

EVALUACIÓN DE DIFERENTES DENSIDADES DE SIEMBRA DE ARVEJA (*Pisum sativum* L.) COMO FORRAJE VERDE HIDROPÓNICO EN KALLUTACA

Evaluation of different planting densities of peas (*Pisum sativum* L.) as hydroponic green fodder in Kallutaca

Eddy Diego Gutiérrez Gonzáles¹, Graciela Chávez Mamani²,
Verónica Elisa Condori Murga³, Ramiro Ochoa Torrez³

RESUMEN


La presente investigación se efectuó en la Estación Experimental Kallutaca, ubicada en la segunda sección del municipio de Laja provincia Los Andes del departamento de La Paz, el estudio tuvo como objetivo determinar la densidad de siembra óptima para la producción de FVH de arveja (*Pisum sativum* L.). Se evaluaron cuatro tratamientos en tres bloques con densidades de siembra (DS): 2.0, 2.5, 3.0 y 3.5 kg de semilla m⁻², aplicando un diseño de bloques completamente al azar. Los resultados mostraron que la densidad de siembra tiene un impacto significativo en las variables de utilidad. El rendimiento en materia verde incrementó significativamente con la densidad de siembra, alcanzando su punto máximo en 3.5 kg m⁻² con un rendimiento de 15.2 kg m⁻², que representó un aumento del 37.4% comparado con la densidad más baja. Asimismo, el rendimiento en materia seca también fue superior en 3.5 kg m⁻², obteniendo 3.15 kg m⁻². Así mismo, se realizó el análisis bromatológico del FVH de arveja en el laboratorio de nutrición animal UMSS, mostrando valores de proteína bruta de 25.79% y de humedad 78.59% que mejora la palatabilidad y digestibilidad del forraje. El análisis económico indicó que la densidad de 3.5 kg m⁻² es la más rentable, con una relación beneficio/costo de 1.29, en contraste con 0.98 en la densidad menor. Estos resultados sugieren que una densidad de siembra de 3.5 kg m⁻² maximiza el rendimiento y la rentabilidad del FVH de arveja, ofreciendo una solución viable y eficiente para la producción forrajera en sistemas hidropónicos, especialmente en áreas donde la disponibilidad de forraje es limitada se alcanza resultados sobresalientes.

Palabras clave: hidroponía, densidades, arveja y alimento.

ABSTRACT

This research was conducted at the Kallutaca Experimental Station, located in the second section of the municipality of Laja, Los Andes province, in the department of La Paz. The study aimed to determine the optimal planting density for the production of green peas (*Pisum sativum* L.). Four treatments were evaluated in three blocks with planting densities (PD) of 2.0, 2.5, 3.0, and 3.5 kg of seed m⁻², applying a completely randomized block design. The results showed that planting density has a significant impact on yield variables. Green matter yield increased significantly with planting density, peaking at 3.5 kg m⁻² with a yield of 15.2 kg m⁻², representing a 37.4% increase compared to the lowest density. Similarly, dry matter yield was also higher at 3.5 kg m⁻², reaching 3.15 kg m⁻². Así mismo, se realizó el análisis bromatológico del FVH de arveja en el laboratorio de nutrición animal UMSS, mostrando valores de proteína bruta de 25.79% y de humedad 78.59% que mejora la palatabilidad y digestibilidad del forraje. El análisis económico indicó que la densidad de 3.5 kg m⁻² es la más rentable, con una relación beneficio/costo de 1.29, en contraste con 0.98 en la densidad menor. Estos resultados sugieren que una densidad de siembra de 3.5 kg m⁻² maximiza el rendimiento y la rentabilidad del FVH de arveja, ofreciendo una solución viable y eficiente para la producción forrajera en sistemas hidropónicos, especialmente en áreas donde la disponibilidad de forraje es limitada se alcanza resultados sobresalientes.

Keywords: hydroponics, densities, peas, and food.

¹  Docente Investigador, Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9861-4200>.
eddyguti12@gmail.com

² Investigadora, Ciencias Agrícolas, Pecuarias y Recursos Naturales, Universidad Pública de El Alto, Bolivia.

³ Docente, Universidad Pública de El Alto, Bolivia.

INTRODUCCIÓN

El sistema de forraje verde hidropónico (FVH), puede proporcionar un suministro constante de alimento para el ganado durante épocas críticas de desabastecimiento de forrajes (sequía/invierno), demandando pequeñas superficies para su producción (Rodríguez et al., 2005).

Debido a las variaciones de precipitación registradas en los últimos años (SENAMHI, 2021), ocasiono que cada vez sea más difícil disponer de pastos y forrajes para los animales como: bovinos, ovinos, cuyes y otros, donde uno de los retos para el ganadero e investigador es mejorar el aprovechamiento adecuado de los recursos forrajeros. Para este fin se han desarrollado métodos físicos, químicos, biológicos y biotecnológicos, que en la actualidad se pueden combinar para hacer más eficiente la producción animal. A esto se suma la creciente escasez de recursos forrajeros, especialmente en regiones con condiciones climáticas adversas como es el altiplano boliviano, que ha llevado a la búsqueda de métodos alternativos de producción de forraje. Por otra parte, la arveja forrajera (*Pisum sativum* L.) es un excelente forraje verde hidropónico (FVH) porque es una leguminosa rica en proteína y vitaminas. Su producción hidropónica es una alternativa para épocas de sequía, ya que permite obtener un forraje limpio, inocuo y con alto valor nutricional en ciclos de 8 a 14 días, usando charolas sin suelo. El proceso requiere desinfección de la semilla, germinación en oscuridad inicial y luego exposición a la luz para la fotosíntesis.

El valor nutricional de la arveja forrajera como forraje verde hidropónico (FVH) según Bauza et al. (2013) presenta en: materia seca (MS) 86.58%, cenizas 2.94%, proteína cruda (PC) 24.14%, fibra en detergente neutro (FDN) 35.04%, energía bruta (EB) 4.42%, MCal kg⁻¹, extracto etéreo (EE) 1.0%, y aminoácidos indispensables (IAU) 0.07%.

A la razón, el presente trabajo tiene la finalidad de evaluar diferentes densidades de siembra óptima de arveja forrajera como forraje verde hidropónico en condiciones atemperadas similares a zonas del altiplano en la localidad de Kallutaca, donde se estimó la producción de biomasa y la relación beneficio/costo parcial del producto. Asimismo, la época de estiaje muestra la escasez de forraje verde para la alimentación del ganado. Entonces, la alimentación y nutrición de los animales se verá realmente afectada.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación de la zona de estudio

El presente trabajo de investigación se efectuó en la Estación Experimental Kallutaca, municipio de Laja ubicada en la segunda sección de la provincia Los Andes del departamento de La Paz, ubicada geográficamente entre los paralelos 16° 46' 15.11" de latitud Sur y 68° 29' 49.81", longitud Oeste. Se encuentra a una Altitud de 3.902 m s.n.m. (Google Earth, 2024).

Metodología

Infraestructuras y bandejas

Para la presente investigación se instaló un invernadero de media agua con techo de calaminas plásticas, de 4 m de ancho, 4 m de largo y 2.5 m de altura. Las bandejas de madera fueron forradas con plástico de polietileno de color negro, como inhibidor de gérmenes nocivos.

En el estudio, las semillas de arveja variedad Viper (grano liso de color verde, semi-afila), se lavaron a temperatura ambiente 10 °C y remojadas en una solución de lejía (hipoclorito sódico) al 1% por un tiempo de 20 minutos para su desinfección, y posteriormente se lavaron con agua fría de manera reiterada. Inmediatamente, las semillas por tratamiento se remojaron por un período de 24 horas, realizando tres cambios de agua.

Posterior a esta, la siembra se realizó en bandejas de 45 x 50 cm y una altura de 5 cm, donde las semillas se sembraron de manera uniforme, las bandejas fueron cubiertas con plástico negro para evitar el ingreso de la luz y facilitar la germinación durante los primeros siete días manteniendo la humedad y favoreciendo la germinación. En ese lapso, el coleoptilo de las semillas alcanzó una altura de 7 cm, se aplicó dos a tres riegos por día, la cantidad fue de 200 ml de agua potable. Entre los días 9 y 15, las bandejas recibieron 300 ml de agua por bandeja en horarios 08:00, 12:00 y 17:00.

Como recomiendan Abarca et al. (2016), para la arveja hidropónica, la dosis óptima de semillas depende del método, pero una guía común es sembrar entre 2.5 y 3 kg por metro cuadrado en bandejas de 35.5 cm x 45 cm, distribuyendo 300 a 350 gramos de semilla por bandeja. La siembra debe ser uniforme, sin que la capa de semillas sobrepase los 1.5 cm de altura en la bandeja para lograr un crecimiento homogéneo.

La cosecha se realizó a los 15 días posteriores a la germinación a una altura promedio de 25.5 cm el mismo que se midió y se registró el peso por tratamiento para evaluar las densidades de la investigación. Así mismo, se procedió al retiro de una muestra para su análisis bromatológico en el laboratorio de Nutrición Animal, departamento de Zootecnia y Producción Animal de la Facultad de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y Forestales “Martín Cárdenas” de la Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba.

Variables evaluadas

Se determinó la bromatología y producción de la materia seca (MS), materia verde (MV), de acuerdo a las recomendaciones del AOAC (1995). La MS y la MV se analizaron en el laboratorio de química de la Universidad Pública de El Alto, y los contenidos bromatológicos y/o nutricionales en el Laboratorio de Nutrición Animal de la Universidad Mayor de San Simón de Cochabamba.

Se registró, la altura de planta (cm), con ayuda de una regla milimetrada, de la base planta hasta el ápice (muestra de 10 plántulas), longitud de raíz, medida en cm desde la base planta hasta la punta de la raíz, rendimiento en materia verde (MV), peso total de la biomasa fresca, incluyendo raíces y parte aérea, así como materia seca (MS), peso de la biomasa después de la deshidratación.

Análisis estadístico

Para el análisis estadístico se aplicó el Diseño Bloques Completamente al Azar empleando el modelo lineal aditivo descrito por Ochoa (2016) con cuatro densidades de siembra en tres bloques, de acuerdo al siguiente modelo estadístico $Y_{ij} = \mu + \beta_j + \alpha_i + \epsilon_{ij}$, donde: Y_{ij} = variable dependiente estudiada, μ = media general, β_j = efecto del j-esimo bloque, α_i = efecto del iesima densidad de siembra y ϵ_{ij} = error experimental.

Por tanto, el estudio registro cuatro tratamientos por densidad en tres bloques, los cuales se detallan: $T_1 = 2.0 \text{ kg m}^{-2}$, $T_2 = 2.5 \text{ kg m}^{-2}$, $T_3 = 3.0 \text{ kg m}^{-2}$, $T_4 = 3.5 \text{ kg m}^{-2}$

Los resultados que alcanzaron diferencias significativas y/o altamente significativas Se aplicó la prueba de medias de Duncan al 5% de probabilidad.

Análisis económico

Para el análisis económico se utilizó el cálculo del beneficio / costo para cada uno de los tratamientos (Cervone, 2010).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis bromatológico

El forraje verde hidropónico de arveja, presentó 25.79% de proteína bruta, materia seca total del 93.59% y 23.30% de fibra cruda. Valores importantes considerando el aporte nutricional a los animales que serán alimentados como bovinos, conejos, cuyes y otras especies con una humedad 78.59% de alta palatabilidad.

Altura de planta de arveja forrajera

La Tabla 1, revela que los bloques tienen un efecto significativo sobre la variable de respuesta altura de planta ($p = 0.0125$). Esto propone que factores como la pendiente, orientación, iluminación entre bloques influyen en la altura de planta. La densidad de siembra no mostró diferencias significativas ($p = 0.0951$), e indica que la variación en densidad no afecta de manera significativa. El coeficiente de variación del 3.65% establece que el experimento tiene un nivel bajo de variabilidad relativa, lo cual refleja un buen control experimental y una baja dispersión de los datos respecto a la media.

Tabla 1. Análisis de varianza para altura de planta (cm).

F.V.	GL	SC	CM	F	p-valor	Significancia
Bloques	2	21.50	10.75	9.92	0.0125	*
Densidad de siembra	3	11.00	3.67	3.38	0.0951	ns
Error	6	6.50	1.08			
Total	11	39.00				

Coeficiente de variación = 3.65%.

F.V. = fuentes de variación, GL = grados de libertad, SC = suma de cuadrados, CM = cuadrados medios, F = valor de tabla y Significancia, ns = no significativo; * = significativo.

El promedio de altura de planta para bloques, Duncan ($\alpha = 0.05\%$) detalla una media en el bloque 3 de 30.00 cm y el bloque 1 con 28.75 cm siendo estrechamente similares, mientras que el Bloque 2 establece 26.75 cm de largo diferente en relación a los dos bloques evaluados como se inscribe en la Tabla 2.

Tabla 2. Promedio de altura de planta (cm) por bloques.

Bloques	Media (cm)	Duncan ($\alpha = 5\%$)
3	30.00	A
1	28.75	A
2	26.75	B

En el estudio realizado por Contreras et al. (2015) registraron en cultivos asociados de 12.42 cm de altura promedio de la arveja (proporción 100/0 en ambas asociaciones) fueron bastante inferiores a los 25.0 cm registrados por Castro et al. (1998). Se asume que estas variaciones encontradas se deben al producto nitrogenado y a los 20-25 días de cosecha empleados en ese estudio.

Por tanto, los valores registrados por estos autores son menores al presente trabajo considerando, que el cultivo fue puro (arveja), las variaciones del ambiente y los tiempos de cosecha son los que hacen diferencias que puede ver influenciado por las condiciones específicas de su sistema hidropónico y la disposición de las bandejas.

Esta aseveración es respaldada por Abarca et al. (2016), quienes explican que las diferencias de altura entre plantas en distintos niveles de bandejas en sistemas de estantería hidropónica son atribuibles a factores como la intensidad de luz, temperatura, circulación de aire, humedad y la distribución de nutrientes y agua. Las bandejas superiores suelen recibir una mayor intensidad lumínica y mayor exposición al calor, promoviendo un crecimiento más rápido, por tanto, una mayor altura en las plantas.

Longitud de raíz de arveja forrajera

El ANOVA (Tabla 3) para longitud de raíz de forraje verde hidropónico (FVH), muestra que tanto los bloques ($p = 0.3483$) como la densidad de siembra ($p = 0.5243$) no tienen un efecto significativo sobre la variable de respuesta. Esto exterioriza que las diferencias observadas en la longitud de la raíz no se deben a las variaciones entre los bloques ni a los niveles de densidad de siembra evaluados. El coeficiente de variación alcanzado de 23.67% apunta una mayor dispersión en los datos, e indica una considerable variabilidad en la longitud de la raíz que no fue explicada por los factores del experimento.

Tabla 3. Análisis de varianza para longitud de raíz (cm).

F.V.	GL	SC	CM	F	p-valor	Significancia
Bloques	2	28.01	14.01	1.26	0.3483	ns
Densidad de siembra	3	27.58	9.19	0.83	0.5243	ns
Error	6	66.50	11.08			
Total	11	122.09				

Coeficiente de variación = 23.67%.

F.V. = fuentes de variación, GL = grados de libertad, SC = suma de cuadrados, CM = cuadrados medios, F = valor de tabla y Significancia, ns = no significativo.

Al punto, la longitud de la raíz del forraje verde hidropónico (FVH) de arveja es variable, pero suele ser de aproximadamente 1.6 a 1.9 cm en los primeros dos días, extendiéndose a medida que el cultivo avanza. Considerando que la longitud de la raíz está influenciada por la densidad de siembra, el método de producción y el tiempo de crecimiento, las raíces se entrelazan para formar una densa "alfombra" de raíces junto con el resto del forraje, lo cual acrecienta el valor nutritivo para los animales.

Al respecto Ortega (2004), sugiere que el desarrollo radicular inicial depende de la temperatura y la frecuencia de riego. Aspecto importante en relación al presente trabajo considerando un riego uniforme a lo largo del día ha permitido una mayor absorción de agua, promoviendo un crecimiento radicular constante. Este concepto es relevante en sistemas hidropónicos, donde la disponibilidad continua de agua favorece el desarrollo homogéneo de las raíces desde la germinación hasta la cosecha.

En este sentido Orellana (2015) indica que, en sistemas hidropónicos bien gestionados, la uniformidad en la longitud de la raíz (cm) se debe a la adecuada disponibilidad de recursos como nutrientes, agua y oxígeno, que minimizan la competencia entre plantas. Incluso con variaciones en la densidad de siembra, la ausencia de suelo limita las restricciones físicas, permitiendo un crecimiento uniforme de las raíces. En el presente estudio, las raíces mostraron una longitud uniforme para todas las densidades, probablemente debido a la distribución eficiente de los recursos en el sistema hidropónico, un ambiente controlado donde las raíces no experimentan restricciones espaciales o competencia significativa por nutrientes.

Rendimiento en materia verde

El ANOVA (Tabla 4) para el rendimiento en materia verde del forraje hidropónico (FVH) de arveja señala que la densidad de siembra tiene un efecto significativo sobre las variables de respuesta, con $p = 0.0199$, que es inferior al nivel de significancia del 5%. Esto revela que existen diferencias significativas en el rendimiento de materia verde entre los diferentes niveles de densidad de siembra evaluados. Por otro lado, los bloques no exhibieron un efecto significativo ($p = 0.057$), aunque están cerca del umbral de significancia.

Tabla 4. ANOVA para rendimiento de materia verde arveja forrajera.

F.V.	GL	SC	CM	F	p-valor	Significancia
Bloques	2	1.16	0.58	4.77	0.0570	ns
Densidad de siembra	3	2.66	0.89	7.31	0.0199	**
Error	6	0.73	0.12			
Total	11	4.55				

Coefficiente de variación = 12.49%.
F.V. = fuentes de variación, GL = grados de libertad, SC = suma de cuadrados, CM = cuadrados medios, F = valor de tabla y Significancia, ns = no significativo; ** = altamente significativo.

El coeficiente de variación alcanzo 12.49% e indica una variabilidad moderada de los datos, este sugiere que el experimento tuvo un buen control sobre las condiciones proporcionadas al cultivo. Dado que se identificó diferencias significativas en densidad de siembra, se realizó la prueba de comparación de medias Duncan al 5%, a fin de identificar que niveles de densidad difieren significativamente entre sí.

Tabla 5. Promedio de rendimientos de materia verde por densidades.

Densidad	Media (kg)	Duncan ($\alpha = 5\%$)
Densidad 4 (3.5 kg m ⁻²)	3.42	A
Densidad 3 (3.0 kg m ⁻²)	3	A B
Densidad 2 (2.5 kg m ⁻²)	2.61	B C
Densidad 1 (2.0 kg m ⁻²)	2.14	C

La Tabla 5, registra que la densidad 4 (3.5 kg m⁻²) con un rendimiento medio de 3.42 kg, clasifica en el grupo A, esta es la densidad más efectiva en términos de producción de materia verde y es significativamente diferente a las demás densidades, por otro lado, la densidad 3 (3.0 kg m⁻²) con un promedio de 3 kg, pertenece a los grupos A B y apunta que no es significativamente diferente de la Densidad 4, pero sí discrepa de las densidades más bajas, la densidad 2

(2.5 kg m⁻²) con un rendimiento de 2.61 kg, se ubica en los grupos BC e indica que el rendimiento es significativamente menor que las densidades 4 y 3, pero no es significativamente diferente a la densidad 1 de (2.0 kg m⁻²) con 2.14 kg, que se halla en el grupo C, siendo la densidad con el rendimiento más bajo y significativamente diferente de las demás densidades. Esto significa que el bloquear el ingreso de la temperatura y luz al módulo, influyeron en la homogeneidad de la variable.

Por otro lado, la densidad de 3.5 kg m⁻² (densidad 4) maximiza la producción de materia verde, mientras que la densidad de 2.0 kg m⁻² (densidad 1) produce significativamente menos. Estas diferencias en el rendimiento subrayan la importancia de seleccionar adecuadamente la densidad de siembra para optimizar la producción de materia verde en el FVH de arveja. Estudios similares hecho por Contreras et al. (2015), en relación al, contenido de MO asociado trigo (proporción 0/100 arveja-trigo) fue menor a la vez, Casa (2008) anota el 95.98% de MO, diferencias que pueden ser atribuida a las variaciones de fase vegetativa del cultivo hidropónico (15 días) y a las condiciones atmosféricas donde se realizaron los estudios.

Asimismo, el rendimiento de materia verde de forraje hidropónico (FVH) de arveja obtenido en la presente investigación, de 15.2 kg m⁻², es notablemente superior al reportado por Contreras et al. (2015), quien encontró un rendimiento de 8.6 kg m⁻². Esta diferenciación con otros autores podría atribuirse a diversas variables utilizadas, como el manejo de la densidad de siembra, las condiciones hidropónicas específicas e incluso las variaciones en los genotipos de arveja empleados. El rendimiento superior obtenido en el estudio sugiere que el sistema hidropónico y la densidad de siembra aplicada optimizan el aprovechamiento de recursos, promoviendo un desarrollo vegetal vigoroso y aumentando la producción de forraje por unidad de área.

Entonces, la densidad de siembra influye significativamente en el rendimiento en materia verde en sistemas de producción de forraje hidropónico. Estudios previos, como el de Orellana (2015), sostienen que densidades más altas incrementan la competencia entre plantas por luz, nutrientes y espacio. Este aumento en competencia puede restringir el crecimiento individual de cada planta y reducir la producción por planta; sin embargo, el rendimiento total por área puede incrementarse hasta alcanzar un punto óptimo, entonces el rendimiento tiende a disminuir

debido al estrés por competencia, afectando tanto la cantidad como la calidad del forraje.

En definitiva, el rendimiento de materia verde en arveja forrajera hidropónica varía según la densidad, pero se estima un rendimiento promedio de las diferentes densidades de 12 kg de forraje por cada kg de semilla, con un contenido de materia seca de alrededor del 35%. Este rendimiento puede ser influenciado por factores como la densidad y las épocas de cosecha, como demuestran otros estudios.

Rendimiento en materia seca

El análisis de varianza (Tabla 6) para el rendimiento en materia seca del forraje verde hidropónico (FVH) de arveja establece que la densidad de siembra tiene un efecto altamente significativo sobre el rendimiento, con un $p = 0.0045$. Sugiere que las variaciones en la densidad de siembra generan diferencias estadísticamente significativas en el rendimiento de materia seca. Por otro lado, los bloques no presentan un efecto significativo ($p = 0.25$), las diferencias entre los bloques no afectan el rendimiento de manera significativa.

Tabla 6. Análisis de varianza para rendimiento en materia seca.

F.V.	GL	SC	CM	F	p-valor	Significancia
Bloques	2	0.01	0.01	1.76	0.25	ns
Densidad de siembra	3	0.13	0.04	13.41	0.0045	**
Error	6	0.02	3.3E-03			
Total	11	0.16				

Coefficiente de variación = 9.62%.

F.V. = fuentes de variación, GL = grados de libertad, SC = suma de cuadrados, CM = cuadrados medios, F = valor de tabla y Significancia, ns = no significativo; ** = altamente significativo.

El coeficiente de variación del 9.62% refleja una baja variabilidad en los datos. La variabilidad no explicada es mínima, esto refuerza la relevancia de la densidad de siembra como factor determinante del rendimiento en materia seca.

Otros estudios como el de Contreras et al. (2015), registran una producción de MS de la asociación arveja-cebada en la proporción 0/100 (242.52 g 1 480cm⁻²) y la producción de MS (195.07 g 1 480cm⁻²) proporción 0/100 de arveja-trigo que fue inferior al presente estudio, en relación con los 361.7 g 1 480cm⁻² reportado por Maldonado et al. (2013) considerando el valor estable, este es mínimo al evaluado en el presente trabajo de experimentación.

Dado que existen diferencias significativas en la densidad de siembra, se realizó la prueba de medias Duncan al 5% e identificar el grado de diferencias de rendimientos en materia seca.

Tabla 7. Promedio de rendimientos de materia seca por densidades.

Densidad	Media (kg)	Duncan ($\alpha = 5\%$)
Densidad 4 (3.5 kg m ⁻²)	0.71	A
Densidad 3 (3.0 kg m ⁻²)	0.66	A B
Densidad 2 (2.5 kg m ⁻²)	0.57	B C
Densidad 1 (2.0 kg m ⁻²)	0.43	C

En la Tabla 7, se asigna medias de materia seca (MS) entre las diferentes densidades de siembra, en el cual la densidad 4 (3.5 kg m⁻²) con un rendimiento promedio de 0.71 kg, pertenece al grupo A, e indica la densidad con el rendimiento más alto y significativamente diferente a las demás, seguido por la densidad 3 (3.0 kg m⁻²) con un promedio de 0.66 kg, está en los grupos A B, que apunta no significancia a densidad 4, por otra parte, la densidad 1, (2.5 kg m⁻²) con 0.57 kg, se ubica en el grupo B, presentando un rendimiento intermedio y significativamente menor que las densidades más altas (4 y 3) finalmente la densidad 1 (2.0 kg m⁻²) con 0.43 kg, está en el grupo C, obteniendo un rendimiento bajo y significativamente diferente a las demás densidades.

Entonces se anota que el rendimiento en materia seca (MS) del forraje verde hidropónico de arveja fue notablemente influenciado por la densidad de siembra y el manejo de bandejas, observándose un patrón similar al conseguido en otros estudios sobre FVH. Por su parte Nina y Fernández (2017) observaron que, a densidades de siembra más bajas, conducen a un menor rendimiento total, debido a que el espacio disponible no es aprovechado de manera eficiente. Sin embargo, señalan que, aunque las plantas individuales pueden tener menos competencia y crecer mejor a densidades más bajas, el rendimiento por unidad de superficie disminuye. Asimismo, la producción de MS de la asociación arveja-cebada en la proporción 0/100 (242.52 g 1 480cm⁻²) de Contreras et al. (2015) es menor a los reportados por Maldonado et al. (2013), por tanto no se registraron diferencias con los reportes de autores en relación a las densidades y rendimientos de MS en el estudio.

En este sentido, el rendimiento de materia seca (MS) en arveja forrajera hidropónica es variable, pero en promedio se estima que se obtiene entre 15 y 35% de cultivo específico de arveja hidropónica encontró un materia seca. El estudio de Contreras et al. (2015), en

valor de 15.98% de MS, cercano a otro estudio de asocio que reportó 17.45% de MS para el trigo (0-100 de arveja-trigo) e inferior al 18.5% reportado por Casa (2008); las diferencias se deben al sistema y ambiente donde fue cultivado así como al espacio de crecimiento (15 días) de la arveja hidropónica. Un rendimiento de forraje de alta calidad, es importante considerar que se pueden obtener de 6 a 10 kg de forraje por cada kilogramo de semilla. Finalmente, el valor de 15 y 35% de MS encontrado en el presente estudio para el cultivo hidropónico de arveja es prácticamente coincidente con el valor de 16.27% obtenido por Castro et al. (1998).

Análisis beneficio costo

La Tabla 8, detalla el beneficio/costo (B/C) en función a densidad de siembra, donde la rentabilidad de la producción de forraje verde hidropónico (FVH) de arveja mejora con la acentuación de la densidad, logrando incrementos altos que ofrecen el B/C. La densidad de siembra más alta, como el T₄ (3.5 kg m⁻²), el valor B/C fue de 1.29 representa un retorno positivo; de Bs. 0.29, alcanzando mayor rentabilidad.

Tabla 8. Relación Beneficio/Costo producción de FVH en 12 ciclos.

Densidad	T1 (2.0 kg m ⁻²)	T2 (2.5 kg m ⁻²)	T3 (3.0 kg m ⁻²)	T4 (3.5 kg m ⁻²)
Costos de producción (Bs.)	158.15	158.37	158.60	158.83
Rendimiento 1 ciclo (kg)	2.14	2.61	3	3.42
Rendimiento 12 ciclos (kg)	25.68	31.32	36.00	41.04
Precio (Bs.)	5	5	5	5
Ingresos (Bs.)	128.4	156.60	180.00	205.2
B/C	0.81	0.99	1.13	1.29

Para optimizar los costos de producción en FVH, Morales (2020) señala que el uso de materiales reciclados, como bandejas y módulos, puede abaratar significativamente los costos. El mismo autor, alude que, aunque la inversión inicial en infraestructura es la más costosa, los materiales reutilizables permiten reducir los costos en ciclos sucesivos, lo que hace viable económicamente la producción a largo plazo.

CONCLUSIONES

La calidad nutritiva arrojó valores de proteína bruta del 25.79%, confirmando su contenido nutricional. Esta calidad proteica convierte a este un recurso excelente

para suplementar dietas alimenticias, para diferentes especies ganaderas y favorece la palatabilidad y digestibilidad en la alimentación animal.

La densidad de siembra de 3.5 kg m⁻² (T₄) es adecuada para la producción de Forraje Verde Hidropónico de arveja. Con rendimientos altos en términos de producción de biomasa considerando que el cultivo no dispone de fuentes de nutrientes, que favorezcan un crecimiento uniforme de plantas y el máximo aprovechamiento de los recursos.

La longitud de la raíz en promedio alcanzó 14.07 cm en las diferentes densidades utilizadas y la altura de planta media del bloque 3 de 30.00 cm y el bloque 1 con 28.75 cm son estrechamente similares, mostrando respuestas positivas en el desarrollo del cultivo con periodos de 15 días entre corte. La biomasa de FVH de arveja mostró una acentuación significativa, alcanzando el máximo rendimiento en T₄ (3.5 kg m⁻²), con 3.42 kg de materia verde por ciclo (15.2 kg m⁻²).

El rendimiento en materia seca fue para T₄ (3.5 kg m⁻²), con 3.15 kg m⁻² en comparación a valores obtenidos por las densidades menores. El forraje verde hidropónico cosechado en la investigación será utilizado para la alimentación de los animales, considerando los requerimientos del animal y su alimentación combinada con alimento balanceado (volumen-concentrado).

BIBLIOGRAFÍA

- AOAC. 1995. The official methods of analysis of AOAC International (en línea). 15th ed. Washington: AOAC. Disponible en http://lib3.dss.go.th/fulltext/scan_ebook/aoac_1995_v78_n3.pdf
- Abarca, P; Aguirre, C; Silva, L; Mora, D; Carrasco, J. 2016. Producción de forraje verde hidropónico para la pequeña agricultura (en línea). Boletín INIA 321:159-184. Disponible en <http://www.scielo.org.bo/scieloOrg/php/reference.php?pid=S230838592017000200009&caller=www.scielo.org.bo&lang=es>
- Bauza, R; Capra, G; Bratashi, C. 2013. Evaluación de la arveja forrajera como alimento para cerdos de engorde (en línea). Agro ciencia Uruguay 17(2):91-98. Disponible en https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_porcina/00-produccion_porcina_general/218-arveja_forrajera.pdf
- Casa, CR. 2008. Efecto de la utilización de forraje verde hidropónico de avena, maíz y trigo en la alimentación de cuyes (en línea). Tesis de Licenciatura. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Disponible en

- <https://dspace.esPOCH.edu.ec:8080/server/api/core/bitstreams/24a8c8c0-361f-4316-a2db-1003a771ba58/content>
- Castro, J; Chirinos, D; Pineda, M. 1998. Uso de forraje hidropónico de avena, cebada y arveja en cuyes. En: XXI Reunión de la Asociación Peruana de Producción Animal. Universidad Nacional del Altiplano.
- Cervone, H. 2010. Using cost benefit analysis to justify digital library projects (en línea). OCLC Systems & Services: International digital library perspectives 26(2):76-79. Disponible en <https://www.emerald.com/dlp/article-abstract/26/2/76/311095/Using-cost-benefit-analysis-to-justify-digital?redirectedFrom=fulltext>
- Contreras, JL; Tunque, M; Cordero, A. 2015. Rendimiento hidropónico de la arveja con cebada y trigo en la producción de germinados (en línea). Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú 26(1):9-19. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/3718/371838879002.pdf>
- Google Earth. 2024. Programa Informático que muestra un globo virtual que permite visualizar múltiple cartografía, con base en la fotografía satelital.
- Maldonado, R; Álvarez, MA; Cristóbal, D; Ríos, E. 2013. Nutrición mineral de forraje verde hidropónico (en línea). Rev Chapingo Ser Hortic 19(2):211-223. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/609/60927902007.pdf>
- Morales, DB; Jiménez, LS; Burneo, JI; Capa, ED. 2020. Producción de forrajes de avena y trigo bajo sistemas hidropónico y convencional (en línea). Ciencia Tecnológica Agropecuaria, Mosquera 21(3). Disponible en http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0122-87062020000300013&script=sci_arttext&tlng=es
- Nina, EL; Fernández C. 2017. Uso de diferentes métodos de producción bajo tres densidades de siembra en el cultivo verde hidropónico de cebada (*Hordeum vulgare* L.) en carpa solar (en línea). Disponible en http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2409-16182017000200007&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Ochoa, R. 2016. Diseños experimentales. 2da ed. La Paz, Bolivia, Ochoa ediciones. 385 p.
- Orellana, EB. 2015. Evaluación de tres niveles de fertilización en forraje verde hidropónico de cebada (*Hordeum vulgare*) (en línea). Tesis Licenciatura. Ecuador. UPS. Disponible en <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/8154/1/UPS-CT004907.pdf>
- Ortega, R. 2004. Cultivos hidropónicos, principios y métodos de cultivo (en línea). Ed. la Imprenta Universitaria. Universidad Autónoma de Chanpingo, México. Disponible en https://books.google.com.bo/books/about/Un_sistema_de_producci%C3%B3n_de_plantas_hid.html?id=S6zeoAEACAAJ&redir_esc=y
- Rodríguez, C; Rodríguez, H; Ruiz, O; Flores, A; Grado, J; Arzola, C. 2005. Use of green fodder produced in hydroponics systems as supplement for Salers lactating cows during the dry season (en línea). Proc Am Soc Anim Sci Western Section 56:271-274. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/253685663_Use_of_green_fodder_produced_in_hydroponics_systems_as_supplement_for_salers_lactating_cows_during_the_dry_season
- SENAMHI. 2021. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (en línea). Pronóstico hidrológico. Boletín. Disponible en <https://senamhi.gob.bo/index.php/inicio#:~:text=%2D%20En%20el%20marco%20del%20fortalecimiento,Esta%20importante%20%E2%80%A6>

Artículo recibido en: 15 de julio del 2025

Aceptado en: 13 de diciembre del 2025