y 22.8 % en la parte aérea), estas diferencias no fueron estadísticamente significativas. Asimismo, una disminución significativamente mayor fue registrada en las plantas del tratamiento testigo, las cuales tuvieron un peso seco 69.7 % menor en el tapete radicular y 66.3 % en la parte aérea, cuando fueron comparadas con las plantas del tratamiento que contenía la solución nutritiva A.

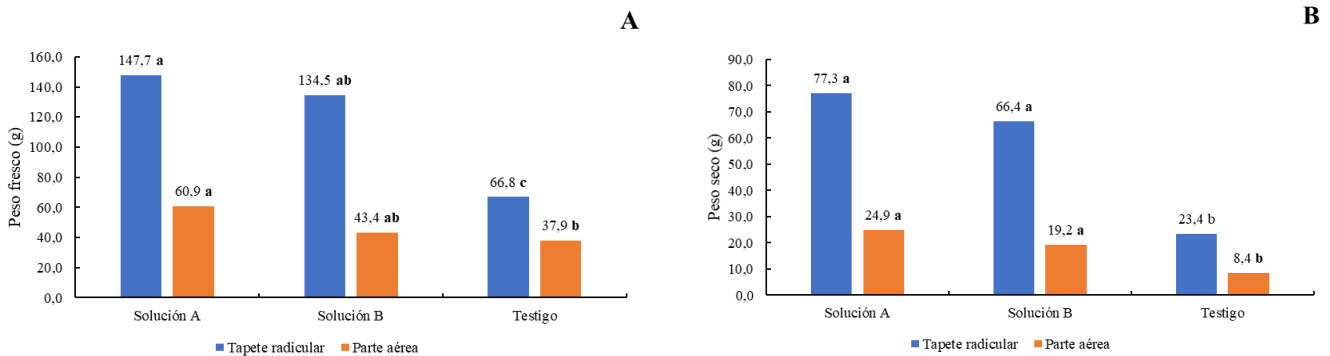


Figura 4. Peso fresco y seco del tapete radicular y de la parte aérea de plantas de cebada hidropónica sometidas a dos tipos de soluciones nutritivas (Valores promedios seguidos de letras diferentes mostraron diferencias significativas ($p < 0,05$)).

Rendimiento de materia fresca y seca de plantas de cebada hidropónica

El rendimiento medido en kg/m^2 de peso fresco mostró diferencias significativas por efecto de la solución nutritiva utilizada, demostrándose que el mayor rendimiento fue obtenido de plantas que recibieron la solución nutritiva A, las cuales alcanzaron un promedio de $13.9 kg/m^2$, seguido de aquellas plantas que recibieron la solución nutritiva B ($9.9 kg/m^2$) siendo 28.8 % menor que el rendimiento de las plantas con solución nutritiva A, mientras que una disminución significativamente mayor fue observada en el tratamiento testigo que alcanzó un 37.7 % menos rendimiento que las plantas de la solución nutritiva A (Tabla 2).

Tabla 2. Rendimiento de plantas de cebada hidropónica mantenidas con dos soluciones nutritivas.

Tratam	Peso	N° de tapetes/bandeja	Superficie (m^2 /bandeja)	Rend/bandeja (g)	Rendimiento	
	fresco (g)				(g/m^2)	kg/m^2
Solución nutritiva A	60.9a	40.0	0.175	2437.3a	13927.6a	13.9a
Solución nutritiva B	43.4ab	40.0	0.175	1736.0b	9920.0b	9.9b
Testigo	37.9b	40.0	0.175	1517.3c	8670.5c	8.7c

4. Discusión

Los resultados de este estudio muestran que la nutrición mineral formulada mejora de manera significativa el crecimiento vegetativo y la acumulación de biomasa en forraje verde hidropónico de cebada, evidenciado por mayores valores de altura de planta, peso fresco y seco, grosor del tapete radicular y rendimiento final con la solución nutritiva A. Estos efectos concuerdan con el papel crítico que desempeñan los nutrientes esenciales en los procesos fisiológicos de crecimiento en sistemas hidropónicos, en los cuales una disponibilidad óptima de macronutrientes y micronutrientes favorece la expansión celular, la fotosíntesis y la eficiencia metabólica (Ahamed et al., 2023; Grigas et al., 2025). Esto se alinea con hallazgos recientes que destacan la necesidad de soluciones nutritivas bien balanceadas para maximizar la biomasa de cultivos hidropónicos de cereales, particularmente cebada, debido a su rápido crecimiento y alto potencial productivo bajo condiciones controladas (Vastolo & Cutrignelli, 2025).

La mayor altura de planta y peso radicular observados en el tratamiento con la solución nutritiva A podrían estar asociados con su mayor concentración y equilibrio de nitrógeno, fósforo, calcio, magnesio y micronutrientes. No obstante, estos resultados deben interpretarse únicamente como una posible relación entre la composición de la solución nutritiva y el desempeño agronómico observado bajo condiciones hidropónicas. Por lo tanto, es necesario



realizar estudios para evaluar la concentración tisular de nutrientes. Estudios recientes indican que la composición mineral y su disponibilidad influyen directamente el vigor inicial y la acumulación de biomasa en cultivos hidropónicos, al mejorar la eficiencia de la fotosíntesis y la síntesis de compuestos estructurales y energéticos (Vastolo & Cuttrignelli, 2025).

El incremento en peso fresco y seco con la solución A, así como el mayor rendimiento por unidad de superficie (13.9 kg/m^2), es consistente con investigaciones que muestran variaciones significativas en producción de forraje hidropónico de cereales según la composición del medio nutritivo, especialmente en sistemas de cultivo sin suelo. Estudios previos han reportado valores de rendimiento cercanos a 32.8 kg/m^2 con densidades óptimas de 3.5 kg/m^2 de semilla (Sánchez del Castillo et al., 2013). Por otra parte, Birgi et al. (2018) reportaron valores entre 18 y 21 kg/m^2 en cultivos hidropónicos de cebada bajo distintos niveles de luz. Estos estudios confirman que cultivos como la cebada son altamente adaptables a sistemas hidropónicos y pueden alcanzar rendimientos consistentes cuando se provee de nutrientes esenciales en forma balanceada, lo cual se traduce en mayor producción total de biomasa y mejor calidad nutritiva comparada con sistemas sin fertilización adecuada (Aggarwal & Mathur, 2023; Hossain et al., 2025).

Es interesante notar que las variables relacionadas con el número de hojas, incidencia de contaminantes y días a la cosecha no mostraron diferencias significativas entre tratamientos, lo que sugiere que, en ciclos cortos de forraje hidropónico, estas características morfológicas tempranas están menos influenciadas por variaciones en la composición de la solución nutritiva que los parámetros de biomasa acumulada. Esto es coherente con la visión de que la germinación y la emergencia de hojas iniciales son procesos más dependientes de condiciones ambientales (temperatura, humedad y luz) y de la viabilidad de la semilla, mientras que la nutrición influye principalmente en el crecimiento posterior y la acumulación de materia seca (Rajendran et al., 2024; Yang et al., 2024).

De acuerdo con estudios recientes, además del incremento de la biomasa del forraje hidropónico, también se ha señalado que este tipo de forraje posee un perfil nutritivo con proteína cruda adecuado y alta digestibilidad, lo que favorece su inclusión en dietas de rumiantes y otras especies productivas. El forraje hidropónico de cebada presenta un contenido de proteína promedio significativo y puede mejorar parámetros productivos cuando se usa como parte de la dieta animal, incluidos mejor digestibilidad de nutrientes y eficiencia alimentaria en producción lechera y de crecimiento (Al-Baadani et al., 2022; Landi et al., 2024).

Desde la perspectiva agronómica, el uso del forraje hidropónico de cebada en sistemas alimentarios de rumiantes se ha traducido en mejoras en parámetros de producción animal sin comprometer el rendimiento (Masucci et al., 2024). Asimismo, el potencial de la cebada hidropónica para mejorar la digestibilidad de los nutrientes y la eficiencia alimentaria, como lo evidencian revisiones recientes, indica que los beneficios de una nutrición mineral adecuada trascienden la mera productividad vegetal, extendiéndose hacia efectos positivos sobre la nutrición animal y el desempeño productivo (Masucci et al., 2024; Pastorelli et al., 2024).

No obstante, desde la perspectiva del papel de la nutrición animal en la producción ganadera, es fundamental considerar que, aunque la concentración de nutrientes en el forraje hidropónico favorece la acumulación de biomasa y mejora su valor nutritivo, su inclusión dentro de programas de nutrición debe considerar la sostenibilidad económica y operativa del sistema. El uso de soluciones nutritivas concentradas implica incrementos en los costos, lo que puede afectar la rentabilidad del sistema, especialmente cuando el forraje hidropónico se utiliza como complemento y no como fuente exclusiva de nutrientes en la dieta. En este sentido, estudios recientes resaltan la importancia de la definición de las tasas de inclusión adecuadas y el uso de formulaciones nutricionales óptimas, de manera que se logre un equilibrio entre rendimiento del forraje, calidad nutricional (proteína, digestibilidad y aporte mineral) y eficiencia económica del sistema productivo (Elmulthum et al., 2023; Pastorelli et al., 2024). Este enfoque resulta particularmente relevante en sistemas ganaderos de pequeña y mediana escala, así como en regiones con limitaciones de recursos, donde la adopción de tecnologías hidropónicas debe garantizar no solo beneficios productivos, sino también viabilidad económica a largo plazo.

A pesar de los resultados obtenidos, el presente estudio presenta algunas limitaciones que deben ser consideradas. En primer lugar, el experimento se realizó durante un único ciclo de producción, por lo que los resultados podrían mostrar variaciones bajo condiciones ambientales distintas. Además, es importante considerar en estudios futuros, la necesidad de establecer la relación entre composición mineral de la solución y contenido nutricional del forraje mediante análisis químicos del tejido vegetal para cuantificar la absorción real de nutrientes.



5. Conclusiones

La solución nutritiva A, caracterizada por una mayor concentración y mejor balance de macronutrientes y micronutrientes, mejoró el crecimiento y la producción de biomasa del forraje verde hidropónico de cebada, reflejado en mayores valores de altura de planta, grosor del tapete radicular, peso fresco y seco de la parte aérea y del sistema radicular, así como en un mayor rendimiento final por unidad de superficie. Las variables asociadas a etapas tempranas del desarrollo y a características morfológicas básicas, como los días a la germinación, el porcentaje de germinación, el número de hojas, la calidad del tapete radicular, la incidencia de contaminantes y los días a la cosecha, no fueron afectadas por el tipo de solución nutritiva, lo que sugiere que estas variables dependen principalmente de la viabilidad de la semilla y de las condiciones ambientales de cultivo, más que de la composición mineral de la solución. Desde una perspectiva productiva, los resultados confirman que el uso de una nutrición mineral formulada y balanceada permite incrementar de manera eficiente el rendimiento del forraje verde hidropónico de cebada en ciclos cortos de producción, lo que representa una alternativa viable para mejorar la disponibilidad de forraje en sistemas ganaderos, especialmente en regiones con limitaciones de tierra cultivable y disponibilidad de agua controlada. Con base en los resultados, se recomienda realizar estudios similares que evalúen la calidad bromatológica del forraje verde hidropónico obtenido con diferentes soluciones nutritivas, que incluyan la determinación de proteína cruda, fibra detergente neutra, fibra detergente ácida, digestibilidad *in vitro* y contenido mineral. Asimismo, se sugiere analizar la respuesta productiva y sanitaria de animales alimentados con el forraje obtenido, con el fin de validar su impacto zootécnico bajo condiciones reales de producción.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Técnica de Ambato por el apoyo brindado para el desarrollo de esta investigación.

7. Declaración de conflicto de interés de los autores

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

8. Referencias

- Aggarwal, A., & Mathur, A. (2023). Recent Advances in Hydroponic Culture Media: Composition and Their Effect on Plant Growth. *Defence Life Science Journal*, 8(2), 162-169. <https://doi.org/10.14429/dlsj.8.18024>
- Aguirre, V. (2012). *Diseño ambiental para el manejo sustentable de una granja familiar en el cantón Cevallos de los provincia de Tungurahua-Ecuador* [Tesis de Grado]. Universidad Central del Ecuador. <http://www.dspace.uce.edu.ec:8080/bitstream/25000/269/1/T-UCE-0012-88.pdf>
- Ahamed, M. S., Sultan, M., Shamshiri, R. R., Rahman, M. M., Aleem, M., & Balasundram, S. K. (2023). Present status and challenges of fodder production in controlled environments: A review. *Smart Agricultural Technology*, 3, 100080. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100080>
- Al-Baadani, H. H., Alowaimer, A. N., Al-Badwi, M. A., Abdelrahman, M. M., Soufan, W. H., & Alhidary, I. A. (2022). Evaluation of the nutritive value and digestibility of sprouted barley as feed for growing lambs: in vivo and in vitro studies. *Animals*, 12(9), 1206. <https://doi.org/10.3390/ani12091206>
- Bakshi, M. P. S., Wadhwa, M., & Makkar, H. P. S. (2017). Hydroponic fodder production: a critical assessment. *Broadening Horizons*, 48, 1-10.
- Birgi, J. A., Gargaglione, V., & Utrilla, V. (2018). El forraje verde hidropónico como una alternativa productiva en Patagonia Sur: Productividad y calidad nutricional de dos variedades de cebada (*Hordeum vulgare*). *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 44(3), 316-323.



- Cáceres, P. J., Peñas, E., Martínez-Villaluenga, C., Amigo, L., & Frias, J. (2017). Enhancement of biologically active compounds in germinated brown rice and the effect of sun-drying. *Journal of Cereal Science*, 73, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.11.001>
- 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*, 15(1), 822. <https://doi.org/10.3390/su15010822>
- Ghorbel, R., & Koşum, N. (2022). Hydroponic Fodder Production: An Alternative Solution for Feed Scarcity. *6th International Students Science Congress Proceedings*, 1-9. <https://doi.org/10.52460/issc.2022.005>
- Girma, F., & Gebremariam, B. (2018). Review on Hydroponic Feed Value to Livestock Production. *Journal of Scientific and Innovative Research*, 7(4), 106-109. <https://doi.org/10.31254/jsir.2018.7405>
- Grigas, A., Steponavičius, D., Bručienė, I., Krikštolaitis, R., Krilavičius, T., Steponavičienė, A., & Savickas, D. (2025). Optimization of hydroponic wheat sprouts as an alternative livestock feed: yield and biochemical composition under different fertilization regimes. *Plants*, 14(14), 2166. <https://doi.org/10.3390/plants14142166>
- Hossain, M. M., Shibasaki, Y., Nakao, R., Nitano, K., & Goto, F. (2025). Optimization of ionic strength of nutrient solution for enhanced hydroponic watermelon yield and quality in greenhouse. *Scientific Reports*, 15, 25976. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-07250-9>
- Landi, V., Maggiolino, A., Hidalgo, J., Rossoni, A., Chebel, R. C., & De Palo, P. (2024). Effect of transgenerational environmental condition on genetics parameters of Italian Brown Swiss. *Journal of Dairy Science*, 107(3), 1549-1560. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-23741>
- 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>
- Pastorelli, G., Serra, V., Turin, L., & Attard, E. (2024). Hydroponic fodders for livestock production - A review. *Annals of Animal Science*, 24(3), 645-656. <https://doi.org/10.2478/aoas-2023-0075>
- Rajendran, S., Domalachenpa, T., Arora, H., Li, P., Sharma, A., & Rajauria, G. (2024). Hydroponics: Exploring innovative sustainable technologies and applications across crop production, with Emphasis on potato mini-tuber cultivation. *Heliyon*, 10, e26823. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26823>
- Reddy, B., & Harani, M. (2023). Hydroponics: A sustainable way of green fodder production. *Indian Farming*, 73(02), 2-5.
- Saidi, A. R. M. A., & Abo Omar, J. (2015). The Biological and Economical Feasibility of Feeding Barley Green Fodder to Lactating Awassi Ewes. *Open Journal of Animal Sciences*, 5(2), 99-105. <https://doi.org/10.4236/ojas.2015.52012>
- Sánchez del Castillo, F., Moreno Pérez, E. d. C., Contreras Magaña, E., & Morales Gómez, J. (2013). Producción de forraje hidropónico de trigo y cebada y su efecto en la ganancia de peso en borregos. *Revista Chapingo, Serie Horticultura*, 19(4), 35-43. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2012.02.020>
- Shit, N. (2019). Hydroponic Fodder Production: An Alternative Technology for Sustainable Livestock Production in India. *Exploratory Animal and Medical Research*, 9(2), 108-119.
- Vastolo, A., & Cutrignelli, M. I. (2025). Hydroponic forage in ruminant nutrition: A systematic review of nutritional value, performance outcomes, and sustainability. *Animals*, 15, 3544.
- Wang, Q., Zhao, H., Xu, L., & Wang, Y. (2019). Uptake and translocation of organophosphate flame retardants (OPFRs) by hydroponically grown wheat (*Triticum aestivum* L.) *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 174, 683-689. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.03.029>





- Yang, J., Sun, J., Wang, X., & Zhang, B. (2024). Light Intensity Affects Growth and Nutrient Value of Hydroponic Barley Fodder. *Agronomy*, 14(6), 1099. <https://doi.org/10.3390/agronomy14061099>
- Yisif, A., Mustafa, K. N., & Salih, G. M. (2023). Effect of Feeding Hydroponic Barley and Concentrate Diet on Milk Yield and Composition in Hamdani Ewes. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 42(1), 137-144. <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/89BH5>

9. Contribución de Autores

Autor	Contribución
Abraham Gavilanes	Toma de datos y escritura del manuscrito.
Olguer León	Análisis estadístico y revisión del manuscrito.
Carlos Vásquez	Supervisión del experimento, escritura y revisión de manuscrito.

