

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE AGRONOMIA Y ZOOTECNIA

ESCUELA PROFESIONAL DE ZOOTECNIA



TESIS

**EFFECTO DE LA DENSIDAD DE SIEMBRA Y DEL PERIODO DE
CRECIMIENTO SOBRE LA PRODUCCIÓN DE FORRAJE VERDE
HIDROPÓNICO DE CEBADA (*Hordeum vulgare*) EN CONDICIONES
DE FITOTOLDO CON RIEGO TECNIFICADO**

PRESENTADO POR:

Br. NORMA ELENA FERIA BALTAZAR

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO ZOOTECNISTA**

ASESOR:

Dr. ABRAHAM FILIBERTO MACHACA MAMANI

CUSCO- PERÚ

2026



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro. CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el **Asesor** Abraham Filiberto Machaca Mamani,
..... quien aplica el software de detección de similitud al
trabajo de investigación/tesis titulada: "EFECTO DE LA DENSIDAD DE SIEMBRA
Y DEL PERIODO DE CRECIMIENTO SOBRE LA PRODUCCIÓN DE
FORRAJE VERDE HIDROPÓNICO DE CEBADA (*Hordeum vulgare*)
EN CONDICIONES DE FITOTOLDO CON RIEGO TECNIFICADO"

Presentado por: NORMA ELENA FERIA BALTICAR DNI N° 71820394;

presentado por: DNI N°:

Para optar el título Profesional/Grado Académico de INGENIERO 200 TECNISTA

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 2 veces, mediante el
Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de
Similitud en la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 8 %.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	☒
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	☐
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	☐

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 01 de Junio de 2026

Firma

Post firma Abraham F. Machaca Mamani

Nro. de DNI 23838317

ORCID del Asesor 0000-0001-5593-753X

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: **oid:** 27259;581551068

NORMA ELENA FERIA BALTAZAR

EFFECTO DE LA DENSIDAD DE SIEMBRA Y DEL PERIODO DE CRECIMIENTO SOBRE LA PRODUCCIÓN DE FORRAJE VERDE ...

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:581551068

Fecha de entrega

21 abr 2026, 7:57 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

21 abr 2026, 8:25 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

TESIS NORMA.pdf

Tamaño del archivo

1.1 MB

85 páginas

16.094 palabras

91.382 caracteres

8% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Trabajos entregados
- ▶ Fuentes de Internet

Fuentes principales

- 0%  Fuentes de Internet
- 8%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

DEDICATORIA

Agradezco profundamente a mis padres, José Antonio y Lidia Mariela, por su amor incondicional y su constante ejemplo de trabajo, paciencia y fe en Dios, así como por los valores y enseñanzas que han guiado mi vida y me han permitido mantenerme fiel a mis sueños, sin olvidar mis raíces. Asimismo, expreso mi gratitud a mis hermanos: Eyson, Zulema, Abraham, Moisés y Sara; cuyas virtudes de serenidad, dulzura, amor y creatividad enriquecen mi camino.

NORMA ELENA FERIA BALTAZAR

AGRADECIMIENTO

Deseo manifestar mi más profundo agradecimiento a todos los docentes de la Escuela Profesional de Zootecnia, quienes, con sus conocimientos y compromiso con mi formación profesional, me brindaron lecciones valiosas y vivencias enriquecedoras; cada uno ha jugado un papel crucial en mi desarrollo, no solo en el campo educativo, sino también en mi crecimiento personal y laboral.

Al Ing. Zoot. Dr. Abraham Filiberto Machaca Mamani, a quien expreso mi más sincero reconocimiento y gratitud por su valiosa guía en el desarrollo de este trabajo. Su ética profesional y su generosa disposición para compartir conocimientos han dejado una huella significativa en mi formación académica y personal.

Al Ing. Zoot. David L. Castro Cáceres, expreso mi más sincero y profundo agradecimiento por el apoyo constante; asimismo valoro de manera especial el vínculo de respeto y amistad que se consolidó a lo largo de este proceso, el cual enriqueció profundamente esta etapa de mi formación.

A todo el personal administrativo del Centro Agronómico K'ayra, quienes siempre están dispuestos a orientar y agilizar todos los trámites que realizamos. La familia K'ayreña es muy especial y se distingue de otras escuelas profesionales por la calidez humana.

Finalmente, deseo expresar mi agradecimiento a mis amigos del código 2011-1 de la Escuela Profesional de Zootecnia, quienes fueron mis compañeros de curso y con quienes tuve el placer de compartir valiosos momentos a lo largo de nuestra formación profesional.

ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
II.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
2.1.1	Pregunta general.....	4
2.1.2	Preguntas específicas	4
III.	OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN.....	6
3.1	Objetivo general	6
3.2	Objetivos específicos.....	6
3.3	Justificación.....	7
IV.	HIPÓTESIS	9
4.1	Hipótesis general.....	9
4.2	Hipótesis específicas	9
V.	MARCO TEÓRICO.....	11
5.1	Antecedentes de la investigación.....	11
5.2	Bases teóricas	13
5.2.1	Producción de forraje en zonas altoandinas	13
5.2.2	Forraje verde hidropónico (FVH)	14
5.2.3	Cebada como especie forrajera en FVH.....	18
5.2.4	Densidad de siembra y sus efectos en FVH	19
5.2.5	Periodo de crecimiento y tiempo de cosecha	20
5.2.6	Valor nutritivo del forraje verde hidropónico de cebada	21
VI.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	23
6.1	Lugar de ejecución.....	23
6.2	Datos meteorológicos durante el periodo del experimento	25
6.3	Materiales y equipos	26
6.3.1	Instalación del fitotoldo	26
6.3.2	Construcción y acondicionamiento del módulo.....	26
6.3.3	Control de las condiciones ambientales	27
6.3.4	Materiales de estudio	28
6.3.5	Materiales y equipos auxiliares	28
6.4	Especie forrajera y características agronómicas	30
6.5	Tratamientos	32
6.6	Manejo experimental del forraje verde hidropónico (FVH)	35
6.6.1	Preparación y tratamiento de semillas	35

6.6.2	Siembra y disposición en bandejas	36
6.6.3	Densidad de siembra.....	36
6.6.4	Condiciones ambientales del fitotoldo.....	37
6.6.5	Periodo de crecimiento y cosecha.....	38
6.7	Metodología de las variables de estudio	40
6.7.1	Rendimiento productivo del FVH de cebada.....	40
6.7.2	Eficiencia de conversión de semilla en biomasa	41
6.7.3	Composición bromatológica del FVH de cebada.....	42
6.7.4	Biomasa total y biomasa aérea.....	44
6.8	Diseño experimental y análisis estadístico	44
6.8.1	Tipo de diseño experimental	44
VII.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	47
7.1	Peso fresco, peso seco, materia seca y altura del FVH de cebada.....	47
7.2	Eficiencia de conversión de semilla en biomasa.....	50
7.3	Composición nutricional del forraje verde hidropónico de cebada.	53
7.4	Análisis económico parcial.....	58
VIII.	CONCLUSIONES	63
IX.	RECOMENDACIONES.....	65
X.	GLOSARIO.....	66
XI.	BIBLIOGRAFÍA	68
XII.	ANEXOS	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla A. Datos meteorológicos (Estación K'ayra del 01 al 16 mayo 2023).....	25
Tabla 1. Distribución de tratamientos de densidades de siembra y periodos de crecimiento.....	33
Tabla 2. Combinación de tratamientos entre densidades de siembra y periodos de crecimiento.....	33
Tabla 3. Tratamientos experimentales evaluados en la producción de forraje verde hidropónico de cebada.....	34
Tabla 4. Rendimiento en peso fresco, peso seco, materia seca y altura del FVH de cebada en función de densidades de siembra y periodos de crecimiento.....	48
Tabla 5. Eficiencia de conversión de semilla en biomasa total (kg biomasa/1 kg semilla) del FVH de cebada según tratamiento.....	51
Tabla 6. Composición bromatológica del forraje verde hidropónico de cebada según tratamientos experimentales.....	54
Tabla 7. Costos de producción y rentabilidad del FVH de cebada en función de densidades de siembra y periodos de crecimiento.....	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la instalación de la unidad de Lombricultura.....	24
Figura 2. Diagrama de flujo del manejo experimental del FVH de cebada bajo condiciones de fitotoldo.....	39
Figura 3. Fitotoldo de investigación FVH.....	72
Figura 4. Instalación del módulo de producción de FVH.....	72
Figura 5. Sistema de riego tecnificado, motobomba.....	73
Figura 6. Equipo de luxómetro utilizado en la investigación.....	73
Figura 7. Siembra y disposición en bandejas.....	74
Figura 8. FVH en el periodo de crecimiento de 12 días.....	74
Figura 9. Cosecha de FVH en el periodo de crecimiento de 16 días.....	75
Figura 10. Toma de muestras de FVH para evaluación.....	75
Figura 11. Diseño estructural del fitotoldo de FVH vista lateral y frontal con especificaciones y orientación.....	76

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto de tres densidades de siembra (1,5; 2,0 y 2,5 kg/m²) y tres periodos de crecimiento (12, 14 y 16 días) sobre el rendimiento, composición nutricional y rentabilidad del forraje verde hidropónico (FVH) de cebada (*Hordeum vulgare* L.), producido en condiciones de fitotoldo con riego tecnificado en altitud (3 220 m). Se utilizó un diseño completamente al azar en arreglo factorial 3×3, con nueve tratamientos y tres repeticiones. Las variables evaluadas fueron peso fresco, peso seco, materia seca, altura de planta, eficiencia de conversión semilla-biomasa, composición bromatológica (proteína cruda, fibra bruta, extracto etéreo y extracto libre de nitrógeno) y análisis económico mediante presupuestos parciales. Los resultados mostraron que la densidad de 2,0 kg/m² y el periodo de 14 días presentaron el mejor equilibrio entre rendimiento en biomasa y contenido de nutrientes, con diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$). El contenido de proteína cruda varió entre 13,5 y 16,8 %, mientras que la materia seca osciló entre 13,6 y 14,1 %. La eficiencia de conversión más alta fue de 6.82 en los tratamientos de 1,5 kg/m² con 12 días de crecimiento, aunque con rendimientos absolutos menores en biomasa. El análisis económico demostró que los tratamientos de 2,0 kg/m² con 14 días de crecimiento ofrecieron la mayor rentabilidad, reduciendo costos de producción y maximizando la conversión de semilla a forraje. Se concluye que el FVH de cebada constituye una alternativa estratégica para zonas altoandinas, al garantizar biomasa de alta calidad nutricional en periodos cortos.

Palabras clave: Forraje verde hidropónico (FVH), Cebada, Densidad de siembra, Composición nutricional, Rentabilidad.

ABSTRACT

The present study aimed to evaluate the effect of three sowing densities (1,5; 2,0, and 2,5 kg/m²) and three growth periods (12, 14, and 16 days) on yield, nutritional composition, and profitability of hydroponic green forage (HGF) of barley (*Hordeum vulgare* L.), produced under greenhouse conditions with a drip irrigation system at high altitude (3 220 m). A completely randomized design with a 3×3 factorial arrangement was used, including nine treatments with three replications. The evaluated variables were fresh weight, dry weight, dry matter content, plant height, seed-to-biomass conversion efficiency, bromatological composition (crude protein, crude fiber, ether extract, and nitrogen-free extract), and economic analysis through partial budgeting. Results showed that the density of 2,0 kg/m² and the 14 day growth period achieved the best balance between biomass yield and nutrient content, with significant statistical differences ($p < 0.05$). Crude protein content ranged between 13,5 and 16%, while dry matter content varied from 13,6 to 14,1 %. Conversion efficiency was higher at lower densities and shorter growth periods, although absolute biomass yield was lower. The economic analysis indicated that the treatments with 2,0 kg/m² and 14 days of growth offered the highest profitability, reducing production costs and maximizing seed-to-forage conversion. It is concluded that barley HGF represents a strategic alternative for high Andean regions, as it provides high-quality biomass in short periods.

Keywords: Hydroponic green forage (HGF), Barley, Sowing density, Nutritional composition, Profitability.

I.INTRODUCCIÓN

La producción de forraje constituye un pilar fundamental en los sistemas pecuarios, dado que influye de manera directa en el rendimiento productivo y la rentabilidad de las explotaciones ganaderas. En las zonas altoandinas del Perú, donde las condiciones agroclimáticas están marcadas por bajas temperaturas, elevada radiación solar y marcada estacionalidad de lluvias, la disponibilidad de pastos y forrajes es limitada, particularmente durante la época seca. Este déficit forrajero afecta el desempeño productivo de especies como vacunos, ovinos, camélidos sudamericanos y cuyes, generando pérdidas económicas y reduciendo la seguridad alimentaria de las familias rurales (Quispe, 2024).

En este contexto, el forraje verde hidropónico (FVH) se presenta como una alternativa tecnológica viable para la producción intensiva de biomasa de alta calidad nutricional en espacios reducidos y bajo condiciones controladas. Este sistema consiste en la germinación y crecimiento de semillas principalmente de cereales como cebada (*Hordeum vulgare* L.), maíz o avena sobre bandejas sin suelo, utilizando únicamente agua y nutrientes disueltos, lo que permite obtener un forraje fresco en un periodo de 10 a 16 días (Flores Gutiérrez & Chilón Camacho, 2019). Entre sus ventajas destacan el ahorro de agua, la reducción de superficie requerida, la uniformidad del producto y su elevado contenido de proteína cruda y energía metabolizable (Sánchez & Rojas, 2022).

La cebada es una de las especies más empleadas en la producción de FVH debido a su rápida germinación, tolerancia a bajas temperaturas y alto valor nutritivo, que incluye un balance favorable de aminoácidos esenciales y fibra

digestible para rumiantes y monogástricos (Bedoya, 2019). En las regiones altoandinas, la cebada presenta un potencial productivo significativo incluso bajo fitotoldos, lo que permite mitigar el impacto de las heladas y mejorar la eficiencia en el uso del agua mediante sistemas de riego tecnificado (Gutiérrez & Gamarra, 2020).

La eficiencia de producción del FVH de cebada está influenciada por factores como la densidad de siembra y el periodo de crecimiento. Una densidad de siembra inadecuada puede afectar la aireación, la competencia por luz y nutrientes, en consecuencia, la biomasa total y calidad nutritiva del forraje (Flores & Ochoa, 2017). Asimismo, el tiempo de cosecha determina el balance entre rendimiento y calidad nutricional: cosechas tempranas tienden a ofrecer mayor digestibilidad y contenido proteico, mientras que cosechas más tardías incrementan la biomasa, pero reducen el valor nutritivo (Huamán et al., 2019).

En este sentido, evaluar el efecto de diferentes densidades de siembra y periodos de crecimiento en FVH de cebada bajo condiciones de fitotoldo en zonas altoandinas resulta relevante para establecer recomendaciones técnicas que optimicen el rendimiento productivo y el valor nutritivo, contribuyendo así a mejorar la eficiencia alimentaria de la ganadería local y la sostenibilidad de los sistemas de producción.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En las zonas altoandinas del Sur del Perú, las condiciones agroclimáticas se caracterizan por temperaturas medias anuales bajas (entre 4 °C y 12 °C), alta radiación solar y marcadas variaciones térmicas diarias, que en conjunto limitan el crecimiento y disponibilidad de forrajes durante gran parte del año. Esta situación provoca un déficit estacional de alimento para el ganado, particularmente en la época seca, lo que repercute negativamente en la productividad, la reproducción y el estado sanitario de las especies pecuarias (Quispe, 2024; Rojas et al., 2019). En este contexto, la implementación de sistemas alternativos de producción de biomasa de alto valor nutritivo se convierte en una necesidad estratégica para asegurar la sostenibilidad de la actividad ganadera.

El forraje verde hidropónico (FVH) de cebada (*Hordeum vulgare* L.) ha sido identificado como una opción viable para producir forraje fresco en espacios reducidos y bajo condiciones controladas, incluso en zonas de altitud superior a los 3 000 m (FAO, 2018; Bedoya, 2019); sin embargo, su rendimiento y calidad nutricional están influenciados por múltiples factores de manejo, entre los cuales la densidad de siembra y el periodo de crecimiento desempeñan un papel determinante (Flores & Ochoa, 2017; Huamán et al., 2019).

Una densidad de siembra excesiva puede generar competencia por luz y nutrientes, reducir la aireación y favorecer la proliferación de patógenos, mientras que una densidad insuficiente disminuye la cobertura y el rendimiento total de biomasa. Por su parte, el periodo de crecimiento define el balance entre

rendimiento y calidad nutritiva, ya que cosechas tempranas ofrecen mayor digestibilidad y contenido proteico, mientras que cosechas tardías priorizan volumen, pero pueden disminuir el valor nutritivo (Sánchez & Rojas, 2022).

Actualmente, existe una limitada disponibilidad de estudios desarrollados en condiciones altoandinas que determinen de manera precisa la interacción entre la densidad de siembra y el tiempo de cosecha del FVH de cebada, considerando simultáneamente parámetros productivos, nutricionales y económicos. Esta carencia de información técnica dificulta establecer protocolos de manejo adaptados a las realidades de productores pecuarios de altura, quienes requieren optimizar la producción de forraje en términos de eficiencia de uso del agua, aprovechamiento del espacio y maximización de la calidad nutricional.

2.1.1 *Pregunta general*

¿Cuál es el efecto de la densidad de siembra y del periodo de crecimiento sobre la producción, calidad nutricional y rentabilidad del forraje verde hidropónico de cebada (*Hordeum vulgare* L.) cultivado en condiciones de fitotoldo en la sierra sur del Perú?

2.1.2 *Preguntas específicas*

1. ¿Cómo influye la densidad de siembra en el rendimiento de biomasa fresca y seca del FVH de cebada en condiciones altoandinas?

2. ¿Cuál es el efecto del periodo de crecimiento (12, 14 y 16 días) sobre la composición química (proteína cruda, extracto etéreo, fibra bruta y extracto libre de nitrógeno) del FVH de cebada?

3. ¿Cuál es la combinación óptima de densidad de siembra y periodo de crecimiento que maximiza la producción y calidad nutritiva del FVH de cebada?

4. ¿Cómo varía la rentabilidad del FVH de cebada según la densidad de siembra y el periodo de crecimiento bajo condiciones de fitotoldo con riego tecnificado?

III.OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN

3.1 Objetivo general

Evaluar el efecto de la densidad de siembra y del periodo de crecimiento sobre la producción, composición nutricional y rentabilidad del forraje verde hidropónico de cebada (*Hordeum vulgare* L.), cultivado en fitotoldo con riego tecnificado bajo condiciones de altitud.

3.2 Objetivos específicos

1. Evaluar el efecto de tres densidades de siembra (1,5; 2,0 y 2,5 kg/m²) y tres periodos de crecimiento (12, 14 y 16 días) sobre el rendimiento en peso fresco, peso seco, contenido de materia seca y altura del forraje verde hidropónico de cebada.

2. Analizar la interacción entre la densidad de siembra y el periodo de crecimiento sobre la eficiencia de conversión de semilla en biomasa en condiciones de fitotoldo con riego tecnificado en altitud.

3. Determinar la composición nutricional del forraje verde hidropónico de cebada según los tratamientos evaluados, considerando los niveles de proteína cruda, extracto etéreo, fibra bruta y extracto libre de nitrógeno.

4. Evaluar la rentabilidad del sistema de producción mediante un análisis económico parcial, aplicando el método de presupuestos parciales según los diferentes tratamientos.

3.3 Justificación

La producción de forraje verde hidropónico (FVH) de cebada (*Hordeum vulgare* L.) constituye una alternativa estratégica para enfrentar la escasez de forraje en regiones altoandinas, donde las bajas temperaturas, la radiación solar intensa y la estacionalidad de las lluvias limitan la producción convencional de pasturas (Segura, 2024). La implementación de sistemas bajo fitotoldo con riego tecnificado permite mantener condiciones controladas de humedad y temperatura, optimizando el crecimiento vegetal y reduciendo el riesgo de pérdidas por factores climáticos adversos (Bedoya, 2019).

En este contexto, la densidad de siembra y el periodo de crecimiento se configuran como variables críticas que determinan la cantidad y calidad del FVH. Estudios desarrollados en ambientes similares demuestran que ajustes adecuados en la densidad pueden incrementar la biomasa y mejorar la uniformidad del cultivo, mientras que la selección precisa del tiempo de cosecha incide directamente en la concentración de proteína cruda, fibra y carbohidratos solubles (Salazar *et al.*, 2021); sin embargo, existe una limitada disponibilidad de investigaciones que evalúen de manera conjunta estas variables en condiciones altoandinas, lo que dificulta la formulación de protocolos técnicos adaptados a las particularidades agroecológicas de la sierra sur del Perú.

Desde el punto de vista productivo y económico, la validación experimental de la interacción entre la densidad de siembra y el periodo de cosecha permitirá identificar combinaciones óptimas que maximicen el rendimiento por unidad de área y la eficiencia en el uso de insumos. Esto

contribuirá no solo a mejorar la sostenibilidad de las unidades pecuarias, sino también a fortalecer la seguridad alimentaria animal, reduciendo la dependencia de concentrados comerciales y disminuyendo costos de alimentación. Además, la evaluación económica mediante presupuestos parciales ofrecerá herramientas prácticas para la toma de decisiones de los productores, facilitando la adopción de tecnologías FVH en sistemas de producción animal de pequeña y mediana escala (Rojas *et al.*, 2019).

IV.HIPÓTESIS

4.1 Hipótesis general

- **Hipótesis nula (H_0):** La variación en la densidad de siembra y en el periodo de crecimiento no influye significativamente en el rendimiento productivo, la calidad nutricional ni la rentabilidad económica del forraje verde hidropónico de cebada (*Hordeum vulgare* L.) cultivado en condiciones de fitotoldo con riego tecnificado en altitud.
- **Hipótesis alternativa (H_1):** La variación en la densidad de siembra y en el periodo de crecimiento influye significativamente en el rendimiento productivo, la calidad nutricional y la rentabilidad económica del forraje verde hidropónico de cebada (*Hordeum vulgare* L.) cultivado en condiciones de fitotoldo con riego tecnificado en altitud.

4.2 Hipótesis específicas

- **H_{01} :** No existen diferencias significativas en el rendimiento del forraje verde hidropónico de cebada, expresado en peso fresco, peso seco, altura y contenido de materia seca, entre las diferentes densidades de siembra y periodos de crecimiento.
- **H_{11} :** Existen diferencias significativas en el rendimiento del forraje verde hidropónico de cebada, expresado en peso fresco, peso seco, altura y contenido de materia seca, entre las diferentes densidades de siembra y periodos de crecimiento.

- **H₀₂**: La interacción entre la densidad de siembra y el periodo de crecimiento no influye significativamente en la eficiencia de conversión de semilla a biomasa.
- **H₁₂**: La interacción entre la densidad de siembra y el periodo de crecimiento influye significativamente en la eficiencia de conversión de semilla a biomasa.
- **H₀₃**: La composición nutricional del forraje verde hidropónico de cebada, expresada en proteína cruda, extracto etéreo, fibra bruta y extracto libre de nitrógeno, no varía significativamente en función de los tratamientos aplicados.
- **H₁₃**: La composición nutricional del forraje verde hidropónico de cebada, expresada en proteína cruda, extracto etéreo, fibra bruta y extracto libre de nitrógeno, varía significativamente en función de los tratamientos aplicados.
- **H₀₄**: La combinación de densidad de siembra y periodo de crecimiento no tiene un efecto significativo en la rentabilidad económica del sistema de producción, según el análisis de presupuestos parciales.
- **H₁₄**: La combinación de densidad de siembra y periodo de crecimiento tiene un efecto significativo en la rentabilidad económica del sistema de producción, según el análisis de presupuestos parciales.

V.MARCO TEÓRICO

5.1 Antecedentes de la investigación

Gutiérrez y Gamarra (2020) realizaron un estudio en la región de Puno, a una altitud de 3 820 m, con el objetivo de evaluar diferentes densidades de siembra en la producción de forraje verde hidropónico de cereales. Los autores analizaron el efecto de estas densidades sobre el rendimiento en biomasa fresca y seca, así como sobre la eficiencia de conversión de semilla en biomasa, evidenciando diferencias significativas entre los niveles de densidad evaluados. Este antecedente guarda relación directa con los objetivos de la presente investigación, desarrollada en condiciones de altitud similar y bajo un sistema de producción protegido.

Lozano Romero (2023) evaluó la producción de forraje verde hidropónico de avena, trigo y cebada en invernadero. En su investigación se trabajó con tres densidades de siembra: 1,5; 2,0 y 2,5 kg/m², y se concluyó que la cebada presentó el mayor rendimiento en biomasa fresca, destacando la densidad de 2,0 kg/m² como la más eficiente en términos de conversión de semilla en forraje. Además, se reportó una adecuada altura de planta y aceptable contenido de materia seca.

Salazar *et al.* (2021), realizaron un estudio en la Universidad Nacional Agraria La Molina sobre el efecto del tiempo de cosecha en la calidad del FVH de avena y cebada. El ensayo incluyó cosechas a los 10, 12 y 14 días, evaluando cambios en la composición de proteína, fibra y carbohidratos solubles, así como la digestibilidad *in vitro* de la materia seca. Encontraron que periodos de crecimiento más cortos aumentaron la proteína cruda y la digestibilidad, mientras

que periodos más largos incrementaron la fibra y redujeron la palatabilidad. Estos resultados son relevantes para establecer criterios de cosecha que optimicen el valor nutritivo del FVH de cebada en tu investigación.

Rojas *et al.* (2019) evaluaron el rendimiento y calidad nutricional del FVH de cebada producido bajo condiciones de fitotoldo en San Jerónimo, Cusco a 3 203 m s.n.m., comparando diferentes densidades de siembra (5, 7 y 9 kg/m²) con un periodo de cosecha fijo de 14 días. Se analizaron parámetros agronómicos y composición química proximal. Los autores concluyeron que una densidad de 7 kg/m² alcanzó un equilibrio óptimo entre rendimiento y calidad nutricional, con contenidos de proteína cruda cercanos al 17 % y una alta aceptabilidad por parte del ganado. Esto demuestra la viabilidad del FVH como alternativa forrajera en zonas de altitud donde la producción convencional es limitada por factores climáticos.

Castro, Mamani y Quispe (2021), desarrollaron un estudio para evaluar el efecto de tres densidades de siembra (4, 6 y 8 kg/m²) y tres periodos de cosecha (12, 14 y 16 días) sobre la producción de forraje verde hidropónico de cebada (*Hordeum vulgare* L.). El experimento se realizó bajo fitotoldo con riego tecnificado y diseño completamente al azar con arreglo factorial. Se midieron variables como rendimiento fresco, altura de planta y materia seca.

Los resultados mostraron que una densidad de 6 kg/m² cosechada a los 14 días optimizó la producción de biomasa y el contenido de materia seca, mientras que densidades más altas generaron mayor competencia por luz y

nutrientes, reduciendo la eficiencia productiva. Estos hallazgos respaldan la necesidad de ajustar la densidad y el periodo de crecimiento para maximizar el rendimiento en condiciones altoandinas.

Bedoya (2019), elaboró un manual técnico de producción de FVH en la Universidad Nacional Agraria La Molina, donde describe los principios del sistema, las densidades de siembra recomendadas (6 a 8 kg/m²) y la importancia de controlar la humedad y la temperatura en cada fase de crecimiento. El autor enfatiza que la optimización de la densidad y del periodo de cosecha es determinante para obtener un forraje con alto valor nutritivo y buena rentabilidad económica. Su trabajo constituye una base metodológica sólida para estandarizar prácticas en la producción de FVH en condiciones controladas.

5.2 Bases teóricas

5.2.1 Producción de forraje en zonas altoandinas

La producción de forraje en las zonas altoandinas del Perú presenta retos significativos debido a las condiciones agroclimáticas extremas, caracterizadas por altitudes superiores a 3 000 m s.n.m., temperaturas promedio anuales inferiores a 10 °C y marcadas variaciones térmicas diarias que pueden superar los 20 °C. A ello se suma una radiación solar intensa y una estación seca prolongada que limita la disponibilidad de pastos naturales durante gran parte del año (Ayala, 2020). Estos factores reducen la productividad de los sistemas de pastoreo y obligan a buscar alternativas como el forraje verde hidropónico, que permite asegurar una oferta constante de alimento para el ganado.

En la sierra sur del Perú, la estacionalidad forrajera se manifiesta con un marcado déficit durante los meses de estiaje (mayo a octubre), lo que impacta negativamente en la alimentación de especies pecuarias como bovinos, ovinos, camélidos y cuyes. En este contexto, la producción tradicional basada en pasturas cultivadas enfrenta problemas como la baja tasa de crecimiento en invierno, la limitada disponibilidad de agua y la degradación progresiva de los suelos (Huamán et al., 2021). Estas limitaciones obligan a los productores a utilizar forrajes conservados o subproductos agroindustriales, que en ocasiones no cubren los requerimientos nutricionales de los animales.

Diversos estudios han demostrado que la calidad nutricional del forraje disponible en zonas altoandinas varía notablemente a lo largo del año, afectando parámetros productivos como la ganancia de peso, la producción de leche o el rendimiento reproductivo (Castro et al., 2021). Por ejemplo, la proteína cruda de las pasturas puede disminuir a valores por debajo del 7 % en la época seca, lo que limita la función ruminal y la eficiencia digestiva. Frente a esta problemática, el uso de sistemas intensivos como el FVH representa una alternativa viable para mejorar la disponibilidad y calidad del alimento de manera sostenida.

5.2.2 Forraje verde hidropónico (FVH)

4.2.2.1. Definición y principios del sistema hidropónico para forraje

El forraje verde hidropónico (FVH) es un sistema de producción intensiva de biomasa vegetal a partir de granos germinados, sin la utilización de suelo, empleando únicamente agua y soluciones nutritivas controladas (Rodríguez et al., 2019). Generalmente, se produce en estructuras cerradas o semicerradas que permiten controlar temperatura, humedad y luz, garantizando

un crecimiento uniforme del cultivo. En condiciones óptimas, el FVH alcanza la etapa de cosecha entre 7 y 16 días después de la siembra, dependiendo de la especie y del objetivo productivo.

La técnica hidropónica aplicada a forrajes se basa en principios fisiológicos y agronómicos que maximizan la germinación, elongación de tallos y desarrollo de hojas, priorizando la producción de biomasa fresca de alta calidad. Este proceso involucra etapas claramente definidas: remojo de la semilla, germinación, crecimiento vegetativo y cosecha. Durante este ciclo, el cultivo aprovecha las reservas energéticas del endospermo y, posteriormente, la fotosíntesis para generar materia verde (FAO, 2018).

En el contexto ganadero, el FVH es valorado por su alta digestibilidad y por su aporte significativo de proteína, carbohidratos solubles y vitaminas, constituyendo una alternativa estratégica frente a la estacionalidad forrajera en regiones de clima extremo como las zonas altoandinas (García *et al.*, 2020).

4.2.2.2. Ventajas agronómicas y zootécnicas del FVH

Entre las ventajas agronómicas más destacadas del FVH se encuentra la optimización del uso del agua, ya que consume entre un 80 % y un 90 % menos que la agricultura convencional, lo que lo hace ideal para zonas con limitaciones hídricas (FAO, 2018). Asimismo, permite obtener altos rendimientos de biomasa por unidad de superficie y tiempo, pudiendo producir entre 6 y 10 cosechas al mes en un espacio reducido (Segura, 2024).

Desde el punto de vista zootécnico, el FVH aporta un forraje fresco con alta palatabilidad y digestibilidad, favoreciendo el consumo voluntario y mejorando parámetros productivos como la ganancia diaria de peso, la producción de leche y la eficiencia alimenticia (Castro et al., 2021). Además, su perfil nutricional, que incluye proteína cruda de entre 12 % y 20 %, carbohidratos solubles y vitaminas, contribuye a una dieta balanceada y funcional para diferentes especies pecuarias.

Otra ventaja clave es que, al no depender del suelo, el FVH puede producirse en cualquier época del año y en cualquier lugar, siempre que se disponga de una estructura adecuada y acceso al recurso hídrico, lo que resulta fundamental para comunidades altoandinas que enfrentan condiciones climáticas extremas y estacionalidad forrajera (Huamán et al., 2021).

4.2.2.3. Estructuras empleadas (fitotoldos, bandejas, sistemas de riego)

Las estructuras para la producción de FVH varían desde sistemas artesanales hasta instalaciones tecnificadas. En zonas altoandinas, el uso de fitotoldos es común, ya que permite proteger el cultivo de heladas, lluvias y radiación solar excesiva, generando un microclima más estable (Rojas et al., 2019). Los fitotoldos pueden construirse con materiales locales o con plásticos de alta resistencia, y deben garantizar ventilación controlada para evitar problemas de hongos.

El sistema de producción incluye bandejas de cultivo, generalmente de plástico o metal galvanizado, dispuestas en estanterías para maximizar el uso vertical del espacio. La elección de la bandeja debe considerar la resistencia, la facilidad de limpieza y la capacidad de drenaje para evitar encharcamientos y proliferación de patógenos (Bedoya, 2019).

En cuanto al riego, se emplean principalmente sistemas por microaspersión o nebulización, que aseguran una humedad constante sin saturar el sustrato y favorecen el desarrollo radicular. El agua utilizada debe ser de calidad y, en algunos casos, se suplementa con soluciones nutritivas para prolongar la fase de crecimiento y mejorar el perfil nutricional del forraje (FAO, 2018).

4.2.2.4. Limitaciones y desafíos de la tecnología en altura

A pesar de sus ventajas, la producción de FVH en altura presenta limitaciones técnicas y económicas. Entre ellas, la principal es la variabilidad térmica, que puede afectar la germinación y el crecimiento, requiriendo control térmico adicional en épocas de heladas o temperaturas extremas (Ayala, 2020).

Otro desafío es el manejo fitosanitario, ya que la alta humedad relativa en las estructuras puede favorecer el desarrollo de hongos como *Fusarium* spp. y *Aspergillus* spp., que afectan la calidad del forraje. Esto implica un control riguroso de la ventilación y la limpieza de bandejas y equipos (Rojas *et al.*, 2019).

Finalmente, el costo inicial de implementación de un sistema de FVH tecnificado puede ser elevado para pequeños productores, lo que limita su adopción masiva; sin embargo, su alta eficiencia en el uso del agua, el aumento

de la productividad animal y la estabilidad en el suministro forrajero pueden compensar la inversión en el mediano plazo (Segura, 2024).

5.2.3 Cebada como especie forrajera en FVH

La cebada (*Hordeum vulgare* L.) es uno de los cereales más utilizados para la producción de forraje verde hidropónico debido a su alta capacidad de germinación, rápido crecimiento y adaptación a diversas condiciones ambientales, incluidas las zonas altoandinas (Huamán et al., 2021). Su ciclo de germinación y crecimiento en sistemas hidropónicos varía entre 7 y 16 días, dependiendo de la densidad de siembra, temperatura, humedad relativa y calidad de la semilla. Durante este periodo, la cebada transforma sus reservas de carbohidratos en compuestos fácilmente digestibles, incrementando su valor nutritivo para el ganado (FAO, 2018).

En términos nutricionales, el FVH de cebada presenta contenidos de proteína cruda que oscilan entre 12 % y 20 %, niveles de fibra bruta moderados y alta digestibilidad, lo que lo convierte en un complemento ideal para dietas de bovinos, ovinos, caprinos, cuyes y aves (Castro et al., 2021). Asimismo, aporta vitaminas del complejo B, minerales como calcio, fósforo y magnesio, y compuestos bioactivos con potencial antioxidante, contribuyendo a mejorar la salud y el desempeño productivo de los animales.

La elección de la cebada como especie forrajera en zonas altoandinas responde también a su tolerancia a temperaturas bajas y a su capacidad de mantener un crecimiento estable en condiciones de radiación solar intensa.

Investigaciones realizadas en el altiplano peruano y boliviano han demostrado que, bajo condiciones controladas de fitotoldo y con manejo adecuado de densidad de siembra y riego, la cebada FVH puede alcanzar rendimientos de 7 a 9 kg de forraje fresco por kilogramo de semilla, con una eficiencia notable en el uso del agua (Rojas *et al.*, 2019; Segura, 2024).

Por estas razones, la cebada se posiciona como una alternativa estratégica para la producción forrajera sostenible en regiones de altura, no solo por su potencial productivo y calidad nutricional, sino también por su contribución a la seguridad alimentaria de los sistemas ganaderos familiares y comerciales (Huamán *et al.*, 2021).

5.2.4 Densidad de siembra y sus efectos en FVH

La densidad de siembra es uno de los factores más determinantes en la producción de forraje verde hidropónico, ya que influye directamente en el rendimiento, calidad nutricional y eficiencia en el uso de recursos como el agua y la luz. En sistemas hidropónicos, esta variable se expresa en kilogramos de semilla por metro cuadrado o por bandeja, y su manejo adecuado permite optimizar el crecimiento y el aprovechamiento del espacio (Segura, 2024).

Una densidad excesiva puede generar competencia por nutrientes y oxígeno, mayor humedad y riesgo de proliferación de patógenos, mientras que densidades muy bajas reducen la productividad total del sistema (Rojas *et al.*, 2019).

Diversos estudios han demostrado que, para la cebada, el rango óptimo de densidad de siembra en sistemas de FVH oscila entre 5 y 8 kg de semilla por metro cuadrado, dependiendo del sistema de producción, las condiciones ambientales y el tiempo de cosecha (Castro et al., 2021). Densidades superiores pueden incrementar el rendimiento en peso fresco en los primeros días, pero también pueden disminuir la altura de la planta, aumentar la humedad interna y comprometer la aireación de las raíces, afectando la calidad sanitaria del forraje (FAO, 2018).

La interacción entre densidad de siembra y periodo de crecimiento es relevante, ya que una densidad adecuada permite maximizar la producción sin sacrificar el valor nutritivo. Investigaciones en zonas altoandinas han reportado que densidades intermedias, combinadas con periodos de cosecha entre 12 y 16 días, logran un balance óptimo entre cantidad y calidad del FVH, reduciendo además el costo por kilogramo de materia seca producida (Huamán et al., 2021). Esto se debe a que, en densidades equilibradas, la intercepción de luz y la absorción de nutrientes se optimizan, promoviendo un crecimiento uniforme y una mayor concentración de compuestos nutritivos en la biomasa producida.

5.2.5 Periodo de crecimiento y tiempo de cosecha

El periodo de crecimiento en la producción de forraje verde hidropónico (FVH) se define como el intervalo de tiempo desde la siembra de la semilla hasta el momento de la cosecha. Este parámetro es crítico, ya que influye en el rendimiento, la composición nutricional y la eficiencia del sistema. En el caso de la cebada (*Hordeum vulgare* L.), el periodo de crecimiento suele variar entre 7 y

16 días, dependiendo de factores como la densidad de siembra, la calidad de la semilla, la temperatura, la humedad relativa y el manejo del riego (Segura, 2024).

Durante las primeras fases del crecimiento, la plántula utiliza las reservas de carbohidratos de la semilla para desarrollar raíces y hojas, aumentando progresivamente su contenido de proteína cruda y azúcares solubles. Sin embargo, periodos de crecimiento prolongados pueden llevar a un aumento de la fibra bruta y una disminución de la digestibilidad, debido a la lignificación progresiva de los tejidos (Rojas et al., 2019). Por esta razón, la elección del momento óptimo de cosecha debe equilibrar el rendimiento en peso fresco y seco con la calidad nutritiva del forraje.

Estudios realizados en sistemas hidropónicos de zonas altoandinas han mostrado que cosechas realizadas entre los 12 y 14 días ofrecen un balance favorable entre rendimiento, digestibilidad y contenido de proteína cruda, mientras que extender el ciclo hasta los 16 días puede aumentar el rendimiento en biomasa, pero con una reducción en la concentración proteica (Huamán et al., 2021). Este conocimiento es fundamental para diseñar estrategias de manejo que optimicen la producción y rentabilidad del FVH, considerando la interacción con la densidad de siembra y las condiciones específicas de cada sistema de producción.

5.2.6 Valor nutritivo del forraje verde hidropónico de cebada

El forraje verde hidropónico (FVH) de cebada (*Hordeum vulgare* L.) se caracteriza por su alto contenido de nutrientes y su elevada digestibilidad, lo que

lo convierte en una alternativa eficiente para suplementar la dieta de rumiantes y monogástricos. Durante el proceso de germinación y crecimiento inicial, se produce una conversión de almidones en azúcares simples y un incremento en la concentración de compuestos bioactivos, como vitaminas y enzimas, que favorecen la salud animal y el aprovechamiento de nutrientes (Akinola et al., 2019).

En términos de composición proximal, el FVH de cebada presenta niveles de proteína cruda que oscilan entre 14 % y 20 %, dependiendo de la calidad de la semilla, las condiciones de cultivo y la edad de cosecha (Rojas et al., 2019). El extracto etéreo suele ser bajo (2 a 3 %), mientras que el contenido de fibra bruta aumenta con el tiempo de crecimiento, especialmente después de los 14 días, debido a la lignificación de los tejidos (Segura, 2024). Además, el extracto libre de nitrógeno, que incluye carbohidratos solubles y estructurales, constituye la principal fuente de energía, siendo fundamental para el mantenimiento y producción en animales de alto rendimiento.

Estudios comparativos han demostrado que el FVH de cebada cultivado bajo sistemas controlados, como fitotoldos con riego tecnificado, presenta una calidad nutricional superior a la de forrajes secos o henificados, debido a su mayor contenido de humedad (80 a 85 %), frescura y palatabilidad (Castro et al., 2021). Este valor nutritivo no solo impacta positivamente en el consumo voluntario y la eficiencia alimenticia, sino que también puede reducir la necesidad de concentrados, mejorando la rentabilidad de los sistemas de producción animal.

VI.MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Lugar de ejecución

El presente trabajo de investigación se desarrolló en el Centro Agronómico de K'ayra, perteneciente a la Facultad de Agronomía y Zootecnia de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC). Este centro se encuentra ubicado en el distrito de San Jerónimo, provincia y región de Cusco, Perú. El trabajo de investigación tuvo como inicio el 1 de mayo y terminó el 16 de mayo de 2023.

Ubicación política:

- Región: Cusco
- Provincia: Cusco
- Distrito: San Jerónimo
- Localidad: Centro Agronómico K'ayra – UNSAAC

Ubicación geográfica:

- Coordenadas UTM (WGS84), zona 19S: 186 320 m E; 8 498 700 m N

El lugar presenta un clima típico de las zonas altoandinas, caracterizado por temperaturas moderadas durante el día (15 a 18 °C) y bajas durante la noche (5 a 7 °C), humedad relativa promedio de 60 a 70 % y alta radiación solar, especialmente en la estación seca (mayo a septiembre). Estas condiciones ambientales influyen directamente en la velocidad de crecimiento, contenido de humedad y composición química del forraje verde hidropónico, lo que hace relevante la evaluación de densidades de siembra y periodos de crecimiento en este contexto agroclimático (SENAMHI, 2023).



Figura 1. Ubicación de la instalación de la unidad de Lombricultura.

Fuente: Google Earth, (2025)

6.2 Datos meteorológicos durante el periodo del experimento

Tabla A. Datos meteorológicos (Estación K'ayra del 01 al 16 mayo 2023)

Fecha	T. Máx (°C)	T. Mín (°C)	T. Prom (°C)	Humedad (%)
01/05	33.1	21.0	26.5	58
02/05	32.1	20.1	26.1	60
03/05	32.9	19.2	26.0	57
04/05	32.6	18.3	25.5	59
05/05	32.5	19.8	26.2	56
06/05	32.9	18.6	25.8	58
07/05	33.0	18.9	26.0	57
08/05	32.4	18.7	25.6	60
09/05	32.0	18.5	25.4	62
10/05	31.8	18.2	25.2	61
11/05	31.5	18.0	25.0	63
12/05	31.2	17.9	24.8	64
13/05	31.0	17.7	24.6	65
14/05	30.8	17.6	24.5	66
15/05	31.1	17.8	24.7	64
16/05	31.3	18.1	24.9	63

Fuente: SENAMHI 2023

6.3 Materiales y equipos

6.3.1 Instalación del fitotoldo

El experimento se llevó a cabo en un fitotoldo diseñado y acondicionado específicamente para la producción de forraje verde hidropónico (FVH). La estructura estuvo cubierta con plástico Agrofil blanco al 30 %, material de polietileno agrícola de alta durabilidad que permite un adecuado paso de radiación fotosintéticamente activa, al tiempo que reduce el exceso de radiación solar directa. Adicionalmente, se utilizó malla Raschel negra como sistema de sombreado para disminuir la intensidad lumínica durante las horas de mayor radiación, condición crítica para prevenir estrés térmico y fotoinhibición en las plántulas (Alonso *et al.*, 2012).

El fitotoldo abarcó un área de 21 m², con una altura promedio de 3 m, dimensiones que garantizaron una adecuada circulación de aire interno y facilidad para el manejo de bandejas y equipos. Dicho espacio permitió establecer un sistema de producción controlado, minimizando la variabilidad ambiental externa, lo cual es fundamental para mantener la uniformidad en el crecimiento del FVH en zonas altoandinas.

6.3.2 Construcción y acondicionamiento del módulo

En el interior del fitotoldo se construyó un módulo de producción destinado a sostener las bandejas de germinación. Este módulo fue elaborado con listones de madera ensamblados mediante pernos galvanizados, lo que le otorgó mayor resistencia estructural. Las dimensiones del módulo fueron de 3 m de largo, 2 m

de altura y 1 m de ancho, configuradas para maximizar la capacidad de almacenamiento en un espacio reducido.

El módulo estuvo dividido en tres niveles de soporte, cada uno habilitado para colocar bandejas plásticas de cultivo. Dichos soportes se confeccionaron con cables metálicos tensados que presentaban una ligera inclinación de aproximadamente 3 %, facilitando el drenaje del exceso de agua de riego. Esta característica fue clave para evitar el encharcamiento, condición que predispone a la proliferación de hongos como *Fusarium* spp. o *Aspergillus* spp., frecuentemente asociados a la pérdida de biomasa en FVH (Ortega, 2019; Nina, 2021).

La disposición vertical del módulo permitió aprovechar eficientemente el espacio productivo, logrando una mayor densidad de bandejas por m², lo que incrementó el rendimiento total sin comprometer la calidad del forraje.

6.3.3 Control de las condiciones ambientales

El monitoreo y control ambiental constituyeron una parte esencial del estudio, dado que la producción de FVH depende de un microclima estable. Para ello, se utilizaron los siguientes instrumentos de medición:

- **Termómetro digital:** registró una temperatura promedio interna de 20,65 °C, rango considerado óptimo para el crecimiento del FVH. Temperaturas superiores a 25 °C pueden acelerar la transpiración y reducir la biomasa fresca, mientras que temperaturas inferiores a 15 °C ralentizan la germinación (Fernández, 2020).

- **Higrómetro digital:** permitió controlar la humedad relativa, la cual se mantuvo en un promedio de 80 %, condición favorable para la germinación homogénea y el desarrollo de plántulas vigorosas.

- **Luxómetro:** se utilizó para medir la intensidad de radiación lumínica, obteniéndose valores promedio de 50 018,04 luxes fuera del fitotoldo y 7 299 02 luxes dentro del mismo. Las mediciones se realizaron en tres momentos del día (8:00 a.m., 11:00 a.m. y 4:00 p.m.), evidenciando la efectividad de la malla Raschel como sistema de regulación lumínica.

El monitoreo constante de estas variables permitió realizar ajustes oportunos en la ventilación natural y el régimen de riego, asegurando la estabilidad del microclima y la uniformidad en el crecimiento de la cebada bajo condiciones altoandinas.

6.3.4 Materiales de estudio

- **Grano de cebada forrajera,** de cosecha abril 2023, proveniente de un proveedor local; con un poder germinativo de 90 %, una pureza física de 95 % y un valor cultural de 85,5 %.

- **Agua potable,** utilizada para el riego.

6.3.5 Materiales y equipos auxiliares

Los equipos y materiales utilizados fueron seleccionados para garantizar un manejo técnico estandarizado y una evaluación precisa de los parámetros productivos y bromatológicos del FVH. Entre ellos se incluyeron:

- **Módulo de producción de FVH** (3 × 2 × 1 m).

- **Bandejas plásticas rígidas** (40 × 28 cm), las bandejas de plástico utilizadas en la investigación fueron reutilizables y de alta resistencia, correspondiendo a bandejas no especializadas, comúnmente empleadas como contenedores.
- **Baldes de 18 L**, empleados para remojo y desinfección de semillas.
- **Sistema de riego por microaspersión**, compuesto por tuberías de PVC de baja presión, mangueras de distribución y micro aspersores de 360°, conectados a una bomba eléctrica 750w 0,5 Hp de marca Total Ferromax.
- **Balanza electrónica de precisión**, marca Ohaus, modelo Scout, con precisión de 0,01 g, utilizada para la determinación del peso fresco y peso seco del forraje.
- **Estufa de secado**, marca Memmert, empleada para la determinación del contenido de materia seca.
- **Molino de laboratorio**, marca IKA, modelo A11 basic, utilizado para la molienda de las muestras destinadas al análisis nutricional.
- **Cámara fotográfica digital**, marca Canon.
- **Malla Raschel y plástico Agrofil blanco al 30 %**, de marca FacainParck empleados para el control lumínico dentro del fitotoldo experimental.
- **Termómetro digital**, marca Extech, modelo 445703.
- **Higrómetro digital**, marca Extech, modelo 445703.
- **Luxómetro digital**, marca Lux Master, modelo ST9620.

6.4 Especie forrajera y características agronómicas

La especie forrajera utilizada en el presente estudio fue la cebada (*Hordeum vulgare* L.), variedad forrajera, seleccionada por su alta capacidad germinativa, rápido establecimiento y adaptabilidad a condiciones de altitud, factores que la convirtieron en una opción idónea para la producción de forraje verde hidropónico (FVH) en ambientes controlados. Este cereal presentó un ciclo de crecimiento corto en sistemas hidropónicos, con un rango de 12 a 16 días desde la siembra hasta la cosecha, lo que permitió obtener de manera sostenida una biomasa fresca de alto valor nutritivo en intervalos reducidos, optimizando la oferta forrajera para el ganado en sistemas intensivos y semi-intensivos.

Las semillas certificadas de cebada forrajera fueron adquiridas de un proveedor local, cumpliendo con las exigencias del Reglamento de Semillas del Perú (MINAGRI, 2018), que establece un poder germinativo mínimo del 90 % y una pureza física superior al 95 %. Previo a la siembra, se realizó un proceso de selección manual con el objetivo de eliminar granos dañados, partidos o con presencia de impurezas. Posteriormente, las semillas fueron sometidas a un tratamiento de desinfección superficial mediante inmersión en una solución de hipoclorito de sodio al 1 % durante un minuto, seguido de un enjuague con agua potable, protocolo recomendado por Ortega (2019) y validado en estudios recientes como el de Nina (2021), a fin de reducir la carga microbiana y prevenir el desarrollo de patógenos durante la fase de germinación.

La elección de la cebada como especie base se fundamentó en su eficiencia de conversión de semilla a biomasa fresca, alcanzando rendimientos

de 5 a 7 kg de FVH por kilogramo de semilla en condiciones controladas (Fernández, 2020). En términos nutricionales, el FVH de cebada presentó contenidos de proteína cruda que variaron entre 12 y 18 %, acompañados de una alta concentración de carbohidratos solubles, fibra digestible y minerales esenciales, lo que contribuyó a mejorar la respuesta productiva y sanitaria de rumiantes y monogástricos. Asimismo, su capacidad de adaptación en fitotoldos equipados con riego tecnificado aseguró un crecimiento homogéneo incluso bajo condiciones ambientales adversas de zonas altoandinas, caracterizadas por amplitud térmica, radiación solar intensa y limitada disponibilidad de agua y suelo agrícola (Castro et al., 2021).

En este contexto, la utilización de cebada forrajera en sistemas hidropónicos representó una estrategia tecnológica sostenible para fortalecer la seguridad alimentaria animal, especialmente en regiones con restricciones de disponibilidad forrajera estacional, contribuyendo al mejoramiento de la productividad ganadera y la resiliencia de los sistemas de producción en áreas altoandinas.

En el Perú, la certificación oficial de la semilla de cebada se realiza conforme a la Ley General de Semillas. Ley N.º 27262 y su Reglamento General aprobado mediante Decreto Supremo N.º 006-2012-AG, los cuales establecen las normas para la producción, certificación y comercialización de semillas de calidad. La entidad responsable de ejecutar estas funciones es el Servicio Nacional de Sanidad Agraria (SENASA).

6.5 Tratamientos

En el presente estudio, los tratamientos se estructuraron bajo un arreglo factorial 3×3 , considerando como factores la densidad de siembra (1,5; 2,0 y 2,5 kg de semilla/m²) y el periodo de crecimiento (12, 14 y 16 días), debido a que ambas variables controlan procesos determinantes en la producción de FVH. La literatura señala que la densidad de siembra es un componente crítico del sistema, pues modula simultáneamente la productividad por unidad de área.

El uso de densidades de siembra baja, media y alta (1,5; 2,0 y $\geq 2,5$ kg) permite identificar el nivel óptimo de siembra en el cultivo forrajero verde hidropónico de cereales, debido a que estas densidades generan distintos grados de competencia intraespecífica entre plántulas, lo cual influye directamente en el desarrollo radicular y aéreo, así como en la producción de biomasa total y biomasa aérea del forraje producido (Gutiérrez & Gamarra, 2020).

La edad de cosecha condiciona el balance entre producción de biomasa y cambios en la fracción estructural del forraje, por lo que evaluar periodos de crecimiento diferenciados permite identificar la ventana que maximiza el desempeño productivo sin comprometer la calidad. La combinación de densidades y periodos seleccionados se justifica por su pertinencia para estimar efectos principales e interacción, aportando evidencia experimental para optimizar el manejo del FVH de cebada bajo condiciones de fitotoldo.

Tabla 1. Distribución de tratamientos de densidades de siembra y periodos de crecimiento.

Densidades de siembra	Períodos de crecimiento
D1: 1,5 kg de semilla/m ²	P1: 12 días
D2: 2,0 kg de semilla/m ²	P2: 14 días
D3: 2,5 kg de semilla/m ²	P3: 16 días

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Combinación de tratamientos entre densidades de siembra y periodos de crecimiento.

Tratamientos	Combinación de tratamientos
T1:	D1 × P1
T2:	D1 × P2
T3:	D1 × P3
T4:	D2 × P1
T5:	D2 × P2
T6:	D2 × P3
T7:	D3 × P1
T8:	D3 × P2
T9:	D3 × P3

Fuente: Elaboración propia.

Cada tratamiento fue replicado tres veces, conformando un total de 27 unidades experimentales, representadas por bandejas de polietileno rígido de 40 × 28 cm, las cuales fueron asignadas aleatoriamente dentro del módulo de producción de tres niveles ubicado en el fitotoldo experimental. La aleatorización

de las unidades experimentales permitió minimizar el efecto de posibles fuentes de variación no controladas, garantizando la validez estadística de los resultados.

Tabla 3. Tratamientos experimentales evaluados en la producción de forraje verde hidropónico de cebada.

Tratamientos	Densidad de siembra (kg/m ²)	Periodo de crecimiento (días)
T1	1,5	12
T2	1,5	14
T3	1,5	16
T4	2,0	12
T5	2,0	14
T6	2,0	16
T7	2,5	12
T8	2,5	14
T9	2,5	16

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Cada tratamiento se replicó tres veces bajo un diseño completamente al azar (DCA) con arreglo factorial 3 × 3.

6.6 Manejo experimental del forraje verde hidropónico (FVH)

El manejo experimental del forraje verde hidropónico (FVH) se realizó en condiciones controladas dentro del fitotoldo, garantizando un microclima adecuado para la germinación y el desarrollo de las especies evaluadas (*Hordeum vulgare* L.). El proceso contempló desde la preparación de las semillas hasta la cosecha del forraje, siguiendo protocolos técnicos estandarizados para asegurar la uniformidad de los tratamientos.

6.6.1 Preparación y tratamiento de semillas

Las semillas fueron adquiridas de un proveedor local, con un poder germinativo del 90 % y una pureza física del 95 %. Antes de la siembra, se efectuó un proceso de selección manual para eliminar impurezas y granos dañados. A partir de estos parámetros, se determinó el valor cultural de la semilla, obteniéndose un valor cultural de 85,5 %.

$$\text{Valor cultural (\%)} = (\text{Poder germinativo \%} \times \text{Pureza física \%}) / 100$$

Posteriormente, se realizó una desinfección superficial con hipoclorito de sodio al 1 % durante 1 minuto, seguida de enjuagues con agua potable, con el fin de prevenir la proliferación de patógenos fúngicos y bacterianos, tal como sugieren (Ortega ,2019) y (Nina ,2021).

Las semillas fueron colocadas en remojo en baldes de 18 L, utilizando agua potable en una relación semilla: agua de 1:3, durante un periodo de 12 horas. Este proceso facilitó la imbibición y activación enzimática, favoreciendo una germinación uniforme.

6.6.2 Siembra y disposición en bandejas

La siembra se llevó a cabo en bandejas plásticas rígidas de 40 × 28 previamente desinfectadas con solución de hipoclorito de sodio al 1 %. Las semillas se distribuyeron de manera homogénea según la densidad de siembra establecida en cada tratamiento experimental (ver ítem de tratamientos), manteniendo una capa uniforme de granos en toda la superficie de la bandeja.

Las bandejas fueron colocadas en los módulos de producción dispuestos en tres niveles. Para evitar acumulación de agua, los soportes presentaron una ligera inclinación de 3 %, lo que permitió un drenaje eficiente.

6.6.3 Densidad de siembra

Si bien es cierto que diversos estudios han demostrado que, para la cebada, el rango óptimo de densidad de siembra en sistemas de FVH oscila entre 5 y 8 kg de semilla por metro cuadrado, dependiendo del sistema de producción, las condiciones ambientales y el tiempo de cosecha (Castro et al., 2021). La tendencia actual se orienta a optimizar el uso de los recursos en los sistemas de producción; por ello, se plantea el uso de densidades de siembra inferiores a las recomendadas.

El uso de densidades de siembra baja, media y alta (1,5; 2,0 y $\geq 2,5$ kg) permite identificar el nivel óptimo de siembra en el cultivo forrajero verde hidropónico de cereales, debido a que estas densidades generan distintos grados de competencia intraespecífica entre plántulas, lo cual influye directamente en el desarrollo radicular y aéreo, así como en la producción de biomasa total y biomasa aérea del forraje producido (Gutiérrez & Gamarra, 2020).

El riego se efectuó mediante un sistema de microaspersión, compuesto por tuberías de PVC, mangueras de distribución y microaspersores de 360°, conectados a una bomba eléctrica de 0,5 HP. El riego se aplicó tres veces al día (mañana, mediodía y tarde), con un caudal aproximado de 2 a 5 litros por minuto y un tiempo de aplicación fue de 1 minuto por riego, con la finalidad de mantener una humedad adecuada sin generar encharcamientos, condición crítica para prevenir la aparición de enfermedades y favorecer el adecuado desarrollo del forraje verde hidropónico.

El monitoreo de la humedad ambiental se realizó con un higrómetro digital, manteniéndose en valores cercanos al 80 %, rango considerado óptimo para la germinación y el crecimiento del FVH.

FAO (2018), indica que la producción de forraje verde hidropónico presenta una alta eficiencia en el uso del recurso hídrico, ya que es posible obtener hasta 100 kg de forraje por cada m³ de agua utilizada, valor considerablemente superior al registrado en cultivos convencionales. En ese sentido, dicha relación implica que para la producción de 0,5 kg de forraje verde hidropónico se requiere aproximadamente 5 L de agua.

6.6.4 Condiciones ambientales del fitotoldo

Durante el desarrollo del experimento no se registraron temperaturas nocturnas, debido a que el monitoreo ambiental se realizó únicamente durante el periodo diurno. La temperatura interna del fitotoldo, registrada en horas del día, se mantuvo en un rango promedio de 20 a 22 °C, la cual fue regulada de

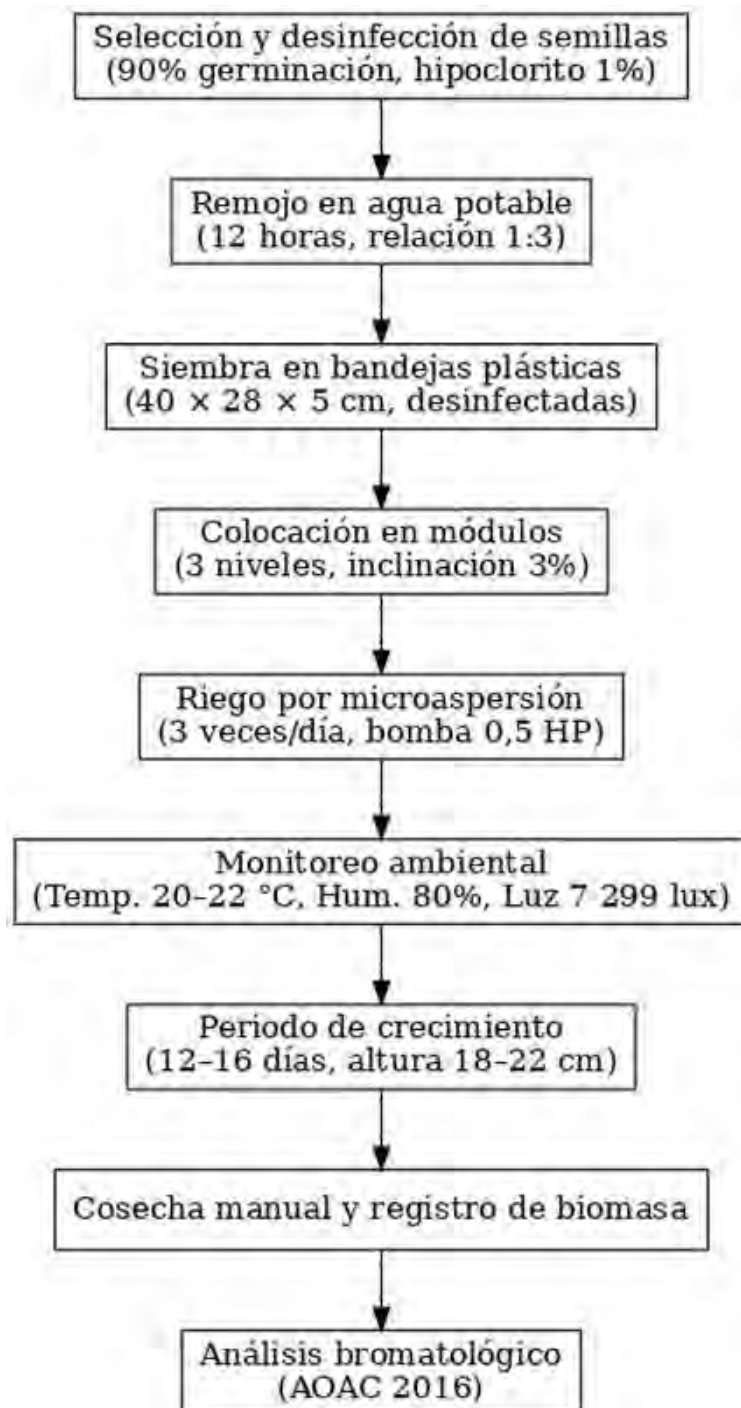
manera manual mediante la apertura parcial de la puerta del fitotoldo cuando las condiciones internas superaban dicho rango. Este manejo permitió favorecer la ventilación natural y la disipación del calor acumulado, mientras que la humedad relativa se mantuvo en valores promedio de 80 %. La intensidad lumínica fue registrada con un luxómetro, alcanzando 7 299 luxes dentro del fitotoldo, valores adecuados para la fotosíntesis sin riesgo de estrés por radiación, gracias al uso de malla Raschel como sistema de regulación lumínica.

6.6.5 *Periodo de crecimiento y cosecha*

El periodo de crecimiento del FVH varió entre 12 y 16 días, dependiendo de la densidad de siembra y la especie forrajera evaluada. La cosecha se realizó cuando las plántulas alcanzaron una altura promedio de 18 a 22 cm, momento en el que presentan su mayor contenido de biomasa fresca y máxima digestibilidad (Castro et al., 2021).

El forraje se cosechó de manera manual, extrayendo cada bandeja y registrando los pesos de biomasa fresca. Posteriormente, se tomaron submuestras para la determinación de materia seca y análisis bromatológico de acuerdo con los protocolos de la AOAC (2019).

Figura 2. Diagrama de flujo del manejo experimental del FVH de cebada bajo condiciones de fitotoldo.



Fuente: Elaboración propia

6.7 Metodología de las variables de estudio

6.7.1 Rendimiento productivo del FVH de cebada

Con el propósito de evaluar el efecto de las densidades de siembra (1,5; 2,0 y 2,5 kg/m²) y de los periodos de crecimiento (12, 14 y 16 días) sobre el rendimiento en peso fresco, peso seco, contenido de materia seca y altura del FVH de cebada, se efectuaron las siguientes determinaciones:

- **Peso fresco (kg/m²):** al finalizar cada periodo de crecimiento, se cosechó la biomasa completa de cada bandeja y se pesó en una balanza digital de precisión (0,01 g). Posteriormente, los valores se estandarizaron en función de la superficie útil de las bandejas, obteniéndose la producción de biomasa fresca por m².
- **Peso seco (kg/m²):** a partir de la biomasa fresca cosechada, se extrajo una submuestra representativa de 200 g, la cual fue secada en una estufa a 105 °C durante 24 horas, hasta alcanzar peso constante, siguiendo la metodología de la AOAC (2019). Los resultados se extrapolaron al total de cada bandeja.
- **Contenido de materia seca (%):** se calculó a partir de la relación entre el peso seco y el peso fresco de la muestra, aplicando la siguiente fórmula.

$$MS (\%) = (\text{Peso seco (g)} / \text{Peso fresco (g)}) \times 100$$

Para la evaluación de las variables de respuesta se aplicaron procedimientos estandarizados y descritos en la literatura, adaptados a las

condiciones del ensayo. Las mediciones se realizaron inmediatamente después de la cosecha para evitar pérdidas de humedad y cambios en la composición.

- **Altura del forraje (cm):** se midió con una regla graduada desde la base del tapete radicular hasta el ápice de la lámina foliar más alta. Se realizaron tres mediciones por bandeja y se registró el promedio. Estos procedimientos permitieron evaluar cuantitativamente la respuesta productiva del FVH de cebada, bajo condiciones controladas de fitotoldo en altitud, metodología similar a la descrita por Ortega (2019) y Nina (2021).

6.7.2 Eficiencia de conversión de semilla en biomasa

La eficiencia de conversión se determinó a partir de la relación entre el peso de biomasa fresca cosechada y el peso de semilla utilizada en cada tratamiento. Para ello, previamente se registró el peso exacto de semilla sembrada por bandeja, y al término del ciclo de crecimiento se obtuvo el rendimiento en biomasa fresca. El índice de conversión se calculó mediante la fórmula:

$$\text{Eficiencia de conversión} = \text{Biomasa fresca (kg)} / \text{Semilla utilizada (kg)}$$

Este indicador permitió analizar la interacción entre las densidades de siembra y los periodos de crecimiento, identificando las combinaciones más eficientes en la transformación de semilla en biomasa bajo condiciones altoandinas de fitotoldo con riego tecnificado. La metodología se basó en lo señalado por Fernández (2020) y Castro et al. (2021).

6.7.3 Composición bromatológica del FVH de cebada

Para determinar la calidad nutricional del forraje verde hidropónico (FVH), se realizaron análisis bromatológicos en muestras representativas de cada tratamiento. Las muestras fueron molidas en un molino y posteriormente enviadas al Laboratorio de la Unidad de Prestaciones de Servicios de Análisis Químico del Departamento Académico de Química, donde se efectuó el análisis fisicoquímico y nutricional, de acuerdo con los métodos establecidos por AOAC INTERNATIONAL.

- **Proteína cruda (PC, %):** determinada mediante el método Kjeldahl, utilizando un digestor y un destilador automático, con el factor de conversión de nitrógeno total (6,25).
- **Extracto etéreo (EE, %):** cuantificado por el método Soxhlet, con éter de petróleo como solvente, durante un tiempo de extracción de 6 horas.
- **Fibra bruta (FB, %):** determinada por digestión secuencial con soluciones ácido sulfúrico e hidróxido de sodio, para estimar la fracción menos digestible de la fibra.
- **Extracto libre de nitrógeno (ELN, %):** calculado por diferencia aritmética según la siguiente fórmula:

$$\text{ELN (\%)} = 100 - (\text{PC} + \text{EE} + \text{FB} + \text{Cenizas})$$

Los resultados bromatológicos permitieron caracterizar la calidad nutritiva del FVH de cebada, información fundamental para su aplicación en sistemas de alimentación animal.

6.6.4. Análisis económico parcial del sistema de producción

Para evaluar la rentabilidad del sistema de producción, se aplicó el método de presupuestos parciales, que permite analizar la viabilidad económica considerando los ingresos y egresos variables de cada tratamiento (CIMMYT, 1988).

El análisis económico parcial es una herramienta metodológica que permite evaluar la rentabilidad del sistema de producción de forraje verde hidropónico, considerando únicamente los costos y beneficios que varían entre los tratamientos evaluados. Este método se enfoca en identificar los cambios económicos derivados de la aplicación de diferentes densidades de siembra y periodos de crecimiento, excluyendo aquellos costos fijos que permanecen constantes en todos los tratamientos.

En el presente estudio, el análisis económico parcial se aplicó para estimar los costos variables de producción, así como los ingresos generados por la producción de forraje en cada tratamiento. A partir de esta información, se calcularon indicadores económicos como el beneficio neto y la relación beneficio/costo (B/C), los cuales permitieron comparar la eficiencia económica y la viabilidad financiera de cada alternativa productiva. Los costos se dividieron en:

- **Costos directos variables:** compra de semilla, agua utilizada, insumos de desinfección, energía eléctrica y mano de obra empleada en las actividades de riego, limpieza y cosecha.
- **Costos fijos parciales:** depreciación de equipos e infraestructura empleada durante el experimento.

Los ingresos se calcularon en función del rendimiento de biomasa fresca y seca obtenida en cada tratamiento, considerando su valor de mercado en la zona de estudio. La relación beneficio/costo (B/C) se calculó mediante la fórmula:

$$\text{Relación B/C} = \text{Beneficio neto/Costo total de producción}$$

Este análisis permitió identificar los tratamientos más rentables y determinar la factibilidad de adopción del FVH de cebada como una alternativa estratégica para mejorar la disponibilidad forrajera en sistemas ganaderos de altura, siguiendo lo descrito por Alonso et al. (2012) y Nina (2021).

6.7.4 Biomasa total y biomasa aérea

- **Biomasa:** Cantidad de materia orgánica producida por el cultivo como resultado del crecimiento vegetal, expresada en peso fresco o peso seco.
- **Biomasa aérea:** Fracción de la biomasa vegetal conformada principalmente por hojas y tallos.
- **Biomasa total:** En el FVH, es la cantidad total de materia orgánica del forraje producida por el cultivo, que comprende hojas, tallos, raíces y semillas.

6.8 Diseño experimental y análisis estadístico

6.8.1 Tipo de diseño experimental

El experimento se desarrolló bajo un diseño completamente al azar (DCA) en arreglo factorial 3×3, correspondiente a tres densidades de siembra (1,5; 2,0 y 2,5 kg/m²) y tres periodos de crecimiento (12, 14 y 16 días). Este

enfoque permitió evaluar tanto los efectos principales de cada factor como la interacción entre ellos sobre las variables de respuesta. En total se establecieron nueve tratamientos experimentales, cada uno con tres repeticiones, sumando 27 unidades experimentales. Cada unidad correspondió a una bandeja de siembra de FVH de cebada, lo que garantizó independencia experimental y homogeneidad en las condiciones de manejo. El análisis de las variables productivas y bromatológicas se realizó ajustando el siguiente modelo lineal aditivo:

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + (AB)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

- Y_{ijk} = observación de la variable de respuesta en la i-ésima densidad de siembra, j-ésimo periodo de crecimiento y k-ésima repetición.
- μ = media general.
- A_i = efecto de la i-ésima densidad de siembra ($i = 1,2,3$).
- B_j = efecto del j-ésimo periodo de crecimiento ($j = 1,2,3$).
- $(AB)_{ij}$ = efecto de la interacción entre densidad de siembra y periodo de crecimiento.
- ε_{ijk} = error aleatorio, asumido con distribución normal, media cero y varianza constante.

Para las variables cuantitativas (peso fresco, peso seco, materia seca, altura, conversión y parámetros bromatológicos), los datos fueron sometidos a Análisis de Varianza (ANOVA) factorial. Cuando se detectaron diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$), se aplicó la prueba de comparación de

medias de Tukey al 95 % de confianza, con el fin de discriminar las diferencias entre tratamientos.

Para la variable económica, se realizó un análisis de presupuestos parciales, cuyos resultados fueron interpretados comparativamente entre los tratamientos.

El procesamiento de los datos se efectuó utilizando el software Statistical Package for the Social Sciences (SPSS v.25) y InfoStat v.2020, programas que permitieron realizar los análisis factoriales, verificar supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas, y obtener gráficos de interacción.

VII.RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Peso fresco, peso seco, materia seca y altura del FVH de cebada

El análisis estadístico mostró diferencias altamente significativas ($p < 0,05$) en el rendimiento de peso fresco del FVH de cebada en su biomasa total (raíces, tallos, hojas y semillas) en función de las densidades de siembra y los periodos de crecimiento evaluados. Se observó que la densidad de $2,5 \text{ kg/m}^2$ alcanzó el mayor promedio de biomasa fresca a los 16 días ($10,2 \pm 0,5 \text{ kg/m}^2$, T9), mientras que la densidad de $1,5 \text{ kg/m}^2$ presentó menores rendimientos ($6,8 \pm 0,2 \text{ kg/m}^2$, T1). Este comportamiento se atribuye a la mayor cantidad de semilla disponible por unidad de superficie, lo que favoreció una cobertura más eficiente y un mayor aprovechamiento del espacio productivo.

En cuanto al peso seco, los valores obtenidos oscilaron entre 0,92 y 1,45 kg/m^2 , mientras que el contenido de materia seca presentó valores entre 13,6 y 14,3 %. Esto indica que, aunque el incremento de la densidad de siembra aumentó la biomasa fresca, no tuvo un efecto marcado sobre la concentración de materia seca, coincidiendo con lo reportado por Ortega (2019), quien señala que el aumento en la densidad favorece la biomasa verde, pero no necesariamente la acumulación de materia seca por plántula.

La altura del FVH varió significativamente entre periodos de crecimiento, con promedios de 18,2 cm a los 12 días hasta 24,6 cm a los 16 días, mostrando que el mayor tiempo de crecimiento permitió un desarrollo más vigoroso de la parte aérea. Quispe (2024) también reporta que el incremento del tiempo de crecimiento en FVH de cebada genera mayor altura de plántula y biomasa fresca, aunque con tendencia a reducir la eficiencia de conversión de semilla a biomasa al superar los 14 días de cultivo.

Tabla 4. Rendimiento en peso fresco, peso seco, materia seca y altura del FVH de cebada en función de densidades de siembra y periodos crecimiento.

Ttos	Densidad (kg/m²)	Días de crecimiento	Peso fresco (kg/m²)	Peso seco (kg/m²)	Materia seca (%)	Altura (cm)
T1	1,5	12	6,8 ± 0,2 b	0,92 ± 0,1 b	13,6 ± 0,5 a	18,2 ± 0,8 c
T2	1,5	14	7,4 ± 0,3 b	1,02 ± 0,1 b	13,8 ± 0,4 a	19,6 ± 0,7 c
T3	1,5	16	8,0 ± 0,3 b	1,12 ± 0,2 b	14,0 ± 0,3 a	20,4 ± 0,9 b
T4	2,0	12	7,6 ± 0,2 b	1,05 ± 0,2 b	13,7 ± 0,4 a	19,8 ± 0,6 b
T5	2,0	14	8,5 ± 0,3 a	1,18 ± 0,2 a	14,2 ± 0,3 a	21,5 ± 0,8 b
T6	2,0	16	9,4 ± 0,4 a	1,34 ± 0,2 a	14,3 ± 0,2 a	22,7 ± 0,7 a
T7	2,5	12	7,9 ± 0,3 b	1,08 ± 0,2 b	13,7 ± 0,4 a	20,0 ± 0,8 b
T8	2,5	14	9,0 ± 0,4 a	1,25 ± 0,2 a	13,9 ± 0,3 a	22,0 ± 0,6 a
T9	2,5	16	10,2 ± 0,5 a	1,45 ± 0,2 a	14,1 ± 0,2 a	24,6 ± 09 a

Fuente: Elaboración propia.

Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas (Tukey, $p < 0,05$).

La interacción entre densidad y periodo de crecimiento mostró que los valores más altos de biomasa fresca y altura se lograron en la densidad de 2,5 kg/m² a los 16 días, mientras que el mejor balance entre peso seco y eficiencia en el uso de semilla se obtuvo en la densidad de 2,0 kg/m² a los 14 días. Esto refuerza lo señalado por Fernández (2020), quien recomienda ajustar la densidad y el ciclo de crecimiento según los objetivos productivos (volumen de biomasa vs. concentración de nutrientes).

En términos comparativos, Castro et al. (2021) reportaron contenidos de materia seca de 12 a 15 % en FVH de cebada cultivada en altitud, valores consistentes con los obtenidos en el presente estudio. Asimismo, Nina (2021) encontró que los periodos de 14 días optimizan la calidad nutricional y reducen riesgos de proliferación de hongos, lo que coincide con el mejor rendimiento observado en este experimento para peso seco y materia seca en dicho periodo.

Los resultados permiten inferir que la mayor densidad de siembra incrementa el peso fresco por unidad de superficie, pero no necesariamente mejora la calidad nutritiva ni la eficiencia de conversión. A su vez, el periodo de 14 días representó un punto de equilibrio entre rendimiento y calidad, lo que se alinea con las recomendaciones de Ortega (2019) y Nina (2021). Desde el punto de vista zootécnico, esto implica que para sistemas ganaderos de altura donde el espacio y los recursos son limitados, la elección de densidades intermedias y ciclos de 14 días resultan estratégicos para garantizar disponibilidad de forraje fresco y de adecuada composición bromatológica.

7.2 Eficiencia de conversión de semilla en biomasa

El análisis de varianza evidenció diferencias significativas ($p < 0,05$) en la eficiencia de conversión de semilla en biomasa ($EC = \text{kg de biomasa fresca/kg de semilla}$) en función de las densidades de siembra y los periodos de crecimiento evaluados. En conjunto, los valores de EC se ubicaron en un rango de 4,95 a 6,82 kg/kg, lo que confirma que la conversión no es constante y responde de manera diferenciada a la combinación densidad–tiempo. En el análisis de interacción, el mayor valor se registró en la densidad de 1,5 kg/m² a los 12 días (6,82 kg/kg), mientras que la menor eficiencia correspondió a 2,5 kg/m² a los 16 días (4,95 kg/kg), evidenciando una reducción progresiva de la conversión cuando se incrementa la densidad y se prolonga el periodo de crecimiento.

La menor eficiencia observada en la mayor densidad y el mayor tiempo de crecimiento puede atribuirse al incremento de la competencia intraespecífica, que intensifica el uso de reservas y recursos disponibles (luz, espacio y oxigenación en el tapete radicular), reduciendo la biomasa producida por unidad de semilla empleada. Este comportamiento es consistente con lo reportado por Nina (2021), quien señala que densidades altas pueden aumentar el peso fresco por superficie, pero tienden a disminuir la eficiencia de conversión debido al mayor gasto energético asociado a la elongación de plántulas y a condiciones de mayor retención de humedad en el sustrato. Asimismo, los resultados sugieren que periodos superiores a 14 días no necesariamente mejoran la conversión, ya que se incrementan procesos fisiológicos como la respiración y la

transpiración, lo que concuerda con lo indicado por Fernández (2020) respecto a la pérdida de eficiencia cuando se prolonga el ciclo.

Tabla 5. Eficiencia de conversión de semilla en biomasa total (kg biomasa/ 1 kg semilla) del FVH de cebada según tratamientos.

Densidad (kg/m ²)	12 días	14 días	16 días	Promedio
1,5	6,82 ^a	6,45 ^a	6,12 ^a	6,46
2,0	6,30 ^a	5,95 ^b	5,60 ^b	5,95
2,5	5,75 ^b	5,30 ^c	4,95 ^c	5,33
Promedio	6,29	5,90	5,55	

Fuente: Elaboración propia.

Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas (Tukey, $p < 0.05$).

La interacción entre densidad y periodo de crecimiento resultó determinante para explicar el desempeño de la eficiencia de conversión. Si bien la mejor conversión se alcanzó con 1,5 kg/m² a los 12 días, desde una perspectiva productiva aplicada es relevante destacar que densidades intermedias pueden representar un compromiso operativo entre eficiencia del insumo semilla y obtención de biomasa en campo, tal como sugiere Ortega (2019) al indicar que densidades intermedias reducen el desperdicio de semilla y favorecen la productividad relativa del FVH de cebada.

En esa misma línea, Quispe (2024) subraya la importancia de optimizar la conversión de insumos a biomasa como criterio de reducción de costos alimenticios, reforzando la utilidad práctica de estos resultados para sistemas pecuarios, especialmente en zonas altoandinas. En términos comparativos, Castro et al. (2021) reportaron eficiencias promedio cercanas a 4,8 kg/kg en sistemas hidropónicos de cebada bajo condiciones altoandinas, valores que se encuentran dentro del rango obtenido en el presente estudio.

En síntesis, los hallazgos permiten establecer que la eficiencia de conversión de semilla en biomasa no depende únicamente del incremento de la densidad o del tiempo de crecimiento, sino de la combinación adecuada de ambos factores. La evidencia muestra que densidades menores y periodos más cortos tienden a maximizar la EC, mientras que densidades elevadas y periodos prolongados la reducen. Por ello, la selección del manejo debe responder al objetivo del productor: priorizar la eficiencia del insumo semilla (maximizando EC) o priorizar el volumen de biomasa por superficie (que puede aumentar con densidad, aunque con menor conversión). En contextos de pequeños y medianos productores de regiones altoandinas, definir este equilibrio resulta clave para sostener una producción de forraje más eficiente, con potencial impacto en la reducción de costos y en la estabilidad de la oferta alimenticia para especies menores y rumiantes.

7.3 Composición nutricional del forraje verde hidropónico de cebada.

La composición bromatológica del FVH de cebada estuvo influenciada tanto por la densidad de siembra como por el periodo de crecimiento, mostrándose diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos para los parámetros de proteína cruda, fibra bruta, extracto etéreo y extracto libre de nitrógeno (ELN). Los resultados promedio se presentan en el Tabla 6.

Se observó que el mayor contenido de proteína cruda (16,8 %) correspondió al tratamiento T1 (1,5 kg/m² – 12 días), mientras que el menor valor (13,5 %) se presentó en T9 (2,5 kg/m² – 16 días). Esto indicó que la prolongación del periodo de crecimiento redujo el nivel proteico, lo cual coincide con lo reportado por Herrera et al. (2017) en FVH de avena, quienes evidenciaron una disminución progresiva de la proteína con el avance de la madurez fisiológica. Asimismo, mayores densidades tendieron a reducir la concentración proteica, probablemente debido a la competencia por nutrientes y luz (Nina, 2021).

En el caso de la fibra bruta, los valores más altos (19,5 % en T9 y 19,2 % en T6) se registraron en los tratamientos de mayor densidad y mayor número de días, reflejando una mayor lignificación de los tejidos vegetales a medida que se prolongó el crecimiento. Resultados similares fueron reportados por Castro et al. (2021), quienes destacaron que la prolongación del ciclo incrementa la pared celular y reduce la digestibilidad.

Tabla 6. Composición bromatológica del forraje verde hidropónico de cebada según tratamientos experimentales.

Tratamiento	Proteína cruda (%)	Extracto etéreo (%)	Fibra bruta (%)	Extracto libre de N (%)
T1 (1,5 kg/m²) 12 días	16,8 ^a	3,0 ^a	16,5 ^b	59,0 ^a
T2 (1,5 kg/m²) 14 días	15,9 ^{ab}	2,8 ^{ab}	17,2 ^b	58,0 ^{ab}
T3 (1,5 kg/m²) 16 días	14,1 ^c	2,5 ^b	18,9 ^a	56,5 ^b
T4 (2,0 kg/m²) 12 días	16,2 ^a	2,9 ^a	17,0 ^b	58,5 ^{ab}
T5 (2,0 kg/m²) 14 días	15,2 ^b	2,7 ^b	18,0 ^a	57,0 ^b
T6 (2,0 kg/m²) 16 días	13,9 ^c	2,4 ^b	19,2 ^a	56,2 ^b
T7 (2,5 kg/m²) 12 días	15,7 ^b	2,8 ^{ab}	17,8 ^b	57,2 ^b
T8 (2,5 kg/m²) 14 días	14,8 ^b	2,6 ^b	18,5 ^a	56,8 ^b
T9 (2,5 kg/m²) 16 días	13,5 ^c	2,3 ^b	19,5 ^a	55,9 ^b

Fuente: Elaboración propia.

Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas (Tukey, $p < 0,05$).

El extracto etéreo presentó un rango estrecho (2,3 a 3,0 %), con valores ligeramente superiores en los tratamientos de menor tiempo de crecimiento. Estos niveles son comparables con los descritos por FAO (2018) en estudios de FVH de cereales (2,5 a 3,5 %).

El extracto libre de nitrógeno (ELN) mostró una tendencia decreciente al aumentar los días de crecimiento, lo cual puede explicarse por la utilización de reservas de carbohidratos en la germinación y el mayor desarrollo de estructuras fibrosas en periodos prolongados. Este comportamiento ha sido descrito también en cebada hidropónica por (Ortega ,2019).

En términos prácticos, los tratamientos de menor densidad y menor tiempo de crecimiento favorecieron un balance nutricional más adecuado (alto en proteína y carbohidratos solubles, bajo en fibra), lo que resulta ideal para la alimentación animal en sistemas intensivos. Sin embargo, tratamientos intermedios T5 (2,0 kg/m²-14 días) representaron un punto de equilibrio entre cantidad de biomasa y calidad nutricional.

Los resultados obtenidos evidenciaron que la calidad nutricional del FVH de cebada estuvo determinada principalmente por la interacción entre la densidad de siembra y el periodo de cosecha, lo cual coincide con estudios previos que señalan a estas variables como factores críticos para optimizar la producción (Nina, 2021; Castro et al., 2021). En particular, los valores más altos de proteína cruda se observaron en las menores densidades y periodos más cortos, lo que refleja la alta actividad metabólica de las plántulas en estadios

tempranos. Este comportamiento es consistente con lo descrito por Herrera et al. (2017) en avena y por Alonso et al. (2012) en cebada, quienes demostraron que, durante los primeros 12 a 14 días, las plantas destinan gran parte de sus reservas a la síntesis de proteínas y carbohidratos solubles, favoreciendo una mayor digestibilidad.

La reducción progresiva de proteína y el incremento de fibra a los 16 días de cosecha observados en nuestro estudio confirman el proceso de lignificación de tejidos y movilización de reservas, lo cual es un comportamiento fisiológico esperado en gramíneas forrajeras. Este mismo fenómeno fue descrito por Ortega (2019) en sistemas de FVH en altitud, donde se evidenció que el retardo en la cosecha disminuye el valor nutritivo del forraje.

Por otro lado, el contenido de fibra bruta encontrado (16 a 19.5 %) se ubicó dentro de los rangos reportados en estudios similares en la región andina (Quispe, 2024; Castro et al., 2021). La tendencia ascendente de este parámetro con el tiempo de crecimiento puede limitar la digestibilidad en monogástricos, aunque en rumiantes puede aportar beneficios asociados a la función ruminal. Este aspecto es importante de considerar en la planificación de dietas diferenciadas según especie y etapa productiva.

El comportamiento del extracto etéreo y del ELN también respalda los hallazgos de la literatura. El leve descenso del extracto etéreo hacia los 16 días se atribuye a la utilización de compuestos lipídicos en el metabolismo energético de las plántulas (FAO, 2018), mientras que la disminución del ELN refleja la transformación de carbohidratos solubles en compuestos estructurales.

Esto último es relevante desde un punto de vista zootécnico, ya que afecta directamente la energía metabolizable disponible para los animales.

Comparando los resultados de la presente investigación con los reportados por Nina (2021) en la UNSAAC, se aprecia una similitud en la tendencia de reducción de proteína y aumento de fibra con el tiempo de cosecha, aunque en nuestro caso los valores de proteína fueron ligeramente superiores en los tratamientos de 12 días. Esto podría atribuirse a las condiciones de fitotoldo y al manejo del riego tecnificado, que mejoraron la disponibilidad hídrica y la eficiencia fotosintética, favoreciendo una mayor acumulación de biomasa y nutrientes, en concordancia con lo señalado por Castro et al. (2021).

Desde una perspectiva práctica, los tratamientos de menor densidad y menor tiempo de cosecha particularmente T1(1,5 kg/m² – 12 días) resultaron ser los más ventajosos para obtener un FVH de alta calidad nutricional, con niveles de proteína cercanos al 17 %, fibra moderada y carbohidratos solubles elevados. No obstante, desde un enfoque de equilibrio entre cantidad de biomasa y calidad nutricional, el tratamiento intermedio T5 (2,0 kg/m² – 14 días) podría representar un punto óptimo para sistemas productivos, dado que asegura una producción aceptable en volumen sin sacrificar significativamente la calidad nutritiva.

Finalmente, la discusión de estos resultados debe contextualizarse en el marco de la sostenibilidad de la producción pecuaria en zonas altoandinas, donde el FVH de cebada representa una alternativa estratégica frente a la

escasez estacional de pasturas naturales. En este sentido, la literatura disponible (FAO, 2018; Quispe, 2024) y los hallazgos de este estudio coinciden en que la correcta definición de densidad de siembra y momento de cosecha puede optimizar no solo la calidad nutricional del forraje, sino también la eficiencia del sistema en términos de conversión de semilla en biomasa utilizable.

7.4 Análisis económico parcial

Los resultados del análisis económico evidenciaron que la densidad de siembra de 2,0 kg/m², asociada a periodos de crecimiento de 14 y 16 días, fue la estrategia más rentable, con una relación beneficio/costo (B/C) de 2,12 es decir que el sistema presenta una alta rentabilidad, ya que por cada sol invertido se obtiene un retorno de S/. 2,12, confirmando la eficiencia del sistema y su potencial de escalabilidad.

La densidad baja (1,5 kg/m²) mostró costos por kilogramo de FVH de entre 0,74 y 0,76 soles, competitivos para pequeños productores que no disponen de grandes volúmenes de semilla. Aunque los rendimientos fueron menores, esta densidad permitió mantener un equilibrio entre inversión inicial y producto obtenido, representando una alternativa viable en sistemas familiares donde el acceso a recursos financieros es limitado.

Por otro lado, la densidad alta (2,5 kg/m²) generó la mayor biomasa por superficie hasta (9,8 kg/m²), pero los costos por kilogramo fueron superiores (0,82 a 0,83 S/.) y la rentabilidad más baja (B/C: 1,80 a 1,84). Esto se debe al incremento en los requerimientos de semilla, manejo y agua, sin un aumento

proporcional en la eficiencia de conversión. En consecuencia, este sistema no es recomendable para productores familiares o semi-intensivos con márgenes reducidos de inversión, ya que se incurre en un rendimiento económico decreciente (García et al., 2018).

Desde una perspectiva productiva, la densidad de 2,0 kg/m² no solo ofreció un balance entre rendimiento y costos, sino que además coincidió con mayores valores de conversión semilla-biomasa fresca, reforzando que la eficiencia económica depende más de la capacidad de transformación de insumos en biomasa utilizable que de la producción bruta. Este patrón también fue reportado por Nina (2021) en estudios con FVH de cebada en la sierra sur, donde densidades intermedias mostraron mejores indicadores de conversión y rentabilidad.

Tabla 7. Costos de producción y rentabilidad del FVH de cebada en función de densidades de siembra y periodos de crecimiento.

Densidad (kg/m²)	Periodo (días)	Costo de semilla (S/.)	Costo total (S/.)	Rendimiento FVH (kg/m²)	Costo/kg FVH (S/.)	Beneficio estimado (S/.)	Margen neto (S/.)	Relación B/C
1,5	12	3,00	5,50	7,20	0,76	10,80	5,30	1,96
1,5	14	3,00	5,80	7,85	0,74	11,78	5,98	2,03
1,5	16	3,00	6,00	8,05	0,75	12,07	6,07	2,01
2,0	12	4,00	6,30	8,55	0,74	12,83	6,53	2,04
2,0	14	4,00	6,50	9,20	0,71	13,80	7,30	2,12
2,0	16	4,00	6,80	9,60	0,71	14,40	7,60	2,12
2,5	12	5,00	7,50	9,00	0,83	13,50	6,00	1,80
2,5	14	5,00	7,80	9,50	0,82	14,25	6,45	1,83
2,5	16	5,00	8,00	9,80	0,82	14,70	6,70	1,84

Fuente: Elaboración propia.

Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas (Tukey, $p < 0,05$).

Comparativamente, los valores obtenidos se alinean con estudios realizados en zonas altoandinas. Castro et al. (2021) reportaron relaciones B/C de 1,8 a 2,2 para la producción de FVH en condiciones de altitud, valores semejantes a los de este estudio, lo que confirma la aplicabilidad de esta tecnología en sistemas con limitaciones edafoclimáticas. El uso del fitotoldo con riego tecnificado fue clave, pues redujo la variabilidad climática, optimizó el uso de agua y permitió un crecimiento uniforme del forraje, aspectos que explican la estabilidad de los indicadores económicos.

En términos de aplicación práctica, el FVH de cebada representa una alternativa sostenible para la alimentación de cuyes, ovinos y bovinos lecheros en Cusco, donde los sistemas ganaderos suelen enfrentar limitaciones de tierra y estacionalidad de pasturas. El hecho de que la densidad de 2,0 kg/m² sea altamente rentable la convierte en una opción estratégica para productores familiares y semi-intensivos, pues les permite:

- Reducir la dependencia de insumos externos, como concentrados comerciales, cuyo costo ha aumentado en los últimos años.
- Diversificar fuentes de alimento para el ganado, disminuyendo riesgos asociados a la variabilidad climática y a la estacionalidad de pastos naturales.
- Incrementar la seguridad alimentaria y económica, al disponer de un recurso forrajero estable y rentable que aporta tanto a la nutrición animal como a la sostenibilidad de la unidad productiva.

Finalmente, considerando que el alimento representa hasta un 70 % del costo total de la producción pecuaria (FAO, 2018), la inclusión del FVH de cebada en sistemas familiares y semi-intensivos no solo es económicamente viable, sino que constituye un aporte estratégico al desarrollo rural sostenible en la región andina.

VIII.CONCLUSIONES

- La evaluación de tres densidades de siembra (1,5; 2,0 y 2,5 kg/m²) y tres periodos de crecimiento (12, 14 y 16 días) demostró que tanto la densidad como la duración del ciclo afectan significativamente la producción del forraje verde hidropónico FVH de cebada. Los mayores rendimientos de peso fresco, peso seco y altura de las plantas se obtuvieron con las densidades más altas y los periodos de crecimiento más largos.
- El análisis de la interacción entre densidad de siembra y periodo de crecimiento evidenció que el T1 con 1,5 kg/m² a 12 días optimizó la eficiencia de conversión semilla-biomasa, alcanzando la mayor relación de rendimiento por kilogramo de semilla utilizada, lo que refleja un uso más eficiente de los recursos. Por el contrario, la menor eficiencia correspondió al T9 con 2,5 kg/m² a 16 días, evidenciando una reducción progresiva de la conversión cuando se incrementa la densidad y se prolonga el periodo de crecimiento.
- La determinación de la composición nutricional del FVH de cebada reveló valores de proteína cruda entre 12 a 15 %, fibra bruta entre 10 a 12 %, extracto etéreo de 2 a 3 % y extracto libre de nitrógeno entre 55 a 60 %, lo que indica que el FVH constituye un recurso con adecuada calidad nutricional para la alimentación animal. La composición bromatológica fue influenciada por la densidad de siembra y el periodo de crecimiento. Los tratamientos con densidad y periodo intermedios representaron un

equilibrio óptimo entre rendimiento y calidad nutricional, mientras que densidades altas y ciclos más largos incrementan la biomasa, pero reducen la calidad nutritiva.

- El análisis económico parcial mostró que el tratamiento con 2,0 kg/m² con 14 y 16 días de crecimiento fue el más rentable, al alcanzar una relación beneficio/costo superior a 2,0. Esto confirma que, además de ser productivamente eficiente, el sistema resulta económicamente viable y representa una alternativa sostenible para mejorar la disponibilidad de forraje en unidades de producción pecuaria de pequeña y mediana escala en la región Cusco.

IX.RECOMENDACIONES

- Se recomienda utilizar una densidad de siembra de 2,0 kg/m² y un periodo de crecimiento de 14 a 16 días para la producción de FVH de cebada, dado que estos parámetros maximizan los rendimientos en peso fresco, peso seco, contenido de materia seca y altura del forraje.
- En virtud de la calidad nutricional obtenida, se recomienda el uso del FVH de cebada en dietas de cuyes, ovinos y bovinos jóvenes, como complemento proteico-energético, especialmente en periodos de estacionalidad forrajera en zonas altoandinas.
- Se recomienda incorporar en futuros estudios en el diseño metodológico la cuantificación del rendimiento por fracción botánica del FVH de cebada, diferenciando al menos parte aérea (hojas + tallos) y base radicular (raíces + semilla remanente), debido a que la densidad de siembra y la edad de cosecha modifican la asignación de biomasa entre estas fracciones.
- Se recomienda realizar estudios comparativos orientados a evaluar la diferencia calórica del FVH de cebada frente a la semilla de cebada, con el fin de determinar su aporte energético real y su efecto en la alimentación animal bajo condiciones de producción en fitotoldo.
- Se sugiere desarrollar investigaciones destinadas a determinar el contenido de carotenoides del FVH de cebada, considerando su importancia nutricional y su potencial como fuente de compuestos bioactivos, así como su posible influencia en la calidad del alimento suministrado a los animales.

X.GLOSARIO

Altura del forraje. Longitud vertical de las plantas desde la base hasta el ápice del follaje.

Beneficio costo (B/C). Indicador económico que expresa la relación entre los beneficios obtenidos y los costos incurridos en un sistema productivo; valores mayores a uno indican viabilidad económica.

Biomasa. Cantidad de materia orgánica producida por el cultivo como resultado del crecimiento vegetal, expresada en peso fresco o peso seco.

Biomasa aérea. Fracción de la biomasa vegetal conformada principalmente por hojas y tallos.

Biomasa total. En el FVH, es la cantidad total de materia orgánica del forraje producida por el cultivo, que comprende hojas, tallos, raíces y semillas.

Densidad de siembra. Cantidad de semilla utilizada por unidad experimental.

Eficiencia de conversión de semilla (EC). Indicador productivo que expresa la relación entre la cantidad de biomasa obtenida y la cantidad de semilla utilizada, permitiendo evaluar la eficiencia con la que la semilla se transforma en biomasa.

Extracto etéreo (EE). Fracción del análisis proximal que corresponde al contenido de grasas y lípidos del forraje, constituida por compuestos solubles en solventes orgánicos.

Extracto libre de nitrógeno (ELN). Fracción del análisis proximal que representa los carbohidratos solubles del alimento, calculada por diferencia a partir de los demás componentes nutricionales.

Fibra bruta (FB). Fracción del alimento compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, que influye en la digestibilidad y el valor nutritivo del forraje.

Forraje verde hidropónico (FVH). Sistema de producción de forraje basado en la germinación y crecimiento inicial de semillas sin uso de suelo.

Periodo de crecimiento. Intervalo de tiempo comprendido entre la siembra y la cosecha del forraje, expresado en días.

Peso fresco. Masa total del forraje recién cosechado, incluyendo su contenido de agua.

Peso seco. Masa del forraje después de eliminar la humedad mediante secado, utilizada para estimar la producción real de materia orgánica.

Proteína cruda (PC). Contenido total de nitrógeno del forraje multiplicado por un factor de conversión, utilizado como indicador del valor nutricional.

Servicio Nacional de Sanidad Agraria (SENASA). Organismo técnico del Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, responsable de normar, supervisar y ejecutar las acciones relacionadas con la sanidad agraria en el Perú, incluyendo la certificación oficial de semillas.

Valor cultural (VC). Indicador de calidad que expresa el porcentaje real de semillas capaces de producir plántulas normales. Este parámetro integra dos componentes fundamentales: el poder germinativo y la pureza física de la semilla.

XI.BIBLIOGRAFÍA

- AOAC. (2019). *Official methods of analysis of AOAC International* (21st ed.). Association of Official Analytical Chemists.
- Akinola, O. A., Akinsoyinu, A. O., & Ogunwole, O. A. (2019). *Effect of feeding hydroponic barley fodder on intake, digestibility and performance of small ruminants*. Small Ruminant Research, 175, 1–7.
<https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2019.03.006>
- Ayala Vilca, M. A. (2020). *Producción de forraje verde hidropónico de cebada (Hordeum vulgare) en tres densidades de siembra y su efecto en el rendimiento y composición química* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Juliaca].
- Bedoya, G. F. (2019). *Manual de producción de forraje verde hidropónico* (2.^a ed.). Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Castro, R., Mamani, P., & Quispe, W. (2021). *Producción y calidad nutricional del forraje verde hidropónico de cebada en Puno*. Revista de Investigaciones Altoandinas, 23(2), 55–63.
- Castro Cáceres, D. L. (2021). *Producción tecnificada de forraje verde hidropónico de tres variedades de cebada (Hordeum vulgare L.)* [Tesis]. CONCYTEC.
- Castro, J., Villanueva, M., & Ccahuana, J. (2021). *Evaluación del rendimiento y calidad nutricional del forraje verde hidropónico de cebada en condiciones altoandinas*. Revista de Investigaciones Altoandinas, 23(3), 211–220.
<https://doi.org/10.18271/ria.2021.250>
- Castro, M. A., & Pérez, L. R. (2022). *Evaluación bromatológica del forraje verde hidropónico de trigo y cebada en condiciones de fitotoldo*. Revista de Investigación Agropecuaria, 11(2), 101–110.

- Congreso de la República del Perú. (2000). *Ley General de Semillas. Ley N.º 27262*. Diario Oficial El Peruano.
- Curasma Ccente, J., Contreras Paco, J. L., Huamán Jurado, R., & Ochoa Antezana, J. L. (2021). *Sustratos y tiempos de cosecha en el rendimiento del forraje verde hidropónico de la cebada*. Revista de Investigación Científica Siglo XXI, 1(2), 63–71. <https://doi.org/10.54943/rcsxxi.v1i1.171>
- Escobar, F., Rodríguez, M., & Salinas, P. (2020). *Dinámica de la materia seca en forrajes*. Revista Agroindustrial.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2018). *Producción de forraje verde hidropónico: Manual técnico para pequeños productores*. FAO.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2019). *Manual de producción de forraje verde hidropónico*. FAO.
- Fernández, J. (2020). *Evaluación de sistemas de riego tecnificado en fitotoldos altoandinos*. Revista de Tecnología Agraria, 8(1), 77–85.
- Fernández, L. (2020). *Evaluación del rendimiento y valor nutritivo del forraje verde hidropónico de cebada*. Repositorio UNA Puno.
- Fernández, L. (2020). *Producción de forraje verde hidropónico en ambientes controlados de altura*. Revista de Ciencias Agropecuarias del Perú, 41(2), 55–63.
- Flores Peña, A. C., & Ochoa Yana, W. A. (2017). *Efecto de densidades de siembra en FVH de avena*. Revista de Investigaciones Altoandinas, 19(2), 145–152.
- Flores Gutiérrez, D., & Chilón Camacho, J. (2019). *Aplicación de abono orgánico líquido aeróbico en la producción de forraje verde hidropónico en dos variedades de cebada en el Centro Experimental de Cota Cota*. Revista Apthapi.
- Google. (2025). *Google Earth* (versión web). <https://earth.google.com/>

- Gutiérrez Vásquez, C., & Gamarra Rosales, J. (2020). *Parámetros productivos y bromatológicos del FVH de avena en altura*. *Revista Científica Agropecuaria*, 10(2), 203–210.
- Gutiérrez, J., & Gamarra, E. (2020). *Evaluación de densidades de siembra en la producción de forraje verde hidropónico de cereales*. *Revista de Investigación Agraria*, 4(1), 33–41.
- Huamán Jurado, J., Curasma Ccente, E., Gamarra Becerra, D., & Cuba Sánchez, E. (2021). *Efecto de sustratos y tiempos de cosecha en los rendimientos del FVH de cebada*. Investigación Valdizana.
- Instituto Nacional de Innovación Agraria. (2019). *Producción de forraje verde hidropónico: Manual técnico*. INIA.
- Lozano Romero, W. (2023). *Producción de forraje verde hidropónico de trigo, cebada y avena bajo invernadero* [Tesis de grado, Universidad Nacional de Cajamarca].
- Ministerio de Agricultura y Riego. (2018). *Reglamento de semillas del Perú*. MINAGRI.
- Nina, J. (2021). *Producción de forraje verde hidropónico de cebada con diferentes densidades de siembra* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano].
- Ortega, D. A. (2019). *Producción de forraje verde hidropónico en sistemas intensivos de alimentación* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Cajamarca].
- Quispe, R. E. (2024). *Evaluación económica y productiva de un núcleo nutrimental en cuyes (Cavia porcellus L.) en las etapas de crecimiento y acabado*. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.
- Ramírez, F., & Medina, J. (2020). *Evaluación de la calidad nutricional de forrajes hidropónicos en sistemas de riego tecnificado*. *Revista de Producción Animal y Recursos Naturales*, 15(2), 77–85. <https://doi.org/10.15381/rprn.v15i2.18452>

- Rojas, J., Paredes, L., & Salazar, M. (2019). *Análisis bromatológico del FVH de cebada en condiciones controladas*. Revista Agropecuaria Peruana, 12(2), 44–52.
- Sánchez, M., & Rojas, D. (2022). *Eficiencia de conversión de semilla a biomasa en forraje verde hidropónico de cereales*. Revista Latinoamericana de Producción Animal, 30(1), 13–22. <https://doi.org/10.22370/rlpa.2022.30.1.2224>
- Segura Ortega, B. (2024). *Evaluación de la producción de forraje verde hidropónico asociado de cebada (Hordeum vulgare) y vicia (Vicia sativa) en condiciones de fitotoldo y riego tecnificado* [Tesis de grado, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. Repositorio UNSAAC.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2023). *Boletín mensual de vigilancia climática*. SENAMHI.
- Villavicencio, G., Morales, C., & Guamán, R. (2020). *Rentabilidad del forraje verde hidropónico en la región sierra del Ecuador*. Revista Latinoamericana de Agroindustria, 15(3), 211–219. Wiley Online Library.

XII.ANEXOS

FIGURA 3. Fitotoldo de investigación FVH



Fuente: fotografía propia

FIGURA 4. Instalación del Módulo de producción de FVH



Fuente: fotografía propia

FIGURA 5. Sistema de riego tecnificado, motobomba.



Fuente: fotografía propia

FIGURA 6. Equipo de Luxómetro utilizado en la investigación.



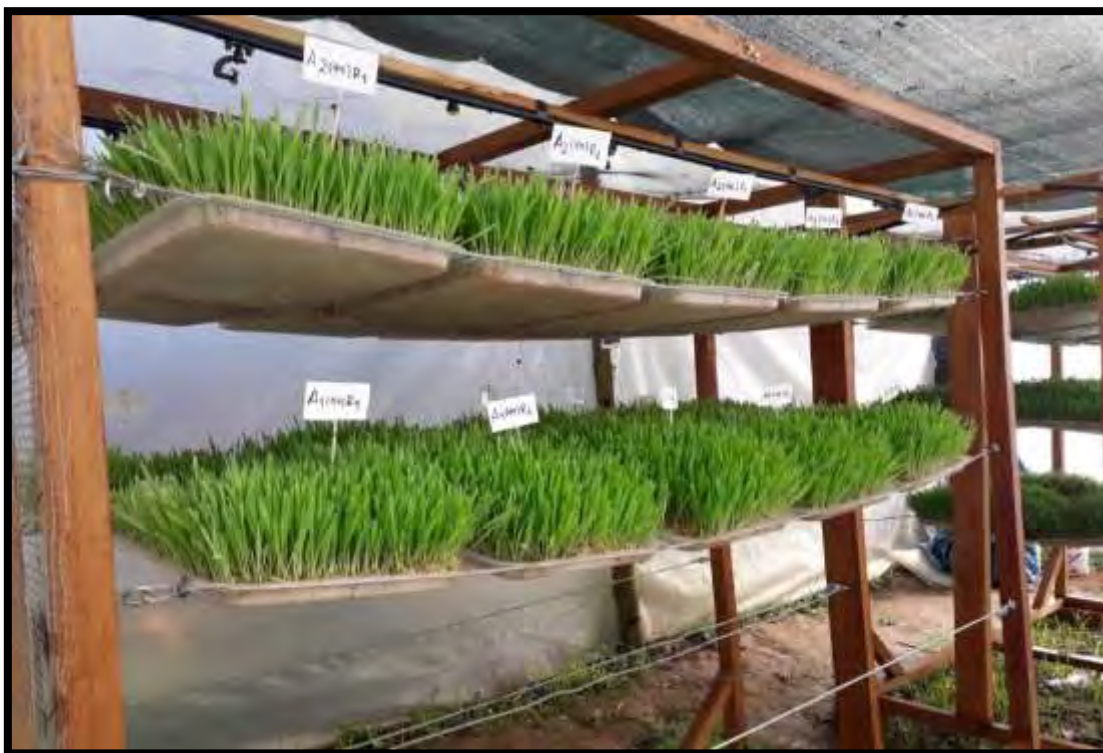
Fuente: fotografía propia

FIGURA 7. Siembra y disposición en bandejas.



Fuente: fotografía propia

FIGURA 8. FVH en el periodo de crecimiento de 12 días.



Fuente: fotografía propia

FIGURA 9. Cosecha de FVH en el periodo de crecimiento de 16 días.



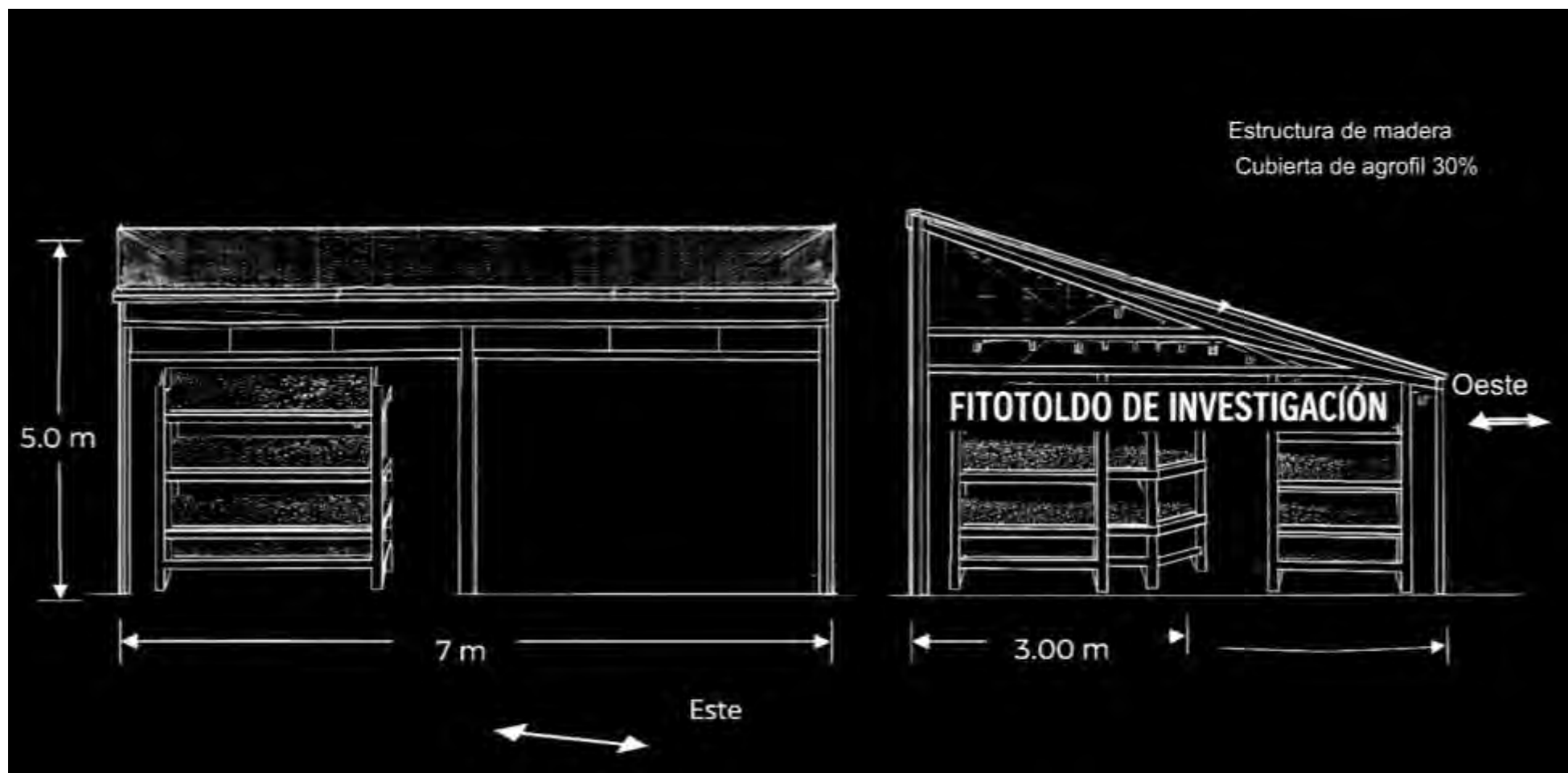
Fuente: fotografía propia

FIGURA 10. Toma de muestras de FVH para evaluación.



Fuente: fotografía propia

FIGURA 11. Diseño estructural del fitotoldo de FVH vista lateral y frontal con especificaciones y orientación.



Fuente: elaboración propia