

**UNIVERSIDAD PÚBLICA DE EL ALTO
ÁREA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS, PECUARIAS
Y RECURSOS NATURALES
CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA**



TESIS DE GRADO

**EVALUACIÓN DE CUATRO PERIODOS DE COSECHA EN
FORRAJE VERDE HIDROPÓNICO DE CEBADA (*Hordeum vulgare*
L.), EN EL CENTRO EXPERIMENTAL DE KALLUTACA**

Por:

Damilia Quispe Poma

EL ALTO – BOLIVIA

Agosto, 2025

**UNIVERSIDAD PÚBLICA DE EL ALTO
ÁREA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS, PECUARIAS
Y RECURSOS NATURALES
CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA**

**EVALUACIÓN DE CUATRO PERIODOS DE COSECHA EN FORRAJE VERDE
HIDROPÓNICO DE CEBADA (*Hordeum vulgare* L.), EN EL CENTRO EXPERIMENTAL
DE KALLUTACA**

*Tesis de Grado presentado
como requisito para optar el Título de
Ingeniera Agrónoma*

Damilia Quispe Poma

Asesor:

M. Sc.Lic. Ing. Ramiro Raul Ochoa Torrez

Tribunal Revisor:

Lic. Ing. Paulino Bruno Condori Ali

M. Sc. Lic. Ing. Victor Paye Huaranca

M. Sc. Lic. Ing. Ciro Raúl Quiape Callocosi

Aprobada

Presidente Tribunal Examinador



DEDICATORIA:

A DIOS, por su inmenso amor, por ser la luz que guía mi camino y por concederme la sabiduría.

A mis ABUELOS, Justino Quispe Laura (+), Jesusa Tarqui (+) quienes desde el cielo iluminan mi sendero fortaleciendo mi espíritu, y María Romero quien siempre ha confiado para este logro.

A MIS PADRES y HERMANOS por brindarme su amor incondicional, consejos y apoyo constante, fueron pilares fundamentales para superarme cada día.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar agradecimientos profundos, a Dios por brindarme salud, fortaleza, sabiduría y por acompañarme con su luz a lo largo de este proceso formativo.

Agradezco a las siguientes instituciones y personas que hicieron posible la culminación de esta etapa:

A la Carrera de Ingeniería Agronómica de la Universidad Pública de El Alto, por acogernos en sus ambientes y por el compromiso del personal docente, cuya dedicación fue fundamental en mi formación profesional.

Al M.Sc. Lic. Ing. Ramiro Raúl Ochoa Torrez, por su constante asesoramiento y por las valiosas y acertadas sugerencias que enriquecieron el desarrollo del presente trabajo de investigación.

A mis revisores, Lic. Ing. Paulino Bruno Condori Ali, M.Sc. Lic. Ing. Víctor Paye Huaranca y M.Sc. Lic. Ing. Ciro Raúl Quiape Callocosi, por su orientación, colaboración en la revisión de este documento y por los consejos brindados, los cuales fueron de gran importancia para su mejora.

Agradezco profundamente a mis padres, Jaime Quispe y Constanza Poma, así como a mis hermanos y demás familiares, quienes me brindaron su apoyo incondicional a lo largo de este proceso, acompañándome con amor, paciencia y fortaleza hasta culminar mi carrera profesional.

Finalmente, agradezco a mis compañeros y amigos Félix, Clara, Omar, Banesa, Leonarda, Verónica, Rocío, Karen y Lourdes, quienes me acompañaron con su apoyo y motivación en las distintas etapas de esta investigación, compartiendo conmigo este camino de aprendizajes y crecimiento.

CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE ANEXOS.....	x
ABREVIATURAS	xi
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii

ÍNDICE DE TEMAS

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes	2
1.2. Planteamiento del problema.....	2
1.3. Justificación.....	3
1.4. Objetivos	3
1.4.1. Objetivo general.....	3
1.4.2. Objetivos específicos.....	3
1.5. Hipótesis	4
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. Cebada.....	5
2.1.1. Clasificación taxonómica de la cebada.....	5
2.2. Hidroponía.....	5
2.2.1. Forraje verde hidropónico (FVH).....	6
2.2.2. Forraje verde hidropónico de cebada.....	6
2.3. Ventajas y Desventajas del FVH.....	7
2.3.1. Ventajas	7
2.3.2. Desventajas	8
2.4. Factores determinantes en la producción de FVH.....	8

2.4.1.	Iluminación	8
2.4.2.	Temperatura	9
2.4.3.	Humedad.....	9
2.5.	Componentes básicos para la producción de FVH.....	9
2.5.1.	Semilla	9
2.5.2.	Desinfectante	10
2.5.3.	Recinto	10
2.5.3.1.	Las instalaciones populares	10
2.5.3.2.	Las estructuras en desuso	10
2.5.3.3.	Las estructuras modernas o de alta tecnología.....	11
2.5.3.4.	Invernadero de dos aguas.....	11
2.5.3.5.	Invernadero de túnel.....	11
2.5.3.6.	Invernadero de media agua	11
2.5.4.	Estanterías.....	12
2.5.5.	Bandejas de cultivo.....	12
2.5.6.	Sistema de riego	13
2.6.	Producción de FVH.....	14
2.6.1.	Selección de las especies de granos	14
2.6.2.	Selección de la semilla	14
2.6.3.	Lavado y desinfección de la semilla	14
2.6.4.	Pregerminado de las semillas	15
2.6.5.	Siembra y densidad	16
2.6.6.	Germinación.....	16
2.6.7.	Riegos	17
2.6.8.	Valor nutritivo de la cebada	17
2.6.9.	Rendimiento de cebada en campo.....	18

2.6.10.	Rendimiento de cebada bajo sistema hidropónico	18
2.6.11.	Cosecha	19
2.7.	Ventajas nutricionales del FVH	19
2.7.1.	Alimentación a vacas lecheras con FVH.....	19
2.7.2.	Alimentación de toretes	20
2.7.3.	Alimentación de ovinos.....	20
2.7.4.	Alimentación de conejos.....	20
2.7.5.	Alimentación de gallinas	20
2.8.	Factores que influyen en el periodo de cosecha	21
2.8.1.	Altura de la planta	21
2.8.2.	Porcentaje de materia seca.....	21
2.8.3.	Condiciones ambientales	21
2.9.	Importancia de conocer el tiempo de cosecha.....	21
2.9.1.	Calidad nutricional	21
2.9.2.	Eficiencia en la producción	22
2.9.3.	Reducción de costos	22
2.9.4.	Manejo de recursos hídricos	22
2.10.	Los grados Brix (°Bx).....	22
2.10.1.	Utilidad de medir los grados Brix.....	23
2.10.2.	Metodología para determinar °Bx en forrajes	23
2.10.2.1.	Materiales y equipos para determinar °Bx	24
3.	MATERIALES Y MÉTODOS	24
3.1.	Localización	24
3.2.	Materiales.....	25
3.2.1.	Material biológico	25
3.2.2.	Material de escritorio	25

3.2.3.	Materiales de campo y equipos de medición	25
3.3.	Metodología	26
3.3.1.	Desarrollo de la investigación.....	26
3.3.1.1.	Adaptación del módulo hidropónico y ambiente de la investigación	26
3.3.1.2.	Construcción del estante para FVH	26
3.3.1.3.	Instalación del sistema de riego automatizado	27
3.3.1.3.1.	Armado del sistema.....	27
3.3.1.3.2.	Equipo de bombeo	27
3.3.1.3.3.	Nebulizadores para riego	28
3.3.1.4.	Recolección del material biológico.....	28
3.3.1.5.	Adquisición y acondicionamiento de bandejas	28
3.3.1.6.	Remojado de las semillas	28
3.3.1.7.	Desinfección, lavado y oreado de las semillas	28
3.3.1.8.	Desinfección de bandejas y siembra	29
3.3.1.9.	Área oscura y clara.....	29
3.3.1.10.	Riego de las bandejas	29
3.3.1.11.	Cosecha.....	29
3.3.2.	Diseño experimental	30
3.3.3.	Factor de estudio	30
3.3.4.	Variables de respuesta	31
3.3.4.1.	Porcentaje de germinación.....	31
3.3.4.2.	Altura de la planta.....	31
3.3.4.3.	Longitud de la raíz	32
3.3.4.4.	Grosor del tallo	32
3.3.4.5.	Rendimiento de FVH	32
3.3.4.6.	Rendimiento de FVH en materia seca	32

3.3.4.7.	Medición de grados brix (°Brix) en la savia de FVH	32
3.3.5.	Análisis económico	33
3.3.5.1.	Ingreso bruto.....	33
3.3.5.2.	Beneficio Costo.....	33
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	35
4.1.	Variables de estudio	35
4.1.1.	Variación de la temperatura	35
4.1.2.	Variación de la humedad relativa	36
4.2.	Variables de respuesta	37
4.2.1.	Porcentaje de germinación.....	37
4.2.2.	Altura de las plantas	39
4.2.3.	Longitud de la raíz	41
4.2.4.	Grosor del tallo.....	43
4.2.5.	Rendimiento de FVH	44
4.2.6.	Rendimiento de FVH en materia seca	46
4.2.7.	Medición de grados Brix (°Bx).....	47
4.2.7.1.	°Bx de la hoja.....	48
4.2.7.2.	°Bx del tallo.....	49
4.2.7.3.	°Bx de la semilla	50
4.2.7.4.	°Bx de la raíz	51
4.2.8.	Análisis económico	52
4.2.8.1.	Costos fijos	53
4.2.8.2.	Costos variables	53
4.2.8.3.	Relación de B/C.....	53
5.	CONCLUSIONES	55
6.	RECOMENDACIONES.....	57

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	58
8. ANEXOS	65

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.	Clasificación taxonómica de la cebada	5
Cuadro 2.	Comparación entre las características del FVH (cebada) y otras fuentes alimenticias.	18
Cuadro 3.	Descripción de la bomba de agua para presión	27
Cuadro 4.	Descripción de los tratamientos y la superficie experimental.	31
Cuadro 5.	Análisis de varianza del porcentaje de germinación.....	38
Cuadro 6.	Porcentaje de germinación de FVH en promedio	38
Cuadro 7.	Análisis de varianza para la altura de las plantas.....	39
Cuadro 8.	Prueba de Duncan para la altura de las plantas.....	40
Cuadro 9.	Análisis de varianza de la longitud promedio de raíz	41
Cuadro 10.	Prueba de Duncan para longitud de la raíz.....	42
Cuadro 11.	Análisis de varianza del grosor del tallo	43
Cuadro 12.	Grosor del tallo del FVH en promedio	43
Cuadro 13.	Análisis de varianza del rendimiento del FVH.....	44
Cuadro 14.	Rendimiento de FVH en promedio	44
Cuadro 15.	Análisis de varianza del rendimiento de FVH en materia seca	46
Cuadro 16.	Prueba de Duncan para el rendimiento de FVH en materia seca en kg/m ²	46
Cuadro 17.	Análisis de varianza de °Bx de la hoja	48
Cuadro 18.	Prueba de Duncan para el °Bx de la hoja	48
Cuadro 19.	Análisis de varianza de °Bx del tallo	49
Cuadro 20.	Prueba de Duncan para el °Bx del tallo	50
Cuadro 21.	Análisis de varianza de °Bx de la semilla.....	50
Cuadro 22.	Prueba de Duncan para el °Bx de la semilla	51
Cuadro 23.	Análisis de varianza de °Bx de la raíz	52
Cuadro 24.	Prueba de Duncan para el °Bx de la raíz.....	52

Cuadro 25.	Relación de beneficio costo.....	53
------------	----------------------------------	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Localización de la investigación Google-Earth (2025).....	24
Figura 2.	Temperaturas (°C) registradas durante el desarrollo del FVH.	36
Figura 3.	Humedad relativa (%) registradas durante el desarrollo del FVH.	37

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1.	Módulo hidropónico y ambiente de la investigación	65
Anexo 2.	Estante para el FVH.....	65
Anexo 3.	Instalación de riego automatizado.....	65
Anexo 4.	Instalación del sistema automatizado	66
Anexo 5.	Semilla de cebada	66
Anexo 6.	Acondicionamiento de bandejas.....	66
Anexo 7.	Remojo de las semillas	67
Anexo 8.	Desinfección y lavado de las semillas.....	67
Anexo 9.	Oreado	67
Anexo 10.	Desinfección de bandejas	68
Anexo 11.	Siembra.....	68
Anexo 12.	Coberturas del estante para la germinación	69
Anexo 13.	Germinación de cebada.....	69
Anexo 14.	Cosecha de forraje verde hidropónico	69
Anexo 15.	Medición de grados brix (°Bx)	70
Anexo 16.	Mufla a una temperatura de 60 °C	70
Anexo 17.	Peso de materia seca	70
Anexo 18.	Evaluación del FVH	71
Anexo 19.	Producción de FVH.....	71
Anexo 20.	Análisis económico	72
Anexo 21.	Costos fijos de producción para cada tratamiento.....	72
Anexo 22.	Costos variables de producción para cada tratamiento.....	72

ABREVIATURAS

FVH	Forraje verde hidropónico
UPEA	Universidad Pública de El Alto
°Brix	Grados Brix
CO ₂	Dióxido de carbono
ppm	Partes por millón
m ²	Metros cuadrados
kg	Kilogramos
Q	Rango de caudal
Hmax	Altura máxima
DBCA	Diseño de bloques completamente al azar
mm	Milímetros
MS	Materia seca
CV	Coefficiente de variación
%	Porcentaje
cm	Centímetros
t	Toneladas
ha	Hectárea
Bs	Bolivianos

RESUMEN

En Bolivia la producción ganadera del altiplano se ha visto afectada por el cambio climático y la época de invierno, es cuando se presenta como una alternativa viable la producción de FVH. Bajo este contexto, el presente trabajo de investigación tuvo como objetivo evaluar cuatro periodos de cosecha en forraje verde hidropónico de cebada (*Hordeum vulgare* L.), en predios del Centro Experimental de Kallutaca, de la Universidad Pública de El Alto (UPEA). Para esta investigación se ha instalado un riego automatizado con nebulizadores en estante de producción. Los tratamientos fueron diferentes periodos de cosecha como: T1 (10 días), T2 (15 días) y T3 (20 días) y T4 (25 días) distribuidos los mismos en un diseño bloques completamente al azar. Las variables evaluadas fueron: variables agronómicas, rendimiento, grados Brix (°Brix) y relación Beneficio Costo. Los principales resultados alcanzados indican que, en cuanto porcentaje de germinación, evidenció un promedio del 95.5%, para altura de la planta el tratamiento T4 obtuvo mayor valor con un promedio 27.54 cm., mientras la longitud de la raíz, la mayor radicular presentó a los 25 y 20 días con promedios 12.87 y 12.21 cm., finalmente el grosor del tallo con mayor promedio se observó a los 25 días con 2.14 mm. Correspondientemente, los rendimientos de materia verde a los 25 días se alcanza el mayor peso con 25.25 kg/m², en materia seca, el rendimiento mayor se obtiene 3.55 kg/m² a los 20 días. En cuanto los grados brix, a los 10 días de cosecha se concentra 4.51 °Brix en la hoja, mientras en el tallo es 3.77 °Brix a los 10 días, en la semilla se concentra 2.79 °Brix a los 10 días y 1.82 °Brix en la raíz en 10 días. Finalmente, se tiene mayor relación Beneficio/costo a los 15 días de cosecha en el cual se obtiene un B/C de 1.51 Bs, superando a los demás periodos de cosecha. Por lo cual, se puede recomendar tomar en cuenta la cosecha del FVH de cebada a los 15 días, debido a que en este periodo contiene mayor contenido de solidos solubles totales, rendimiento 24.25 kg/m² y un beneficio costo de 1.51 bs.

ABSTRACT

In Bolivia, livestock production in the altiplano has been affected by climate change and the winter season, which is when the production of HVF becomes a viable alternative. In this context, the objective of this research work was to evaluate four harvesting periods in hydroponic green forage of barley (*Hordeum vulgare* L.), in farms of the Experimental Center of Kallutaca, of the Universidad Pública de El Alto (UPEA). For this research, an automated irrigation system with nebulizers was installed in the production rack. The treatments were different harvest periods: T1 (10 days), T2 (15 days), T3 (20 days) and T4 (25 days), distributed in a completely randomized block design. The variables evaluated were: agronomic variables, yield, Brix degrees (°Brix) and benefit-cost ratio. The main results obtained indicate that the germination percentage showed an average of 95.5%, for plant height the T4 treatment obtained the highest value with an average of 27.54 cm, while for root length, the highest root length was obtained at 25 and 20 days with averages of 12.87 and 12.21 cm, and finally the stem thickness with the highest average was observed at 25 days with 2.14 mm. Correspondingly, green matter yields at 25 days reached the highest weight with 25.25 kg/m², in dry matter, the highest yield was 3.55 kg/m² at 20 days. As for brix degrees, at 10 days after harvest, 4.51 °Brix is concentrated in the leaf, while in the stem it is 3.77 °Brix at 10 days, in the seed it is 2.79 °Brix at 10 days and 1.82 °Brix in the root at 10 days. Finally, there is a higher profit/cost ratio at 15 days of harvest, in which a B/C of 1.51 Bs is obtained, surpassing the other harvest periods. Therefore, it can be recommended to take into account the harvest of barley FVH at 15 days, because in this period it has a higher content of total soluble solids, yield 24.25 kg/m² and a benefit/cost of 1.51 bs.

1. INTRODUCCIÓN

Los periodos de sequías, caracterizadas por escasa o nula precipitación y temperaturas variables, influyen negativamente en el desarrollo de las plantas. Este fenómeno limita el crecimiento y el desarrollo vegetativo de las plantas, razón por la cual existe escasez de pastos naturales y cultivados, afectando así la alimentación animal (Castrejón *et al.*, 2023).

El forraje verde es esencial en la alimentación de los animales, influyendo significativamente en la producción, reproducción y salud. Sin embargo, el crecimiento de la urbanización y la expansión de las industrias han reducido las áreas disponibles para pastizales, lo que complica el acceso al alimento verde necesario para los animales (Arif *et al.*, 2023).

El forraje verde hidropónico (FVH) es una tecnología de producción de biomasa vegetal considerado una técnica agrícola innovadora. Se ha observado que el consumo de agua en este método es entre un 90 y 95% menor en comparación con los métodos agrícolas tradicionales. Además, la utilización de pesticidas, fungicidas, insecticidas y promotores de crecimiento artificial se reduce significativamente o incluso se elimina por completo. La producción de alimento hidropónico requiere solo alrededor del 2-3% del agua utilizada en el campo para producir la misma cantidad de alimento (Khaziev *et al.*, 2021).

El forraje verde hidropónico es el resultado del proceso de germinación de granos como cebada, avena, maíz, trigo y sorgo, para posterior crecimiento bajo condiciones ambientales controladas (luz, temperatura y humedad) en ausencia del suelo Ledo (2008). A nivel mundial, el FVH se ha planteado como una alternativa viable para la producción animal y el consumo humano, este sistema ofrece ventajas como la de poder cultivarse en áreas pequeñas y generar una producción continua durante todo el año (Bedolla-Torres *et al.*, 2015).

La producción de forraje verde hidropónico, se puede realizar en estructuras como bandejas improvisadas, plásticos reciclados o planchas de acero, reduciendo costos y haciéndolo accesible para pequeños productores pecuarios. Además, el FVH proporciona un alimento fresco, altamente palatable y nutritivo, mejorando la dieta de los animales de granja y contribuyendo a una producción más eficiente y sostenible.

1.1. Antecedentes

Condori (2015), Realizó un estudio en la comunidad de Chuquiaguillo, zona Urujara, perteneciente a la provincia Murillo del departamento de La Paz, a una altitud de 4178 m.s.n.m., esta investigación consistió en la evaluación de tres periodos de cosecha en dos variedades de cebada (*Hordeum vulgare* L.) para la producción de forraje verde hidropónico.

El mismo menciona que en Bolivia, las recurrentes sequías provocadas por el cambio climático han generado escasez de forraje, afectando significativamente a la ganadería. El FVH de cebada (*Hordeum vulgare* L.) ha demostrado ser eficiente por su rápida germinación y su alto valor nutritivo, donde se evaluaron tres periodos de cosecha (15, 20 y 25 días) en dos variedades de cebada: Criolla (semilla no certificada) e IBTA-80 (semilla certificada). Se evidenció que la variedad IBTA-80 presentó mejores resultados en germinación y rendimiento, mientras que la variedad Criolla tuvo mayor altura y porcentaje de materia seca (MS). El mejor rendimiento económico se obtuvo con la variedad Criolla cosechada a los 20 días. Esta investigación demostró que el periodo de cosecha influye significativamente en la productividad y calidad del FVH.

1.2. Planteamiento del problema

En Bolivia la producción ganadera del altiplano está condicionada por la producción y disponibilidad de forraje, en los últimos años, algunas localidades se han visto afectadas por las sequías prolongadas, las cuales se han incrementado significativamente a consecuencia del cambio climático y la época de invierno. A este problema se suma la disponibilidad limitada de terrenos adecuados para la producción de forraje donde dificulta aún más el abastecimiento de alimento, lo que en muchos casos impide satisfacer adecuadamente los requerimientos nutricionales de los animales provocando una disminución en la producción pecuaria, además de generar retrasos en su desarrollo, reducción en la fertilidad y otros efectos negativos en su desempeño. Así también, en el Centro Experimental de Kallutaca existe poca información sobre la evaluación de los periodos de cosecha.

Por lo tanto, la producción de FVH de cebada, se presenta como una alternativa viable para espacios reducidos, con ciclos cortos de cultivo y menor consumo de agua. La eficiencia de este sistema depende en gran medida de los periodos de cosecha, los cuales influyen

directamente en el rendimiento y la calidad del FVH de cebada, esto resulta crucial para maximizar la producción durante las épocas secas, cuando la disponibilidad de alimento para los animales se reduce considerablemente, afectando la sostenibilidad de las unidades de producción pecuaria en el altiplano boliviano.

1.3. Justificación

La producción ganadera en el altiplano boliviano se ve afectada por la escasez de forrajes durante la época de invierno, lo que limita la disponibilidad de alimento fresco y de calidad para animales. El Forraje Verde Hidropónico (FVH) presenta una alternativa innovadora frente a los métodos tradicionales, ya que permite producir forraje en espacios reducidos, sin necesidad de suelo, con bajo consumo de agua y en periodos cortos de tiempo. El FVH continuará mejorando en la medida que aquellas que lo practican, expandan y mejoren su tecnología en la producción.

Esta investigación se orientó a evaluar la producción de FVH de cebada (*Hordeum vulgare* L.) en cuatro diferentes periodos de cosecha: 10, 15, 20 y 25 días. Para determinar cuál de estos periodos permite obtener el mayor rendimiento y calidad del forraje. El estudio es relevante porque proporcionará una base técnica y económica para recomendar el periodo de cosecha de FVH más adecuado, promoviendo así el uso de tecnologías innovadoras y eficientes en contextos con limitaciones de recursos hídricos y suelo para el sector pecuario.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

- Evaluar cuatro periodos de cosecha en forraje verde hidropónico de cebada (*Hordeum vulgare* L.), en el Centro Experimental de Kallutaca.

1.4.2. Objetivos específicos

- Evaluar las variables agronómicas de los cuatro periodos de cosecha en forraje verde hidropónico de cebada (*Hordeum vulgare* L.).
- Evaluar el efecto de los cuatro periodos de cosecha sobre el rendimiento de biomasa fresca y seca del FVH de cebada.
- Determinar los valores de grados Brix (°Bx) en los cuatro periodos de cosecha.

- Comparar la relación Beneficio Costo entre los tratamientos en la producción de FVH de cebada.

1.5. Hipótesis

H₀: Los cuatro periodos de cosecha en forraje verde hidropónico de cebada (*Hordeum vulgare* L.), en el Centro Experimental de Kallutaca, no presentan diferencias significativas.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Cebada

La cebada forrajera (*Hordeum vulgare* L.) es una variedad cultivada específicamente para su uso como forraje en la alimentación animal. Se caracteriza por su rápido crecimiento y alta producción de biomasa, lo que la convierte en una opción valiosa para los ganaderos, especialmente en climas fríos donde proporciona una fuente nutritiva de alimento durante los meses de invierno (Pinotti, 2020).

2.1.1. Clasificación taxonómica de la cebada

Rojas (1990) citado por Quispe (2013), menciona que la cebada se clasifica de la siguiente manera:

Cuadro 1. Clasificación taxonómica de la cebada

Familia	Poaceae
Género	Hordeum
Espécie	Vulgare
Nombre científico	<i>Hordeum vulgare</i> L.
Nombre común	Cebada

Fuente: Rojas (1990).

2.2. Hidroponía

La hidroponía es un sistema de cultivo de plantas alimenticias que prescinde del uso del suelo, el cual es un elemento fundamental en la agricultura tradicional. El término "hidroponía" proviene de las palabras griegas *hydro* (agua) y *ponos* (trabajo), lo que se traduce como "trabajo del agua". Este método se basa en el uso de soluciones de sales minerales que satisfacen los requerimientos nutricionales necesarios para el crecimiento, desarrollo y producción de una amplia variedad de plantas alimenticias de alta calidad. Permite también optimizar el uso de recursos hídricos y nutrientes, ofreciendo una alternativa sostenible en la producción agrícola, especialmente en áreas donde el suelo es

poco adecuado para el cultivo. Además, este sistema puede contribuir a aumentar la eficiencia en la producción de alimentos, al reducir el impacto ambiental asociado con la agricultura convencional (INTAGRI, 2017).

El mismo autor describe que los primeros trabajos formales relacionados con el sistema de producción hidropónica se iniciaron alrededor del año 1600. Sin embargo, el concepto de cultivar plantas sin suelo tiene raíces que se remontan a la antigua Babilonia, donde se construyeron los célebres Jardines Colgantes. Este jardín, considerado una de las Siete Maravillas del Mundo Antiguo, utilizaba un sistema de irrigación que transportaba agua desde el río Éufrates a través de canales, permitiendo el crecimiento de diversas especies vegetales.

2.2.1. Forraje verde hidropónico (FVH)

El FVH es una tecnología de producción de biomasa vegetal que se obtiene a partir del crecimiento inicial de las plantas en los estados de germinación y crecimiento temprano de plántulas, utilizando semillas viables. Este tipo de forraje se considera un alimento vivo, con alta digestibilidad y calidad nutricional, lo que lo hace muy adecuado para la alimentación animal. En la práctica, el FVH implica la germinación de granos, que pueden ser semillas de cereales o leguminosas, y su posterior crecimiento en condiciones ambientales controladas, como luz, temperatura y humedad, sin necesidad de suelo. Las semillas más comúnmente utilizadas incluyen avena, cebada, maíz, trigo y sorgo (Rojas, 2019).

2.2.2. Forraje verde hidropónico de cebada

Es un tipo de forraje que se cultiva utilizando un sistema hidropónico, donde las semillas de cebada (*Hordeum vulgare* L.) germinan en un medio acuoso, sin necesidad de suelo. Este método permite el crecimiento de las plantas en condiciones controladas de temperatura y humedad, lo que resulta en un forraje altamente nutritivo y digestible para el ganado. La producción se lleva a cabo en bandejas especiales y requiere un período de 7 a 14 días para que las semillas germinen y crezcan. Durante este tiempo, las plantas alcanzan una altura promedio de 25 cm. Este proceso no solo maximiza el uso del espacio, sino que también optimiza el consumo de agua, lo cual es crucial en regiones con limitaciones hídricas (Birgi *et al.*, 2018).

2.3. Ventajas y Desventajas del FVH

FAO (2001), indica que las ventajas y desventajas para el cultivo hidropónico es lo siguiente:

2.3.1. Ventajas

La producción de forraje verde hidropónico ha ganado relevancia en la agricultura moderna por sus múltiples beneficios. Este sistema innovador optimiza el uso de recursos y mejora la eficiencia del cultivo. A continuación, se detallan algunas de las principales ventajas.

- **Ahorro de agua:** En el sistema de producción de FVH las pérdidas de agua por evapotranspiración, escurrimiento superficial e infiltración son mínimas al comparar con las condiciones de producción convencional en especies forrajeras, cuyas eficiencias varían entre 270 a 635 litros de agua por kg de materia seca. Mientras, la producción de 1 kilo de FVH requiere de 2 a 3 litros de agua.
- **Eficiencia en el uso del espacio:** El sistema de producción de FVH puede ser instalado en forma modular en la dimensión vertical lo que optimiza el uso del espacio útil.
- **Eficiencia en el tiempo de producción:** La producción de FVH apto para alimentación animal tiene un ciclo de 10 a 12 días. En ciertos casos, por estrategia de manejo interno de los establecimientos, la cosecha se realiza a los 14 o 15 días.
- **Calidad del forraje para los animales:** El FVH es un succulento forraje verde de aproximadamente 20 a 30 cm de altura y de plena aptitud comestible para nuestros animales. En general el grano contiene una energía digestible algo superior (3.300 kcal/kg) que el FVH (3.200 kcal/kg).
- **Inocuidad:** El FVH producido, presenta un forraje limpio e inocuo sin la presencia de hongos e insectos. Nos asegura la ingesta de un alimento conocido por su valor alimenticio y su calidad sanitaria.
- **Mejor planificación y operatividad:** La hidroponía permite una organización más eficiente.
- **Ahorro en insumos:** Este tipo de cultivo reduce la necesidad de fertilizantes y disminuye la cantidad de tratamientos fitosanitarios requeridos, ya que presenta menos problemas relacionados con plagas y enfermedades.

2.3.2. Desventajas

Aunque la hidroponía ofrece múltiples beneficios, también presenta ciertos desafíos que deben considerarse al momento de su implementación. Estos aspectos pueden influir en la decisión de adopción del sistema y en su sostenibilidad a largo plazo. A continuación, se describen las principales desventajas.

- **Costo de instalación elevado:** una desventaja que presenta este sistema sería el elevado costo de implementación. Sin embargo, se ha demostrado que, utilizando estructuras de invernáculos hortícolas comunes, se logran excelentes resultados. Factores determinantes en la producción de FVH.
- **Desinformación y sobrevaloración de la tecnología:** La falta de conocimientos e información simple y directa, se transforma en desventaja, al igual que en el caso de la tecnología de hidroponía. Proyectos de FVH preconcebidos como “llave en mano” son vendidos a productores sin conocer exactamente las exigencias del sistema, la especie forrajera y sus variedades, su comportamiento productivo, requerimientos de agua, óptimas condiciones de luz, temperatura, humedad ambiente y niveles óptimos de concentración de CO₂. Innumerables de estos proyectos han sufrido significativos fracasos por no haberse accedido a una capacitación previa que permita un correcto manejo del sistema.

2.4. Factores determinantes en la producción de FVH

2.4.1. Iluminación

Es fundamental evitar la exposición a la luz durante la germinación de las semillas, al inicio del ciclo de producción de FVH. Por lo tanto, las bandejas deben mantenerse en un ambiente con luz tenue durante los primeros tres a cuatro días, asegurando un riego adecuado para favorecer la aparición de los brotes y el desarrollo de las raíces. Las semillas requieren oscuridad para germinar, y posteriormente necesitan una iluminación mínima que varía entre 1000 a 5000 lux. Existen dos métodos para proporcionar esta luz: se puede utilizar plástico blanco lechoso al 30% o, si ya se cuenta con instalaciones de plástico verde clorofila o vidrio, se puede emplear una malla sombra colocada sobre estos materiales. La malla ideal debe ofrecer una sombra del 50% al 70%, lo que resultará en una sombra efectiva de entre el 25% y el 35%. En ambientes cerrados, se puede recurrir a luz artificial,

como fluorescentes, iluminando las bandejas por un máximo de 12 a 15 horas diarias, evitando la exposición directa a la luz (FAO, 2001a).

2.4.2. Temperatura

La temperatura óptima para el crecimiento del FVH debe oscilar entre 18 °C y 26 °C. Sin embargo, para las gramíneas, que son las más utilizadas debido a su alto volumen de producción y riqueza nutricional, se recomienda un rango ideal de entre 25 °C y 28 °C. Temperaturas superiores a 30 °C pueden comprometer la actividad celular, lo que resulta en una disminución de la capacidad de absorción de agua por las raíces. Además, es importante considerar que las noches cálidas no son beneficiosas para las gramíneas, ya que durante este período la respiración es más activa, lo que lleva a un consumo significativo de reservas energéticas que deberían ser utilizadas para la fotosíntesis durante el día (Hernandez, 2024).

2.4.3. Humedad

La humedad es un factor crucial en la producción de forraje verde hidropónico (FVH). Se recomienda mantener una humedad relativa entre el 65% y el 70%. Valores superiores al 90% sin una adecuada ventilación pueden provocar serios problemas fitosanitarios, principalmente debido a la proliferación de enfermedades fúngicas que son difíciles de erradicar. La humedad ambiental adecuada es esencial, ya que influye directamente en la función de las estomas, que son responsables de la absorción de dióxido de carbono (CO₂). Si no hay suficiente humedad en el ambiente, la planta no podrá absorber CO₂, lo que impedirá su asimilación y, por ende, afectará su crecimiento y desarrollo (Jiménez, 2021).

2.5. Componentes básicos para la producción de FVH

2.5.1. Semilla

El primer paso en la producción de FVH, es la elección adecuada de las semillas. Los granos como maíz, cebada, trigo, sorgo y avena son los más empleados en la producción de FVH, debido a su alto valor nutricional y rápido crecimiento. Estas semillas deben ser de excelente calidad y estar exentas de contaminantes o patologías para garantizar una producción óptima (FAO, 2024).

2.5.2. Desinfectante

Para la producción de FVH, la desinfección de semillas es crucial para eliminar hongos y bacterias contaminantes. El uso de hipoclorito de sodio, con una concentración de 0.5, 1 y 2 ml/L, concluyendo que el hipoclorito de sodio es efectivo para la desinfección de granos. El tiempo de inmersión debe ser de aproximadamente 15 min para evitar dañar las semillas (Mariño, 2022).

Zuñiga y Beauregard (2020), recomiendan utilizar agua oxigenada en una dosis de 5 ml/L, que ha demostrado ser una buena opción para la desinfección de semillas, controlando eficazmente los hongos en la cebada y promoviendo la germinación, el crecimiento y la acumulación de biomasa. Es importante lavar las semillas para retirar material flotante e impurezas antes de la desinfección. Después de la desinfección, las semillas deben enjuagarse con agua para eliminar cualquier residuo del desinfectante.

2.5.3. Recinto

FAO (2001b), menciona que existe un amplio rango de posibilidades para las instalaciones que va desde aquellas más simples construidas artesanalmente, hasta sofisticados modelos digitalizados.

2.5.3.1. Las instalaciones populares

Son estructuras sencillas hechas con materiales rústicos como palos, cañas y plástico transparente. El suelo es de tierra y las estanterías para la producción de FVH, generalmente de tres niveles, se construyen con materiales reciclados como restos de madera (FAO, 2001b).

2.5.3.2. Las estructuras en desuso

Izquierdo (1998) citado por Condori (2015), incluyen antiguas fábricas, criaderos de pollos y galpones vacíos. Estas ofrecen un mejor control ambiental y permiten mayor producción, con hasta siete niveles de bandejas

2.5.3.3. Las estructuras modernas o de alta tecnología

Son sistemas cerrados y automatizados, conocidos como “fábricas de forraje” o “containers” climatizados. Estas pueden ser construidas en el lugar, prefabricadas o importadas como unidades completas de producción (FAO, 2001b).

2.5.3.4. Invernadero de dos aguas

Son apropiados para sistemas de producción intensiva en espacios reducidos y a gran escala, especialmente para cultivos de bajo crecimiento. Resultan ideales para el cultivo de forrajes verdes hidropónicos, ya que su estructura permite un uso óptimo del espacio disponible. Sus dimensiones pueden variar entre 4 y 8 metros de ancho, hasta 20 metros de largo, con una altura de 3 metros (Vivas y Mejía, 2022).

2.5.3.5. Invernadero de túnel

Un invernadero tipo túnel se distingue por su estructura arqueada y la ausencia de ventilación cenital. Además, cuenta con ventilas laterales de 2.8 metros, lo que restringe su uso a invernaderos de menor longitud, ya que en estructuras más largas podría generar estrés en las plantas ubicadas lejos del perímetro. Este tipo de invernadero se emplea en cultivos que no requiere evacuaciones de grandes cantidades de aires, minimizando las pérdidas de calor, generalmente esto se emplean para cultivos de bajo y mediano porte (Vivas y Mejía, 2022).

El mismo autor menciona que se distingue por la forma de su cubierta y su estructura completamente metálica. El uso de este tipo de invernadero se ha ido popularizando debido a su mayor capacidad para regular los factores climáticos, su alta resistencia a vientos fuertes y su rápida instalación al ser estructuras prefabricadas.

2.5.3.6. Invernadero de media agua

Por lo general, este tipo de invernadero tiene una longitud de 8 metros y un ancho de 3.20 m, con una altura máxima de 2.30 m y una mínima de 1.30 m. Para garantizar una buena ventilación, cuenta con cuatro ventanas metálicas de 0.70 por 0.50 m, distribuidas de la siguiente manera: dos en la parte superior lateral, dos en la parte inferior lateral y una en la pared posterior. Además, dispone de una puerta metálica de 1.70 m de alto por 0.70 m de

ancho. En su construcción se emplean materiales de bajo costo, como adobes, piedras, barro, madera rolliza y techos de agrofilm (Vivas y Mejía, 2022).

2.5.4. Estanterías

La producción de FVH, son ubicadas sobre estructuras o repisas para un mejor aprovechamiento de espacio, según las necesidades del productor. Una estructura de madera de sencilla construcción, que posibilita la producción simultánea de forraje verde hidropónico. Además, su fabricación es simple, al estar hecha de madera, tiene un costo reducido (Abarca *et al.*, 2020b).

Mismo autor describe que existen diversos tipos de estructuras según los materiales empleados en su fabricación. Las estanterías metálicas, como las de acero galvanizado o aluminio, se caracterizan por su resistencia, durabilidad y su uso frecuente en sistemas de producción comercial de forraje verde hidropónico. Asimismo, se pueden encontrar estructuras modulares, las cuales brindan mayor versatilidad, ya que permiten ajustar el número de niveles en función del espacio disponible y las necesidades de producción.

2.5.5. Bandejas de cultivo

Cantuca *et al.*, (2024), indican que la bandeja forrajera es una herramienta fundamental en la producción de FVH. Estas bandejas están diseñadas para facilitar la germinación de semillas de cereales como cebada, avena, trigo o maíz. A continuación, se describen los principales tipos de bandejas utilizadas:

- Bandejas de polipropileno: son ampliamente utilizadas por su resistencia y durabilidad. Además, suelen incorporar estabilizadores UV que las protegen de la degradación causada por la exposición a la luz solar.
- Bandejas de acero inoxidable: recomendadas en ambientes con alta humedad, ya que son resistentes a la corrosión y no propician el desarrollo de hongos. No obstante, su costo es mayor en comparación con las de plástico.
- Bandejas de madera: aunque son una opción más económica, no se aconseja su uso en ambientes muy húmedos, pues tienden a deteriorarse rápidamente y pueden favorecer la aparición de hongos.

- Bandejas desechables: no son comunes en la producción de FVH, pero algunas personas las emplean en proyectos pequeños o experimentales. Generalmente, están hechas de bidones reciclados y no están diseñadas para un uso prolongado.

2.5.6. Sistema de riego

El riego puede realizarse de manera tan simple y económica como con una regadera, hasta emplear métodos más costosos y avanzados que utilizan microaspersores, nebulizadores, riego por goteo y temporizadores o “timers” (Elizondo, 2005).

El mismo autor menciona que la frecuencia de riego es fundamental y dependerá de la demanda hídrica de las plantas, la cual está influenciada por la temperatura, la luz y su fase de desarrollo. Esto significa que, a medida que aumentan la temperatura, la luminosidad y la edad de la planta, sus necesidades de agua también se incrementan. Por esta razón, no existe una fórmula exacta para determinar la frecuencia o cantidad de riego. Sin embargo, es esencial garantizar que la semilla o las plantas no se deshidraten.

Los sistemas de riego por microaspersión y nebulización han demostrado ser los más eficientes. A diferencia de otros métodos, estos aseguran una distribución equitativa y homogénea del agua, donde el tamaño de las gotas, al pulverizarse y transformarse en una fina neblina, no perjudica a las semillas en germinación. Este tipo de riego, al minimizar el impacto directo de gotas grandes, disminuye la pérdida de semillas. Además, favorece el incremento de la humedad relativa dentro del invernadero, generando un ambiente ideal para el desarrollo del FVH (Hernández, 2024b).

El autor también señala que el sistema de riego por nebulización o microaspersión se compone de una manguera o poliducto instalado a una altura de aproximadamente 35 a 40 cm sobre las charolas forrajeras. A esta tubería se le integran los nebulizadores o microaspersores, encargados de distribuir el agua de manera uniforme y eficiente. Se recomienda que cada nebulizador o microaspersor disponga de una válvula antigoteo para evitar que las gotas caigan sobre las semillas al apagarse el sistema, lo que podría dañarlas.

2.6. Producción de FVH

2.6.1. Selección de las especies de granos

En la producción de FVH, se emplean principalmente semillas de gramíneas como trigo, avena, centeno, triticale, cebada o maíz. Si bien existen distintas perspectivas respecto a cuál es la semilla más adecuada, varios autores coinciden en que el trigo ofrece mayores beneficios. Esto se debe a su germinación homogénea, alto contenido proteico, amplia disponibilidad durante el año y menor costo en comparación con otras opciones. Por ejemplo, aunque la cebada puede superar en rendimiento al trigo en un 5% en un periodo de 8 días, posee menor concentración de proteínas. El maíz, por su parte, requiere más tiempo para su desarrollo, y la avena tiende a presentar una germinación desigual. Para la producción de FVH, es fundamental utilizar semillas de alta calidad, con origen conocido, adaptadas a las condiciones locales y con comprobada capacidad de germinación y rendimiento. La elección de la semilla debe basarse principalmente en tres aspectos clave de la especie: su valor nutritivo, la rapidez de crecimiento y su contenido proteico (Abarca *et al.*, 2020a).

2.6.2. Selección de la semilla

Jalina y Palacio (2019), recomienda emplear semilla de alta calidad (íntegra y seca), con origen certificado, adaptada al entorno local, accesible y con una tasa de germinación comprobada de al menos un 75%, además de buen rendimiento. No obstante, por razones de costos y eficiencia, el productor también puede cultivar FVH con semilla de calidad inferior, siempre que mantenga un porcentaje de germinación adecuado, o producirla localmente para su propio uso.

2.6.3. Lavado y desinfección de la semilla

Hernández (2024b), propone sumergir las semillas forrajeras seleccionadas en cubetas, recipientes u otros contenedores para eliminar todo el material flotante, como fibras, residuos, granos dañados y otras impurezas que deben descartarse. A continuación, desinfectaremos las semillas en un contenedor con una solución de 2 mililitros de hipoclorito de sodio (blanqueador comercial) diluidos en cada litro de agua. Este proceso tiene como propósito eliminar hongos y bacterias contaminantes.

El autor también señala desinfectar las semillas colocándolas primero en una bolsa de malla de nailon o malla sombra (si te sobró al instalar el invernadero), permitiendo que el agua escurra correctamente al retirar las semillas. Las semillas deben permanecer en la solución únicamente por 15 min, ya que un tiempo mayor podría dañarlas debido al efecto del cloro. Una vez desinfectadas, retíralas y enjuágalas con agua para eliminar cualquier residuo de cloro.

Zuñiga y Beauregard (2020), Mencionan que cuando se trata de desinfectar semillas para la producción de forraje verde hidropónico, el peróxido de hidrógeno parece ser la opción más prometedora. En concreto, una concentración de 5 ml/l (denominada tratamiento T6 en el estudio) realmente se destacó. Esta concentración en particular mostró los mejores resultados generales al considerar los diversos factores que estaban analizando relacionados con la desinfección.

Los mismos autores indican que el estudio destaca que estos resultados positivos fueron más evidentes al utilizar peróxido de hidrógeno en las semillas de cebada. La concentración de 5 ml/L no solo desinfectó eficazmente las semillas de cebada, sino que los investigadores también observaron un efecto bioestimulante, lo que significa que realmente ayudó a mejorar la tasa de germinación de la cebada.

2.6.4. Pregerminado de las semillas

La pregerminación es el proceso de activar las semillas, rompiendo su estado de latencia para iniciar la germinación. Los factores esenciales en esta etapa son la temperatura, la humedad y la oxigenación. Este proceso puede realizarse de dos formas: únicamente con agua o con una mezcla de agua y cal (Hernández, 2024b).

Abarca *et al.*, (2016), indica que para lograr el éxito en la producción de forraje verde hidropónico, se realiza la imbibición de las semillas para activar el proceso de germinación. En esta fase, las semillas se sumergen en agua limpia por un máximo de 24 horas, con un receso de 1 hora a las 12 horas para facilitar la oxigenación. Es recomendable, que el recipiente utilizado para el remojo de las semillas sea de material plástico y no necesariamente translúcido. Según evaluaciones realizadas por el INIA, en semillas de trigo, centeno y cebada, una imbibición de 24 horas permite alcanzar una germinación superior al 90%, lo que es suficiente para obtener un forraje verde hidropónico de alta calidad.

2.6.5. Siembra y densidad

La densidad de siembra es un factor clave en la producción de FVH, ya que afecta directamente el crecimiento de las plantas, la competencia por recursos y en el rendimiento del forraje. Una densidad óptima permite maximizar la producción y mejorar su calidad (Nina y Fernández, 2017)

El mismo autor menciona que de acuerdo con el estudio, el método de Tarrillo superó al método de la FAO, en la producción de FVH de cebada. En particular, el método de Tarrillo, que emplea un remojo de 24 horas para una mayor hidratación de las semillas de cebada, resultó en una mayor altura de las plantas. Además, con una densidad de siembra de 2.5 kg/m², se observó un buen desarrollo y rendimiento de biomasa. Esto sugiere que una hidratación más prolongada de las semillas puede favorecer el crecimiento inicial en sistemas hidropónicos, superando al método de la FAO, que utiliza tiempos de remojo más cortos.

Para semillas de trigo, avena, cebada, centeno y triticale, se recomienda utilizar entre 300 y 350 g por bandeja de 35,5 cm x 45 cm, lo que equivale a distribuir un kilo de semilla en tres bandejas. En el caso del maíz, la dosis debe incrementarse a entre 500 y 600 g por bandeja, lo que implica utilizar dos bandejas por cada kilo de maíz (Abarca *et al.*, 2016).

2.6.6. Germinación

El proceso de germinación comienza dejando el grano en un recipiente con pequeños orificios durante cuatro días, humedeciéndolo cada 24 horas en un ambiente oscuro dentro del invernadero. Luego, en una tercera etapa, el grano germinado se distribuye en seis bandejas de cartón (90 x 60 cm), previamente desinfectadas con agua clorada 24 horas antes, colocadas sobre una superficie de nylon. Para favorecer la fase final de germinación, las bandejas de cartón cubrieron el grano durante tres días (Zagal-Tranquilino *et al.*, 2016).

Después de instalar las bandejas en los módulos, la germinación fue favorecida cubriendo la semilla con papel absorbente para conservar la humedad. Durante la fase oscura, el invernadero se mantuvo completamente cubierto con plástico negro. El riego se realizó con agua sin clorar, aplicando 75 ml en tres dosis diarias durante los primeros cuatro días de germinación, aumentando la cantidad según los requerimientos del cultivo (Castrejón *et al.*, 2023).

2.6.7. Riegos

Las estructuras destinadas a la producción de FVH deben contar con un sistema de riego por aspersión de gotas finas, asegurando una distribución homogénea de la humedad en todos los niveles. El suministro de agua puede realizarse mediante aplicadores manuales, pulverizadores de mochila o aspersores conectados a una fuente de agua. Durante la fase de crecimiento, el riego debe efectuarse entre 3 y 5 veces al día, dependiendo del desarrollo del forraje y de la temperatura ambiental a la que esté expuesto (Abarca *et al.*, 2016).

Abarca *et al.*, (2020a), menciona que actualmente es del tiempo efectivo de cada uno de los riegos a realizar durante el día. En este sentido, son varios los autores que confirman que un minuto de riego (con microaspersores de 180° o 360°, de 0,38 hasta 0,63 L/min) es suficiente para mantener la humedad requerida para un desarrollo normal del forraje.

El autor también señala que la capacidad de recuperación de agua en el diseño de la estructura de producción. En un ensayo realizado en el C.E. Hidango de INIA, en la comuna de Litueche, se determinó que un riego de un minuto con un microaspersor tipo jet de 180° y un caudal de 0,63 L/min distribuyen 3,78 L/min entre los seis aspersores de la estructura. De este volumen, aproximadamente 3,02 litros se recuperan mediante el escurrimiento a través de las bandejas, la recolección en la canaleta y su acumulación en el estanque, lo que representa una tasa de recuperación cercana al 80%. Esta condición se va a mantener, mientras no exista crecimiento vegetativo de las semillas, y las especies se encuentren en el proceso de germinación y de aparición de raicillas.

Zagal-Tranquilino *et al.*, (2016), menciona que es posible la producción de FVH de maíz, con riegos de agua cada 24 horas. Por ello, la frecuencia de riego diaria dependerá principalmente de la temperatura ambiental en la que se desarrolle el sistema de producción de forraje hidropónico.

2.6.8. Valor nutritivo de la cebada

El forraje verde hidropónico es altamente nutritivo, con un equilibrio adecuado de proteínas, carbohidratos, vitaminas y minerales. Esto contribuye a una mejor salud y rendimiento del ganado, mejorando la producción de leche, carne y otros productos animales (Hernández, 2024a).

Corona (2011), describe un alto valor nutritivo, atribuido al proceso de germinación de los granos, como se muestra en el siguiente Cuadro:

Cuadro 2. Comparación entre las características del FVH (cebada) y otras fuentes alimenticias.

Parámetro	FVH (cebada)	Concentrado	Heno	Paja
Energía (kcal/kg MS)	3.21	3	1.68	1.39
Proteína Cruda (%)	25	30	9.2	3.7
Digestibilidad (%)	81.6	80	47	39
Kcal Digestible/kg	488	2.16	400	466
kg Proteína Digestible	46.5	216	35.75	12.41

Fuente: Corona (2011)

2.6.9. Rendimiento de cebada en campo

El rendimiento de la cebada en sistemas convencionales puede variar significativamente dependiendo de factores como el tipo de cebada, las condiciones climáticas, el manejo del suelo y el uso de tecnologías agrícolas (Cespedes, 2021).

El mismo autor indica que, en la evaluación del rendimiento de materia verde, se observó que el primer corte presentó un rendimiento promedio de 12.5 t/ha, correspondiente a la aplicación de biol al 70%, en la producción de cebada en campo.

Blanco-Capia *et al.*, (2019), menciona un estudio que se efectuó en invernaderos en la Universidad Autónoma de Chapingo-México. Donde el rendimiento promedio de cebada fue de 32.8 kg/m² y una altura de 21.7 cm, por otro lado, al incorporar diferentes niveles de azufre (hasta 4 ppm/m²) como aditivo en la producción del forraje verde hidropónico de cebada, se determinó una biomasa de 34.9 kg/m².

2.6.10. Rendimiento de cebada bajo sistema hidropónico

Gisbert (2024), Menciona que el rendimiento mayor se obtuvo de 20 kg/m² del tratamiento 1 (Solución A + B), donde este hallazgo subraya el potencial de este tratamiento para optimizar la producción de biomasa en sistemas hidropónicos, sugiriendo su viabilidad como una estrategia efectiva para la producción de forraje verde hidropónico de cebada.

2.6.11. Cosecha

La cosecha del FVH suele estar listo para la cosecha entre los 12 y 15 días. Sin embargo, si el productor requiere una recolección anticipada, esta puede realizarse entre los 9 días. La mayor concentración de nutrientes en el forraje verde hidropónico se alcanza entre los 8 y 9 días después de la siembra, por lo que debe evaluarse con la calidad adecuada. El tiempo es un factor limitante en la eficiencia de producción, por lo que se ha documentado que un período de entre 7 y 10 días es suficiente para completar el ciclo. unos de los aspectos importantes de la producción de forraje es la altura, el cual considera que mayor altura del forraje se puede obtener mayor productividad del FVH, con altura de 30 cm, su productividad oscila entre 12 a 18 kg de FVH producido por cada kg de semilla utilizada a los 15 días (Vivas y Mejía, 2022).

2.7. Ventajas nutricionales del FVH

La alimentación animal ha evolucionado significativamente con la introducción del FVH, una alternativa sostenible y rica en nutrientes que puede sustituir o complementar las dietas tradicionales (Martinez, 2019).

2.7.1. Alimentación a vacas lecheras con FVH

El FVH se debe suministrar de 12 a 18 kg, repartidos en dos raciones, generalmente a las horas de ordeña. Al aportar hasta 1800 g de proteína por día, se encuentran aumentos en la producción lechera entre un 10 a 20%, en comparación con dietas tradicionales. En vacas lecheras de la raza Holstein, en el Estado de México, la alimentación con forraje hidropónico mostró evidencias de su dieta a partir de la tercera semana. Donde se observó un pelaje más brillante, así como una ganancia promedio de 180 g diarios en peso vivo. Además, la producción de leche aumentó en un 12%, el índice de mastitis se redujo en un 40% y aumentó el índice de fertilidad en un 16% (Martinez, 2019).

El mismo autor menciona que se suministró Forraje Verde Hidropónico durante 60 días a las vacas de baja producción lechera, con una ración que varió de 9 kg hasta 20 kg diarios por animal. Desde la primera semana, la producción de leche aumentó en promedio un 23.7%, aunque algunas vacas lograron hasta un 40% de incremento (Martinez, 2019).

2.7.2. Alimentación de toretes

En el ganado productor de carne, se ha evidenciado una reducción de grasas amarillas y un aumento en la proporción de grasas blancas, lo que mejora la apariencia de la carne. Para este tipo de ganado, se recomienda suministrar en la etapa de levante 13 kg de Forraje Verde Hidropónico y 17 kg en la fase de engorde (Martinez, 2019).

2.7.3. Alimentación de ovinos

La alimentación se recomienda suministrar 2.5 kg de Forraje Verde Hidropónico a ovejas en gestación y entre 3.5 y 4 kg a ovejas en lactación. Para la engorda de borregos, la ración ideal es de 3 kg de FVH, mientras que para corderos y carneros se recomienda 1 kg y 2.5 kg, respectivamente (Martinez, 2019).

Asimismo, el autor indica que un borrego Pelibuey con un peso promedio de 20 kg consume aproximadamente 6 kg de FVH al día, logrando alcanzar 35 kg de peso vivo en 94 días. En contraste, con un sistema de alimentación basado en concentrados, este proceso tardaría 128 días. La reducción del tiempo de engorde con FVH también disminuye los costos de producción.

2.7.4. Alimentación de conejos

Se puede suministrar entre 300 y 500 g diarios de FVH a un animal adulto. Se recomienda una dieta compuesta por un 60% de FVH y un 40% de alimento balanceado. Investigaciones realizadas con conejos criollos bajo esta dieta indican que, a las 7 semanas, alcanzan un peso promedio de 1,908 g, en comparación con los 1,870 g de los conejos alimentados con 100% de alimento balanceado (Martinez, 2019).

2.7.5. Alimentación de gallinas

Se recomienda suministrar forraje verde hidropónico de trigo con solo 6 días de germinación, ya que mejora la digestión en comparación con la alimentación exclusiva a base de granos. Además, el peso de los huevos aumentó aproximadamente un 20%, y la calidad de la carne resultó más firme y con mejor sabor (Martinez, 2019).

2.8. Factores que influyen en el periodo de cosecha

2.8.1. Altura de la planta

Las investigaciones realizadas sobre el forraje verde hidropónico de cebada y otros cereales señalan que tanto el momento de la cosecha como la altura de corte influyen notablemente en la calidad nutricional y en el rendimiento del cultivo. El momento óptimo de cosecha para el FVH de cebada es alrededor de 16 a 18 días después de la germinación, ya que en esta etapa se alcanza un mayor contenido de proteína cruda y una mejor degradabilidad de la materia seca (Arias *et al.*, 2024).

2.8.2. Porcentaje de materia seca

Las investigaciones sobre la producción de FVH de cebada han demostrado que tanto el momento de la cosecha como la densidad de siembra influyen de manera significativa en el rendimiento y la calidad del forraje. A medida que la planta se desarrolla, el porcentaje de materia seca varía, lo cual impacta directamente en sus propiedades nutricionales. En el caso de la cebada, se ha observado que una densidad de siembra de 3,5 kg/m² ofrece un rendimiento superior, alcanzando hasta 32,8 kg/m² de peso fresco (Castillo *et al.*, 2013).

2.8.3. Condiciones ambientales

Los diferentes estudios sobre el FVH de cebada indican que factores ambientales como la temperatura, la humedad y la luz influyen en el desarrollo del cultivo y en el momento óptimo de cosecha. Se ha observado que temperaturas elevadas durante el llenado del grano reducen el periodo de latencia, mientras que un aumento en la precipitación también disminuye dicha latencia, aunque incrementa la sensibilidad de los granos a la humedad (González *et al.*, 2019).

2.9. Importancia de conocer el tiempo de cosecha

2.9.1. Calidad nutricional

Para garantizar una alta calidad nutricional, el FVH debe cosecharse en el momento adecuado. Si la cosecha se realiza demasiado temprano, el forraje puede no haber desarrollado completamente sus nutrientes, mientras que, si se deja crecer en exceso, tiende a volverse más fibroso y menos apetecible para los animales. En el caso de la

cebada, el FVH suele cosecharse entre los 10 y 14 días después de la siembra, cuando alcanza una altura aproximada de 25 cm (Hernández, 2024b).

2.9.2. Eficiencia en la producción

Conocer el momento adecuado de cosecha permite a los productores planificar de manera más eficiente sus ciclos de cultivo, optimizando el uso de recursos como el agua, el espacio y el tiempo. Esta planificación resulta especialmente relevante en sistemas hidropónicos, donde las áreas de producción son reducidas y los ciclos de crecimiento son breves. Una gestión adecuada del tiempo de cosecha puede asegurar un suministro continuo de forraje fresco y nutritivo para la alimentación del ganado (Ornelas, 2023).

2.9.3. Reducción de costos

Cosechar en el momento oportuno no solo mejora la calidad del forraje, sino que también permite reducir los costos asociados con la suplementación alimenticia. Esto cobra especial importancia en regiones donde el forraje convencional es limitado o costoso, como en la Patagonia, donde el forraje verde hidropónico (FVH) se presenta como una alternativa viable para garantizar la alimentación del ganado en períodos críticos (Birgi *et al.*, 2018).

2.9.4. Manejo de recursos hídricos

El agua es un elemento fundamental para la germinación de las semillas y el desarrollo de las plántulas, ya que interviene en procesos clave como la activación enzimática, la movilización de reservas, la translocación de nutrientes y el crecimiento inicial. En los sistemas hidropónicos, se ha demostrado que el forraje verde hidropónico mejora notablemente la eficiencia en el uso del agua. Esta eficiencia hídrica es una de las principales ventajas del FVH, especialmente en zonas con escasez de recursos. Además, conocer el momento óptimo de cosecha permite a los productores gestionar de manera más precisa el riego, asegurando condiciones adecuadas para el cultivo y reduciendo el desperdicio de agua (Ghazi y Al-Hashimi, 2011).

2.10. Los grados Brix (°Bx)

Los grados Brix representan la cantidad de sólidos solubles presentes en la savia del forraje, un líquido espeso que circula por los vasos conductores de las plantas y cuya función es transportar agua, minerales y los nutrientes generados durante la fotosíntesis. Este

parámetro se utiliza principalmente para estimar la concentración de azúcares, expresada como porcentaje de sacarosa, un disacárido formado por una molécula de fructosa y una de glucosa. Sin embargo, además de los azúcares, los grados Brix también comprenden otros componentes solubles como ácidos orgánicos, sales minerales y diversos compuestos celulares presentes en el forraje (Cardona *et al.*, 2022).

2.10.1. Utilidad de medir los grados Brix

La medición de los grados Brix en los forrajes producidos en una finca ganadera se ha convertido en una herramienta útil como indicador del valor nutricional de los forrajes, ya que se relaciona estrechamente con el contenido energético del alimento. Esta práctica ha cobrado importancia en la evaluación de metodologías que permitan identificar el momento más adecuado para el corte o el pastoreo, con el objetivo de optimizar la alimentación de los rumiantes en distintos sistemas ganaderos del país (Cardona *et al.*, 2022).

Los mismos autores mencionan, que el uso de los grados Brix como indicador del valor nutricional de un forraje ofrece varias ventajas al productor, como estimar el nivel energético del alimento, favorecer el consumo por parte del animal debido a una mayor palatabilidad (asociada a un sabor más agradable), asegurar una buena digestibilidad. No obstante, cuando los valores de Brix en una especie forrajera son bajos, esto podría indicar carencias o desequilibrios en la nutrición de la planta. Por ello, se recomienda realizar análisis foliares y de suelos para diseñar un plan de fertilización que permita alcanzar niveles óptimos de azúcares solubles.

2.10.2. Metodología para determinar °Bx en forrajes

Tradicionalmente, las metodologías empleadas para evaluar la calidad nutricional de los forrajes suelen ser complejas, ya que requieren equipos especializados, reactivos de laboratorio, instalaciones adecuadas y personal capacitado, lo que limita su aplicación directa en condiciones de campo. En contraste, la medición de grados Brix se presenta como una alternativa práctica, rápida y económica para monitorear la calidad nutricional de las gramíneas y otros forrajes empleados en la alimentación de animales, facilitando la toma de decisiones en sistemas de producción ganadera (Cardona *et al.*, 2022).

2.10.2.1. Materiales y equipos para determinar °Bx

Para la medición de los grados Brix se requiere de materiales básicos, accesibles y de fácil manejo en campo. Entre ellos se incluyen unas tijeras de podar, utilizadas para cortar y picar hojas y tallos tiernos del forraje; un mortero de porcelana, que actúa como recipiente cóncavo donde se deposita la muestra vegetal para ser macerada con la ayuda de un pistilo o “mano”, permitiendo así extraer la savia, que es el líquido necesario para realizar la lectura. También se emplea un gotero de plástico o vidrio, útil para recolectar la savia obtenida tras la maceración. Finalmente, se utiliza un refractómetro, un instrumento óptico que permite determinar el porcentaje de grados Brix presentes en la muestra de savia (Cardona *et al.*, 2022).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Localización

El presente trabajo se realizó en el Centro Experimental de Kallutaca de la Universidad Pública de El Alto (UPEA), ubicada en la provincia Los Andes, municipio de Laja, del Departamento de La Paz, a una altitud de 3902 m.s.n.m, a $16^{\circ} 31' 26''$ latitud Sur y $68^{\circ} 18' 32''$ longitud Oeste, según el datum WGS84 (Google-Earth, 2025).

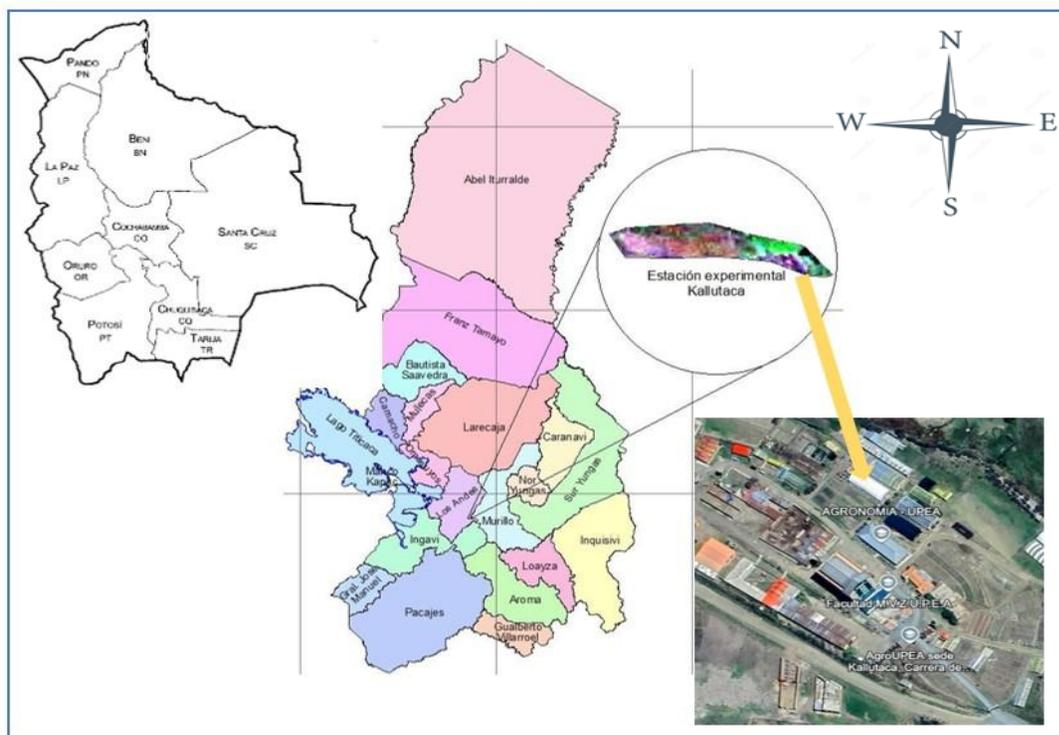


Figura 1. Localización de la investigación Google-Earth (2025).

3.2. Materiales

Los materiales que se utilizaron se desglosan de la siguiente manera:

3.2.1. Material biológico

- Semilla de cebada variedad criolla.

3.2.2. Material de escritorio

- Libreta de apuntes
- Lápiz, borrador, bolígrafo
- Libro de campo
- Laptop
- Calculadora
- Impresora
- Cámara fotográfica

3.2.3. Materiales de campo y equipos de medición

- Nebulizador de riego
- Tubo de PVC ½
- Tanque de agua 500 litros
- Tubería de Polietileno ½
- Flexómetro de 5 m
- Tijera
- Regla de 30 cm
- Tacho

- Bandejas de siembra
- Barras angulares
- Nylon negro de 8 m
- Nylon transparente de 8 m
- Hipoclorito de sodio
- Termómetro ambiental
- Balanza
- Refractómetro

3.3. Metodología

Cada paso de la metodología se estructuró cuidadosamente para garantizar el cumplimiento del objetivo planteado en la investigación.

3.3.1. Desarrollo de la investigación

3.3.1.1. Adaptación del módulo hidropónico y ambiente de la investigación

La producción de forraje verde hidropónico se llevó a cabo dentro de un invernadero previamente construido, cubierto con agrofilm de color blanco. En el interior, se acondicionó un ambiente específico para el experimento, de una superficie de 6 m², construido con barras metálicas y cubierto con lona impermeable, como se observa en el Anexo 1.

3.3.1.2. Construcción del estante para FVH

En el interior del invernadero se construyó un estante de estructura metálica con barras angulares. Dicha estructura tenía 2 m de largo y 0,40 m de ancho, contaba con una altura total de 1.50 m con cuatro pisos y en cada piso se dispusieron seis bandejas para la siembra, como se detalla en Anexo 2.

3.3.1.3. Instalación del sistema de riego automatizado

Se instaló un sistema de riego automatizado por nebulización con retorno, el mismo se programó para un riego de 1 min de cada hora del día, compuesto por una bomba, 8 nebulizadores, un temporizador digital y un tanque con capacidad de 500 litros, realizándose los trabajos que se detallan, en los Anexos 3 y 4.

3.3.1.3.1. Armado del sistema

Se inició con la instalación de 1 tanque de agua de 500 litros a un costado del estante. Tenía adicionado un tubo de $\frac{1}{2}$ de diámetro de salida y llegada del agua a los nebulizadores. La bomba eléctrica tenía el sistema automatizado de 220 V. El temporizador digital puede manejar 18 programaciones en distintos tiempos y fechas como se observa en los Anexos 3 y 4.

3.3.1.3.2. Equipo de bombeo

Se utilizó una bomba de agua eléctrica para succionar el agua, de tal forma que haga presión y los nebulizadores puedan realizar el riego de las bandejas de plástico, la descripción del equipo se presenta en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Descripción de la bomba de agua para presión

Característica	Datos
Marca	Pedrollo
Modelo	4CPm 100
Rango de caudal (Q)	5–130 l/min
Altura máxima (Hmax)	50 m
Potencia	0,75 kW (1 HP)
Tensión	220–230 V
Frecuencia	50 Hz
Corriente	4,50 A
Revoluciones	2900 rpm
Condensador	16 μ F
Grado de protección	IP 44
Clase de aislamiento	F
Temperatura máxima líquido	40°C
Presión máxima	6 bar
Peso	12,5 kg

3.3.1.3.3. Nebulizadores para riego

Se utilizaron nebulizadores como emisores de riego, para que la expulsión de agua sea en forma de nebulización para el forraje hidropónico. El riego con agua se distribuyó uniformemente para mantener la humedad de las unidades experimentales de producción de forraje, instalando 2 nebulizadores para cada bloque.

3.3.1.4. Recolección del material biológico

Para la presente investigación, se empleó semilla de cebada de buena calidad, adquirida del mercado local altiplano.

3.3.1.5. Adquisición y acondicionamiento de bandejas

Se adquirieron bandejas plásticas con dimensiones de 0,30 m de ancho por 0,40 m de largo. Posteriormente, se realizaron perforaciones en la base con el objetivo de facilitar el drenaje del agua y evitar su acumulación, lo que contribuye a prevenir problemas de exceso de humedad y desarrollo de patógenos, como se muestra en el Anexo 6.

3.3.1.6. Remojado de las semillas

Antes de la siembra, las semillas fueron sumergidas en agua durante 48 horas como parte de un proceso de selección, con el objetivo de eliminar el material flotante e impurezas, asegurando su viabilidad y proporcionando una adecuada hidratación para promover la germinación, como se observa en el Anexo 7.

3.3.1.7. Desinfección, lavado y oreado de las semillas

Las semillas fueron sometidas a un proceso de lavado y desinfección, utilizando una solución de agua con 1% de hipoclorito de sodio durante 2 min, con el fin de eliminar hongos y bacterias contaminantes. Posteriormente, se realizó un enjuague riguroso con agua limpia, repitiendo el proceso cuatro veces para asegurar la eliminación completa de los residuos de hipoclorito. Finalmente, las semillas fueron retiradas del agua y colocadas en un lugar seguro para su oreado por 24 horas, evitando el acceso de roedores u otros agentes contaminantes, como se detalla en los Anexos 8 y 9.

3.3.1.8. Desinfección de bandejas y siembra

Antes de la siembra, las bandejas fueron desinfectadas en una solución de agua con 1% de hipoclorito de sodio durante 15 min, posteriormente se enjuagaron cuidadosamente con agua limpia y se dejaron secar al ambiente. Después de 24 horas de oreo, se procedió a la siembra de las semillas en un total de 24 bandejas, de las cuales se consideraron 16 como unidades experimentales para la evaluación y 8 como bordes. Con una densidad de 3.5 kg de semilla/m², resultando 416 g/bandeja, distribuidos de forma homogénea en una capa delgada que no superó los 1,5 cm de altura, como se observa en los Anexos 10 y 11.

3.3.1.9. Área oscura y clara

El estante fue cubierto con nylon negro para mantener las semillas en condiciones de semioscuridad y al mismo tiempo asegurando una adecuada ventilación. Una vez observada la brotación completa, a los tres días se retiró el nylon negro. Con el fin de prevenir la acumulación excesiva de agua y proteger el forraje, el estante fue cubierto con nylon transparente, como se muestra en el Anexo 12.

3.3.1.10. Riego de las bandejas

El riego de las bandejas de crecimiento de forraje verde hidropónico (FVH) se inició desde el momento de la siembra y se mantuvo hasta la cosecha. El sistema fue programado mediante un temporizador para realizar 16 riegos diarios, con una duración de un minuto cada uno. La frecuencia de riego se distribuyó de la siguiente manera: cada hora desde las 07:00 a 19:00 horas, y adicionalmente a las 22:00, 01:00 y 04:00 horas, durante los horarios nocturnos, las condiciones de menor temperatura y ausencia de luz favorecieron la retención de humedad. Con el fin de evitar la acumulación excesiva de agua o posibles inundaciones, se colocó una bandeja de 2 m de largo por 0,40 m de ancho en la parte inferior del estante, la cual permitió recolectar el excedente de agua generado durante el riego, para posterior retorno al tanque de agua.

3.3.1.11. Cosecha

La cosecha se efectuó de acuerdo con los tratamientos establecidos, realizándose a los 10, 15, 20 y 25 días después de la siembra. En cada uno de estos periodos se consideraron las variables definidas para la evaluación, las cuales incluyeron indicadores agronómicos, rendimiento y calidad nutricional parcial.

3.3.2. Diseño experimental

El presente estudio se desarrolló bajo un Diseño de Bloques Completamente al Azar (DBCA), con cuatro tratamientos y cuatro repeticiones, conformando un total de 16 unidades experimentales. Este diseño permitió controlar la variabilidad experimental y facilitar el análisis estadístico de los datos obtenidos.

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

Y_{ij} = Una observación cualquiera de la variable de respuesta.

μ = Media general.

α_i = Efecto del tratamiento i ; $i=1,2,\dots,t$.

β_j = Efecto del bloque j ; $j=1,2,\dots,r$.

ε_{ij} = Error experimental.

3.3.3. Factor de estudio

Los tratamientos en estudio fueron, cuatro periodos de cosecha (10, 15, 20 y 25 días), en forraje verde hidropónico de cebada.

Los tratamientos se muestran en el Cuadro 4, las dimensiones de las unidades experimentales y el área experimental total.

Cuadro 4. Descripción de los tratamientos y la superficie experimental.

TRATAMIENTOS	T1= 10 días T2= 15 días T3= 20 días T4= 25 días
UNIDAD EXPERIMENTAL	0,30 m x 0,40 m 0,12 m ²
ÁREA TOTAL	1,92 m ²

3.3.4. Variables de respuesta**3.3.4.1. Porcentaje de germinación**

El porcentaje de germinación se determinó mediante un conteo directo de las semillas germinadas, aplicando el método de muestreo por cuadrante. Para ello, se fabricó un cuadrante de 5 cm x 5 cm y 4 cm de altura, el cual fue colocado sobre la superficie del forraje en cada bandeja correspondiente a los distintos tratamientos. Se contabilizaron todas las semillas presentes dentro del cuadrante y los resultados obtenidos fueron utilizados como referencia para estimar el porcentaje de germinación total en cada bandeja, como se observa en el Anexo 13.

$$\text{Porcentaje de germinación (\%)} = \frac{\text{Semillas germinadas en la muestra}}{\text{Número de semillas en la muestra}} \times 100$$

3.3.4.2. Altura de la planta

La altura de las plantas de FVH se evaluó en cada periodo de cosecha, midiendo 10 plantas seleccionadas aleatoriamente en la zona central de cada unidad experimental. La medición se realizó con una regla graduada en centímetros (cm) desde la base del grano hasta la punta de la última hoja apical.

3.3.4.3. Longitud de la raíz

La longitud de la raíz se determinó, mediante medición directa en 10 plantas seleccionadas aleatoriamente por unidad experimental. La medición se efectuó desde el cuello del tallo hasta la punta de la raíz, utilizando una regla graduada en cm.

3.3.4.4. Grosor del tallo

Para la evaluación del grosor del tallo, se seleccionaron e identificaron 10 plantas al azar por cada unidad experimental. A cada una se le midió el grosor del tallo utilizando un vernier en milímetros (mm).

3.3.4.5. Rendimiento de FVH

Para registrar esta variable, se empleó una balanza con capacidad de 20 kg, con lo cual se pesó el forraje verde hidropónico cosechado en los diferentes períodos, realizados a los 10, 15, 20 y 25 días. La unidad de medida utilizada fue en kg como se muestra en Anexo 14.

3.3.4.6. Rendimiento de FVH en materia seca

Se pesaron 1000 g de FVH por cada unidad experimental, identificando adecuadamente cada una de las muestras. Posteriormente, se trasladaron al laboratorio, donde fueron colocadas en una mufla a una temperatura de 60 °C durante 48 horas. Finalmente, las muestras secas fueron pesadas en una balanza analítica de precisión para determinar su contenido de materia seca (MS), como se observa en los Anexos 16 y 17.

3.3.4.7. Medición de grados brix (°Brix) en la savia de FVH

Para determinar sólidos solubles totales del forraje verde hidropónico de cebada, se centró en la medición de los °Brix con un refractómetro. Para ello, se extrajo jugo de hojas, tallos, semillas y raíces, el cual fue colocado directamente en el prisma del equipo. Esta medición permitió cuantificar la concentración de sólidos solubles totales, principalmente azúcares, como un parámetro representativo de la calidad nutricional, contenido energético y palatabilidad del forraje, en los distintos periodos de cosecha, se muestra en Anexo 15.

3.3.5. Análisis económico

Se realizó un análisis económico de relación Beneficio Costo, en la evaluación de cuatro periodos de cosecha en forraje verde hidropónico de cebada, siguiendo los lineamientos propuestos por la MacNeil (2024), de acuerdo al siguiente procedimiento.

3.3.5.1. Ingreso bruto

El ingreso bruto representa la suma total de beneficios obtenidos por la venta del producto, antes de aplicar cualquier tipo de deducción (MacNeil, 2024).

$$I.B. = R * P$$

Dónde:

I.B. = Ingreso bruto

R = Rendimiento

P = Precio del producto

3.3.5.2. Beneficio Costo

El análisis de beneficio costo, es una herramienta que te ayuda a identificar los mayores beneficios en la toma de decisiones a la hora de elegir con qué acciones vale la pena avanzar (MacNeil, 2024).

$$B/C = B.E./C.P.$$

Dónde:

B.E. = Beneficio en efectivo

C.P. = Costo de producción en Bs/m².

La relación de beneficio costo se determina de la siguiente forma:

La relación $B/C > 1$ Los ingresos económicos son mayores a los gastos de producción por lo tanto el cultivo es rentable, el agricultor tiene ingresos.

La relación $B/C = 1$ Los ingresos económicos son iguales a los gastos de producción, el cual no es rentable, solo cubre los gastos de producción, el agricultor no gana ni pierde.

La relación $B/C < 1$ No existe beneficios económicos, por lo tanto, el cultivo no es rentable, el agricultor pierde.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El presente estudio comenzó a mediados del mes de diciembre del año 2024 y concluyó a finales del mes de enero del año 2025, obteniéndose los siguientes resultados.

4.1. Variables de estudio

4.1.1. Variación de la temperatura

Las temperaturas máximas, promedio y mínimas fueron registradas durante los 25 días entre el 06 al 30 de enero que ha durado el ciclo del forraje hidropónico.

La Figura 1 muestra la variación de temperaturas, donde las temperaturas máximas diarias oscilaron entre 20 °C y 32 °C, mostrando una notable variabilidad a mediados del tiempo de evaluación del FVH. En cuanto a la temperatura promedio, esta se mantuvo relativamente estable, con valores entre 17 °C y 21 °C, este rango es adecuado para el desarrollo del FVH, ya que permite una buena tasa de germinación y crecimiento sin provocar estrés térmico significativo en los brotes. Mientras las temperaturas mínimas se mantuvieron más estables, oscilando entre 7 °C y 13 °C. Estas variaciones térmicas podrían influir significativamente en parámetros como la tasa de germinación, el desarrollo radicular y el rendimiento final del forraje hidropónico.

Jiménez (2021), describe en un estudio realizado sobre la base de recopilación, información y resultados de anteriores investigaciones acerca de la producción de forraje hidropónico, determinó cuáles fueron las condiciones ambientales óptimas. Llegó a la conclusión de que a una temperatura de 16 °C a 22 °C se logra mayor rendimiento de forraje verde hidropónico de cebada.

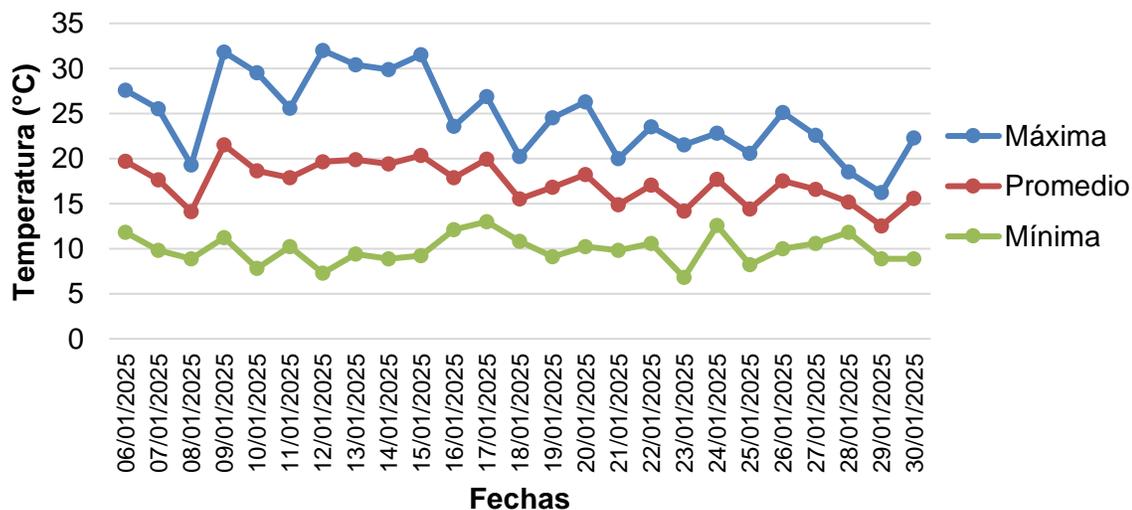


Figura 2. Temperaturas (°C) registradas durante el desarrollo del FVH.

4.1.2. Variación de la humedad relativa

La Figura 2 muestra la variación de la humedad relativa ambiental durante el periodo de desarrollo del forraje verde hidropónico, abarcando del 06 al 30 de enero de 2025.

Durante el periodo analizado, la humedad relativa máxima se mantuvo consistentemente elevada, fluctuando entre un 80 % y 100 %, con algunos picos que alcanzaron el 100 %, condición que resulta favorable para la germinación y el crecimiento del FVH, al reducir la pérdida de agua por transpiración. Mientras la humedad relativa en promedio osciló entre un 65 % y 75 %, lo cual indica un ambiente generalmente húmedo, adecuado para mantener la actividad fisiológica del forraje sin generar condiciones excesivamente húmedas que favorezcan el desarrollo de hongos o enfermedades. Por otro lado, la humedad relativa mínima presentó una mayor variación, con valores que variaron entre 30 % y 70 %, alcanzando sus niveles más bajos a mediados del tiempo de la evaluación.

En conjunto, los datos reflejan un control ambiental relativamente estable, con condiciones de humedad adecuadas para el desarrollo óptimo del FVH. La constancia en la humedad máxima y promedio sugiere que el sistema logró mantener un microclima favorable, a pesar de las variaciones en los valores mínimos.

Jiménez (2021), señala que la humedad ambiental es de gran importancia para procurar condiciones de asimilación adecuadas, ya que ejerce una influencia directa en el trabajo

que desempeñan las hojas, en la investigación realizada describe que la humedad adecuada es 45 % al 70 % para obtener mejor rendimiento en la producción de forraje verde hidropónico de cebada.

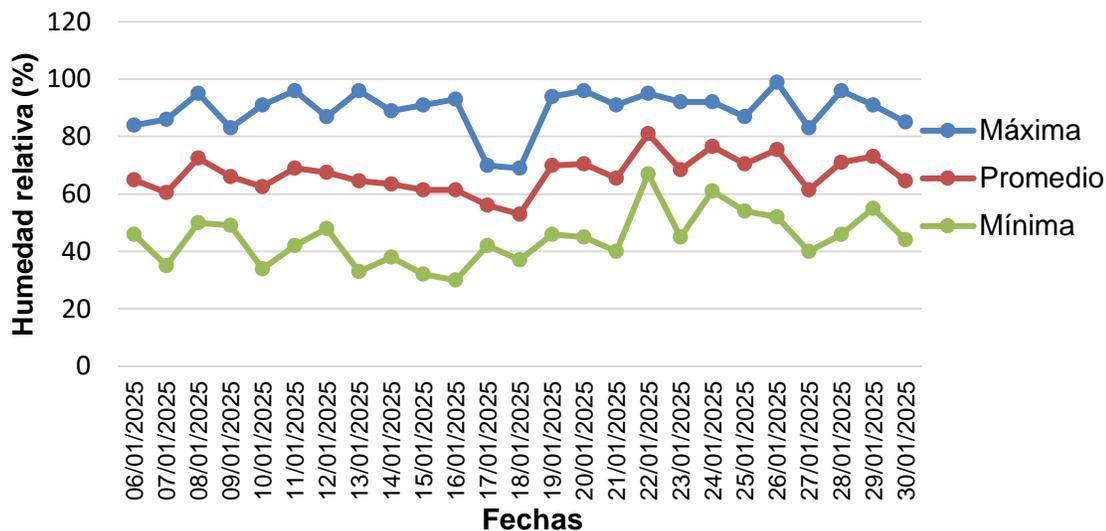


Figura 3. Humedad relativa (%) registradas durante el desarrollo del FVH.

4.2. Variables de respuesta

4.2.1. Porcentaje de germinación

Los resultados del análisis de varianza Cuadro 5 indican que no se encontraron diferencias significativas en el porcentaje de germinación del forraje verde hidropónico (FVH) de cebada entre los bloques ni entre los períodos de cosecha. Esto sugiere que las condiciones de germinación fueron homogéneas. Además, se evidencia que la ubicación de los pisos dentro del estante de estructura metálica no tuvo efecto sobre el proceso de germinación. El coeficiente de variación (CV) con un valor de 1.64%, indica que los datos de estos resultados son con fiables, aunque no se hayan encontrado diferencias estadísticas.

Cuadro 5. Análisis de varianza del porcentaje de germinación

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor
Bloque	18.5	3	6.17	2.52	0.1234 NS
Periodos	3.5	3	1.17	0.48	0.7059 NS
Error	22	9	2.44		
Total	44	15			

Promedio (%) = 95.5

CV (%) = 1.64

Donde: (NS) = no significativo $P > 0.05$: (*) = significativo $P < 0.05$: (**) = altamente significativo $P < 0.01$: (FV) frecuencia de variación, (SC) secuencia de cuadrado, (GL) grados de libertad, (CM) cuadrados medios, (F) frecuencia, ($P > F$) frecuencia tabla, (CV) coeficiente de variación.

El Cuadro 6 refleja el porcentaje de germinación en promedio del FVH de cebada, aunque los tratamientos se basaron en diferentes periodos de cosecha 10, 15, 20 y 25 días, el porcentaje de germinación se evaluó en un solo momento, antes de que se diferencien los tratamientos por tiempo. Los resultados muestran una germinación alta y uniforme en todos los tratamientos, con valores que oscilan entre 95% y 96.25% y un promedio de 95.5% de germinación, lo que demuestra la viabilidad de las semillas.

Cuadro 6. Porcentaje de germinación de FVH en promedio

Periodos de cosecha	Porcentaje de germinación en promedio
25 días	96.25
20 días	95.25
15 días	95.5
10 días	95

En la germinación se obtuvo un promedio del 95.5%. Este resultado se debe a la adecuada calidad fisiológica de la semilla, ya que presentaba buen tamaño, uniformidad y ausencia de daños visibles. Además, el manejo realizado antes de la siembra contribuyó significativamente, ya que se efectuó un remojo que activó el proceso germinativo, seguido del lavado y la selección de semillas sanas después de 48 horas, así como la desinfección para reducir la presencia de patógenos. Asimismo, las condiciones ambientales controladas durante la germinación, como la humedad constante, la temperatura favorable y el ambiente oscuro, favorecieron el alto porcentaje de germinación obtenido.

Melgarejo (2010), describe que el proceso de germinación está condicionado por factores tanto internos como externos. Entre los factores internos se encuentran la viabilidad del embrión, la cantidad y calidad del tejido de reserva, así como los distintos tipos de dormancia. Algunos de los factores externos que regulan el proceso son el grosor de la testa, disponibilidad del agua, temperatura, tipos de luz, inocuidad, edad y origen.

Según FAO (2001b), la semilla debe presentar como mínimo un porcentaje de germinación no inferior al 75% para evitar pérdidas en los rendimientos de Forraje Verde Hidropónico, a comparación con los resultados obtenidos en la prueba de germinación de cebada del presente estudio, en promedio general de 95.25 % están dentro del rango establecido.

Machaca (2021), menciona, en un estudio realizado en el vivero de la empresa Ecopesa EIRL, ubicado en el Distrito Andrés Avelino Cáceres, provincia de Huamanga, Perú. Obtuvo 100% de semillas germinadas en la producción de FVH de cebada con la aplicación de EM-1 que es un concentrado de microorganismos.

4.2.2. Altura de las plantas

En el Cuadro 7 se observa el análisis de varianza para la variable altura de las plantas, evidenciando que no existen diferencias significativas entre los bloques, esto sugiere que la variabilidad entre bloques no influye en FVH de cebada. Por otro lado, en los periodos de cosecha se encontraron diferencias altamente significativas, lo que demuestra este hallazgo la importancia de elegir adecuadamente el momento exacto de la cosecha para optimizar el crecimiento vegetal. El coeficiente de variación (CV) es de 8.83%, denota que los datos son confiables.

Cuadro 7. Análisis de varianza para la altura de las plantas

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Bloque	31.54	3	10.51	2.37	0.1383 NS
Periodos	267.28	3	89.09	20.09	0.0003 **
Error	39.92	9	4.44		
Total	338.75	15			

Promedio (cm) = 24
CV (%) = 8.83

**= P < 0.01; NS= P > 0.05

Los resultados del Cuadro 8 en la prueba de comparación de medias de Duncan, aplicada para la variable altura de las plantas, se encontraron dos grupos significativamente diferentes, donde el primer grupo conformado por los días 25 con un valor de 27.54 cm, 20 con un valor de 25.57 cm y 15 con un valor de 25.38 cm mostrando los promedios más altos en la altura de la planta, siendo diferente al segundo grupo que conforma el día 10 con 16.93 cm un promedio bajo, la variación en la altura de la planta se debe a los diferentes días de cosecha.

Cuadro 8. Prueba de Duncan para la altura de las plantas

Periodos de cosecha	Medias	Duncan
25 días	27.54	A
20 días	25.57	A
15 días	25.38	A
10 días	16.93	B

La altura del forraje verde hidropónico de cebada presentó un incremento progresivo en función del periodo de cosecha, alcanzando su mayor valor a los 25 días, con 27,54 cm. Este comportamiento se debe a las condiciones ambientales controladas del sistema FVH, las cuales favorecen un crecimiento continuo y sin estrés, permitiendo que la planta exprese su máximo potencial de desarrollo en cada etapa. A medida que la cebada completa más fases fisiológicas, como la división celular y la elongación de tallos, se incrementa también el aprovechamiento de la humedad, lo que conlleva un mayor crecimiento en altura.

Blanco-Capia *et. al.*, (2019), un estudio realizado en un invernadero del Centro de Investigación y Producción de Animales Menores de la Facultad de Ciencias Agrarias y Naturales de la Universidad Técnica de Oruro, ubicada en la ciudad de Oruro, Bolivia, a una altitud de 3712 msnm, reportaron que, bajo condiciones controladas de temperatura ambiente promedio entre 20 y 26 °C y humedad relativa de 15.9 a 24.4 %, la altura de la planta alcanzó los 23,08 cm a los 10 días. Esta diferencia en la altura del forraje verde hidropónico, en comparación con los resultados obtenidos en el presente experimento, se atribuye principalmente a las características de la semilla utilizada, ya que en ese estudio se empleó semilla de cebada (*Hordeum vulgare* L.) forrajera de la variedad IBTA-80.

Calani (2021), menciona que, en un estudio sobre la producción de forraje verde hidropónico de cebada con la aplicación exclusiva de agua, se obtuvo una altura de planta

de 14,37 cm en 14 días. Al comparar los resultados obtenidos en este experimento fue superior, esta diferencia se debe a las distintas condiciones experimentales, así como a la relación entre el crecimiento y el tiempo, y a la calidad de la semilla utilizada.

Gisbert (2024), en un estudio sobre la producción de forraje hidropónico de cebada con la aplicación de biofertilizante líquido biol en ambiente controlado, afirma que obtuvo una altura de planta de 25,2 cm en 21 días. En comparación, mi investigación fue superior, alcanzando 25,57 cm en solo 20 días, esta diferencia en la altura con los resultados obtenidos en el presente experimento se debe a las condiciones ambientales del lugar y el riego automatizado para no causar estrés hídrico.

4.2.3. Longitud de la raíz

En el Cuadro 9 se puede observar el análisis de varianza para la longitud de la raíz del FVH de cebada, mostró que no hubo diferencias significativas entre los bloques. Sin embargo, se encontraron diferencias significativas entre los períodos de cosecha, lo que evidencia una variación estadísticamente significativa en el desarrollo radicular a lo largo del tiempo. La longitud de la raíz del FVH de cebada en cuatro periodos de cosecha, se obtuvo un CV de 7.54%, lo que indica una variabilidad moderada entre los tratamientos y datos relativamente homogéneos, respaldando la confiabilidad de los datos obtenidos.

Cuadro 9. Análisis de varianza de la longitud promedio de raíz

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Bloque	3.4	3	1.13	1.46	0.2897 NS
Periodos	12.42	3	4.14	5.33	0.022 *
Error	7	9	0.78		
Total	22.82	15			
Promedio (cm) = 11.7					
CV (%) = 7.54					

*= $P < 0.05$; NS= $P > 0.05$

Las comparaciones de medias mediante la prueba de Duncan para la longitud de la raíz en FVH de cebada del Cuadro 10, evidenciaron que los periodos de cosecha de 25 y 20 días presentaron mayor longitud con 12.87 y 12.21 cm, superando ligeramente a los demás tratamientos 15 y 10 días, que registraron valores similares entre sí, entre 10.96 y 10.75 cm. Esta tendencia sugiere que el periodo 25 y 20 días podrían favorecer un mayor desarrollo radicular.

Cuadro 10. Prueba de Duncan para longitud de la raíz

Periodos de cosecha	Medias	Duncan
25 días	12.87	A
20 días	12.21	A
15 días	10.96	B
10 días	10.75	B

La longitud promedio de la raíz de cebada en la producción de forraje verde hidropónico varía en función del periodo de cosecha, alcanzando 12,87 cm a los 25 días y siendo la más baja de 10,75 cm a los 10 días. Esta variación se relaciona con la edad fisiológica de la planta, ya que a medida que la cebada madura, su sistema radicular se desarrolla progresivamente para sostener el aumento de biomasa aérea. Además, se evidenció que una menor incidencia de luz favoreció el crecimiento radicular como mecanismo compensatorio para captar nutrientes del agua. Asimismo, se observó que en las bandejas no se acumuló agua, lo que permitió una adecuada oxigenación en la zona radicular, favoreciendo así un mejor desarrollo de las raíces.

Al respecto Flores (2019), produjo forraje hidropónico de cebada y reportó que el tratamiento V1D3 (variedad IBTA 80 – dosis 30%) alcanzó una longitud máxima de raíz de 12,52 cm. Por otro lado, en la variedad criolla, el tratamiento V2T (variedad criolla – testigo) destacó con una altura de 12,52 cm en 15 días. Este estudio se llevó a cabo en un ambiente controlado en el Centro Experimental de Cota Cota, ubicado en la ciudad de La Paz, a una altitud de 3200 m.s.n.m.

Machaca (2021), reporta en un estudio realizado en el vivero de la empresa Ecopesa EIRL, ubicado en el Distrito Andrés Avelino Cáceres, provincia de Huamanga, Perú. Con su mejor tratamiento de EM-A concentrado activado al 0,25%, muestra mayor tamaño de raíz con un promedio de 8,49 cm. y EM-A al 0,5 % con un promedio de 8,05 cm en 21 días.

Finalmente Limachi (2018), trabajo con la variedad criolla de cebada en la producción de forraje verde hidropónico en la cual aplicó un riego de 0,75 litros de agua por bandeja al día, en toda la etapa del experimento, siendo mejor tratamiento alcanzando un largo de raíz de 10,91 cm en 28 días. Los estudios realizados presentan una diferencia respecto a los datos obtenidos en el presente estudio debido al tiempo de producción difiriéndose en días, de igual forma la diferencia por uso de la variedad mejorada IBTA 80.

4.2.4. Grosor del tallo

De acuerdo a los resultados en el análisis de varianza Cuadro 11 indicó que el factor bloque presentó un efecto estadísticamente no significativo. En cuanto a los periodos de cosecha, no se encontraron diferencias significativas. Se obtuvo un coeficiente de variación (CV) de 3.90%, evidenciando una muy baja variabilidad entre los tratamientos y una alta uniformidad en los datos, lo que respalda la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Cuadro 11. Análisis de varianza del grosor del tallo

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Bloque	0.03	3	0.01	1.64	0.249 NS
Periodos	0.01	3	4.60E-03	0.68	0.5874 NS
Error	0.06	9	0.01		
Total	0.11	15			

Promedio (cm) = 2
 CV (%) = 3.90
 NS= P > 0.05

En el Cuadro 12 se observa los promedios de grosor del tallo, en los diferentes periodos de cosecha. El mayor grosor se registró a los 25 días con 2.14 mm, mientras que el menor se observó a los 10 días con 2.06 mm. Las diferencias entre los valores son mínimas, estos resultados indican que el crecimiento estructural del tallo se estabiliza entre los 15 y 20 días de cultivo.

Cuadro 12. Grosor del tallo del FVH en promedio

Periodos de cosecha	Grosor del tallo en promedio (mm)
25 días	2.14
20 días	2.12
15 días	2.11
10 días	2.06

La uniformidad de estos resultados, evidencia que el grosor del tallo no fue influenciado por el tiempo de cosecha evaluado, se debe principalmente a la interacción de factores como el riego frecuente, las condiciones ambientales y especialmente, la densidad de siembra. Una mayor densidad de semillas puede haber generado competencia de luminosidad donde se ha trabajado solo con 1000 lux, provocando así la formación de tallos delgados.

4.2.5. Rendimiento de FVH

En el Cuadro 13 del análisis de varianza para el rendimiento del FVH de cebada no hay diferencias estadísticamente significativas entre los cuatro periodos de cosecha, lo cual indicando que no influyó de manera contundente en el rendimiento del forraje. Asimismo, el efecto de los bloques fue no significativo. Estos datos reflejan una buena uniformidad experimental. Se obtuvo un coeficiente de variación (CV) de 11.44%. Este nivel de variación sugiere que, los datos son suficientemente consistentes para permitir una comparación confiable.

Cuadro 13. Análisis de varianza del rendimiento del FVH

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Bloque	71.19	3	23.73	3.23	0.0749 NS
Periodos	48.19	3	16.06	2.19	0.1591 NS
Error	66.06	9	7.34		
Total	185.44	15			

Promedio (kg/m²) = 23.69
 CV (%) = 11.44
 NS= P > 0.05

Los promedios para el rendimiento de FVH de cebada se evidencia en el Cuadro 14, dónde el mayor promedio de biomasa fue a los 25 días 25.25 kg/m², seguido a los 20 días 24.5 kg/m², a los 15 días 24.25 kg/m² y el bajo rendimiento a los 10 días 20.75 kg/m². Sin embargo, entre los 15 y 25 días las diferencias fueron menores, lo que sugiere que a partir de los 15 días el crecimiento del FVH comienza a estabilizarse.

Cuadro 14. Rendimiento de FVH en promedio

Periodos de cosecha	Rendimiento en promedio (kg/m²)
25 días	25.25
20 días	24.5
15 días	24.25
10 días	20.75

Aunque no se observaron diferencias significativas entre los distintos periodos de cosecha, se puede concluir que, a medida que se prolonga el tiempo de cultivo, los rendimientos tienden a estabilizarse entre los 15 y 25 días. Esto se debe a que las plantas disponen de

más tiempo para desarrollarse, realizar fotosíntesis y absorber nutrientes presentes en el agua. Sin embargo, prolongar el periodo de cosecha también implica un mayor manejo, incremento en costos y otras variables que deben considerarse. Por ello, estos resultados permiten generar recomendaciones prácticas y sostenibles para los pequeños agricultores de la región.

Vilcara y Pampa (2023), al trabajar con la producción de forraje hidropónico de cebada, reportan que con 30 kg de semilla obtuvieron 214,8 kg de forraje verde, lo que representa un índice de conversión de 1 a 7,16 veces su masa. Este rendimiento incluyó raíces, tallos, hojas y restos de semillas, utilizando únicamente agua y una densidad de siembra de 3 kg/m² durante un periodo de 15 días. La diferencia con los resultados obtenidos en el presente estudio podría atribuirse, principalmente, a la variación en la densidad de siembra y en la disponibilidad de la luminosidad.

Blanco-Capia *et al.*, (2019), reportaron un rendimiento de materia verde de 25,1 kg/m² en la producción de forraje hidropónico de cebada variedad IBTA-80, utilizando una densidad de siembra de 10 kg de semilla/m² y un periodo de crecimiento de 10 días, obtuvieron un rendimiento de 25.1 kg/m². esta diferencia comparada con la presente investigación es el uso de semilla mejorada y certificada.

Condori (2015), trabajó también con la variedad IBTA-80, obteniendo rendimientos de 14,3 kg/m² en 15 días, 17,5 kg/m² en 20 días y 18,2 kg/m² en 25 días. En el mismo estudio, al emplear la variedad criolla de cebada, los rendimientos fueron menores: 10,5 kg/m² a los 15 días, 14,0 kg/m² a los 20 días y 14,3 kg/m² a los 25 días.

Finalmente, Tumiri (2018), en un estudio realizado en la Estación Experimental de Choquenaira de la UMSA sobre forraje de cebada variedad IBTA-80 cultivada en campo abierto y con la aplicación de tres niveles de biol de bovino en dos cortes, señala que el mayor rendimiento de materia verde se obtuvo en el tratamiento T3 con un promedio de 3 kg/m², correspondiente al 50 % de biol, durante el primer corte. El autor destaca que, en el primer corte, se obtuvo el mayor rendimiento cuando las plantas presentaban entre un 10 y 15 % de grano lechoso, a los 120 días de crecimiento.

4.2.6. Rendimiento de FVH en materia seca

Para el rendimiento de forraje verde hidropónico de cebada en materia seca, el análisis de varianza del Cuadro 15 evidenció diferencias no significativas entre los bloques, lo cual sugiere una adecuada homogeneidad entre las repeticiones. Por otro lado, entre los periodos de cosecha se mostraron diferencias significativas. Se expresa un coeficiente de variación de 19.86%, lo que indica una variabilidad moderada entre los tratamientos.

Cuadro 15. Análisis de varianza del rendimiento de FVH en materia seca

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Bloque	1	3	0.33	1.11	0.3941 NS
Periodos	3.62	3	1.21	4.04	0.0448 *
Error	2.69	9	0.3		
Total	7.3	15			

Promedio (kg/m²) = 2.8
CV (%) = 19,86

*= P < 0.05; NS= P > 0.05

Para el rendimiento de FVH de cebada en materia seca del Cuadro 16 en comparación de medias de Duncan, revelo diferencias significativas entre los periodos de cosecha, destacando el tratamiento de 20 días con el mayor rendimiento de 3.55 lo que hace reflejar superior al resto de los periodos de cosecha 10, 15 y 25 días. Estos resultados permiten afirmar que la elección del periodo de cosecha es un factor determinante para optimizar el rendimiento en materia seca del FVH de cebada.

Cuadro 16. Prueba de Duncan para el rendimiento de FVH en materia seca en kg/m²

Periodos de cosecha	Medias	Duncan
20 días	3.55	A
15 días	2.6	B
10 días	2.6	B
25 días	2.3	B

El rendimiento de materia seca del FVH de cebada, en la presente investigación reflejo mayor rendimiento a los 20 días con 3.55 kg/m², esto se debe a que el FVH de cebada alcanzo su punto óptimo de desarrollo fisiológico, en el cual acumularon la mayor cantidad de biomasa.

Mientras que el rendimiento de MS a los 25 días tuvo menor rendimiento con 2.3 kg/m². Esta disminución se debe a procesos de senescencia, donde las hojas comenzaron a amarillarse, degradarse esto hizo que baje la calidad del FVH como el contenido de agua. Además, al prolongarse el periodo de cultivo, hay mayor competencia de nutrientes, agotamiento de reservas.

Gisbert (2024), presenta una investigación realizada en los predios del Instituto Tecnológico Coaba-Soraa, ubicado en la comunidad de Chejje, municipio de Sorata, provincia Larecaja del departamento de La Paz, a una altitud de 2699 msnm Los resultados demostraron que el tratamiento con humato obtuvo un rendimiento destacado de 20,47 t/ha en materia seca.

Urresta (2019), reporta una investigación realizada en la parroquia Los Ceibos, cantón Ibarra, provincia de Imbabura, específicamente en el barrio 20 de octubre, a una altitud de 2120 msnm. En este estudio, el tratamiento T4, que empleó la solución nutritiva recomendada por la FAO, alcanzó el mayor rendimiento en materia seca con 1,94 kg/m². Le siguió el tratamiento T3, que utilizó solución nutritiva con biol y una reducción del 25 % de nitrógeno, obteniendo 1,51 kg/m². Ambos resultados se lograron en un periodo de 16 días utilizando semilla criolla de la zona.

Finalmente Tambo *et al.*, (2016), reportaron que el mayor rendimiento en materia seca se obtuvo con el tratamiento 1, alcanzando 6,71 t/ha mediante la aplicación de 50 % de biol. Por otro lado, el tratamiento testigo que consistió únicamente en riego con agua, presentó un rendimiento de 3,13 t/ha en MS. Este experimento se desarrolló bajo un sistema de cultivo tradicional a campo abierto, durante la época normal de siembra en las regiones de adaptación del cultivo.

Los resultados obtenidos evidencian que el sistema hidropónico posee una elevada eficiencia en el rendimiento de materia seca, ya que en el presente estudio se ha logrado alcanzar 3,55 kg/m² en el tratamiento 3. Estas cifras representan incrementos sustanciales, duplicando e incluso triplicando el mayor rendimiento registrado bajo condiciones de cultivo tradicional en campo abierto.

4.2.7. Medición de grados Brix (°Bx)

Los grados Brix relacionados a los diferentes órganos, hay una mayor concentración de sólidos solubles totales en las hojas y en los periodos más tempranas.

4.2.7.1. °Bx de la hoja

El análisis de varianza del Cuadro 17 realizado para los grados Brix en hoja de forraje verde hidropónico de cebada muestra que los bloques no presentó diferencias significativas, lo que sugiere que la variabilidad entre bloques fue mínima. El factor de los periodos de cosecha tuvo un efecto altamente significativo sobre el contenido de sólidos solubles totales. El coeficiente de variación 12.71% refleja una variabilidad intermedia dentro del experimento, considerada aceptable para la medición fisiológica realizada.

Cuadro 17. Análisis de varianza de °Bx de la hoja

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Bloque	1.07	3	0.36	2.46	0.1296 NS
Periodos	14.76	3	4.92	33.97	<0.0001 **
Error	1.3	9	0.14		
Total	17.13	15			

Promedio (°Bx) = 3
CV (%) = 12.71

**= P < 0.01; NS= P > 0.05

La comparación de medias del Cuadro 18 mediante la prueba de Duncan para los grados Brix en hoja de FVH de cebada, reflejo diferencias entre los periodos de cosecha. El mayor contenido de sólidos solubles totales se registró a los 10 días de cosecha con 4.51 °Bx, superando significativamente a los demás tratamientos. Los periodos de 15 y 20 días presentaron valores intermedios de 3 y 2.58, agrupándose en el mismo grupo, sin diferencias entre sí. Finalmente, el periodo de 25 días mostró el valor más bajo 1.89 °Bx. Lo que indica diferencias marcadas entre los cuatro periodos evaluados, demostrando que el contenido de grados Brix en hoja está fuertemente influenciado por el momento de cosecha.

Cuadro 18. Prueba de Duncan para el °Bx de la hoja

Periodos de cosecha	Media	Duncan
10 días	4.51	A
15 días	3	B
20 días	2.58	B
25 días	1.89	C

Estos resultados se deben a que los grados Brix en la hoja disminuye progresivamente con el avance de los días, siendo el periodo de 10 días el más adecuado para obtener un forraje con mayor concentración de sólidos solubles totales. Ya que en los primeros días después del crecimiento, las hojas acumulan más azúcares solubles debido a la fotosíntesis activa y menos redistribución hacia otros órganos.

Cardona *et al.*, (2022), afirman que, en un estudio realizado entre 2018 y 2019, se evaluó el efecto de la edad de cosecha en tres especies forrajeras establecidas en un banco forrajero mixto. Los resultados mostraron que, a menor edad de corte, la concentración de grados Brix fue mayor.

4.2.7.2. °Bx del tallo

El Cuadro 19, para análisis de varianza de los grados Brix del tallo, ilustra que el factor bloque no presentó efecto significativo. Por otro lado, los periodos de cosecha influyeron de manera altamente significativa entre los tratamientos. El coeficiente de variación obtenido fue de 23.32% lo que indica que los datos obtenidos son confiables y que se encuentra dentro del rango.

Cuadro 19. Análisis de varianza de °Bx del tallo

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Bloque	0.12	3	0.04	0.11	0.9535 NS
Periodos	8.65	3	2.88	7.7	0.0074 **
Error	3.37	9	0.37		
Total	12.14	15			

Promedio (°Brix) = 2.6

CV (%) = 23.32 %

**= P < 0.01; NS= P > 0.05

La comparación de medias para los grados Brix en el tallo del Cuadro 20, mostró diferencias significativas entre los periodos de cosecha evaluados. El mayor contenido de sólidos solubles totales se observó a los 10 días de cosecha 3.77 °Bx. Mientras en los periodos de 15, 20 y 25 días, con valores de 2.7, 2.23 y 1.8 °Bx, no presentaron diferencias.

Cuadro 20. Prueba de Duncan para el °Bx del tallo

Periodos de cosecha	Media	Duncan
10 días	3.77	A
15 días	2.7	B
20 días	2.23	B
25 días	1.8	B

Los grados Brix del tallo, se observó que el periodo de cosecha a los 10 días obtuvo, un mayor promedio de los demás, esto se debe que entre los 10 días el tallo actúa como un órgano de reserva temporal, antes de ser distribuidos a los diferentes órganos, lo que permite concluir que el periodo de cosecha es un factor determinante en la concentración de grados Brix en el tallo del forraje verde hidropónico de cebada.

Corrales (2020), afirma que el FVH de cebada presentó una mayor concentración de azúcares en los tallos, alcanzando 1,03 °Bx cuando fue cosechado a los 12 días. El estudio de la producción se llevó a cabo en el centro poblado Nuevo Mocce, Lambayeque, empleando una solución nutritiva A y B, con una densidad de siembra de 3 kg/m².

4.2.7.3. °Bx de la semilla

Para el forraje verde hidropónico de cebada, el análisis de varianza para los grados Brix de la semilla del Cuadro 21 muestra, que entre los bloques no hubo significancia. En cambio, los periodos de cosecha presentaron un efecto altamente significativo. El coeficiente de variación registrado fue de 27.51%, lo cual representa una alta variabilidad en los datos, pero aceptable dentro del rango establecido.

Cuadro 21. Análisis de varianza de °Bx de la semilla

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Bloque	0.48	3	0.16	0.73	0.5577 NS
Periodos	6.73	3	2.24	10.27	0.0029 **
Error	1.96	9	0.22		
Total	9.17	15			

Promedio (°Bx) = 1.7
CV (%) = 27.51 %

**= P < 0.01; NS= P > 0.05

El Cuadro 22 muestra la comparación de medias mediante la prueba de Duncan para los grados Brix en la semilla de forraje verde hidropónico de cebada, evidenció diferencias significativas entre los periodos de cosecha evaluados. El mayor contenido de azúcares solubles se registró en el periodo de 10 días 2.79 °Bx, diferenciándose al resto de los tratamientos de los periodos 15, 20 y 25 días, con valores de 1.48, 1.44 y 1.09 grados Bx respectivamente, no presentaron diferencias significativas.

Cuadro 22. Prueba de Duncan para el °Bx de la semilla

Periodos de cosecha	MEDIA	DUNCAN
10 días	2.79	A
15 días	1.48	B
20 días	1.44	B
25 días	1.09	B

Los grados Brix en la semilla, ha reflejado que a los 10 días hay mayor concentración de sólidos solubles totales, esto se debe, que a los 10 días permanece azúcares simples en la semilla antes de ser distribuidos para el crecimiento de la planta. Durante la germinación, la semilla activa enzimas amilolíticas que degrada en fragmentos el almidón acumulado en azúcares solubles, que se concentran temporalmente en la semilla por los primeros días.

Martínez (2022), afirma que durante la germinación, la semilla activa enzimas amilolíticas, principalmente α -amilasa y β -amilasa, que degradan el almidón acumulado en fragmentos más pequeños, como maltosa y glucosa. Estos azúcares solubles y transportables se concentran temporalmente en la semilla para nutrir al embrión y favorecer el desarrollo inicial de la planta.

4.2.7.4. °Bx de la raíz

El Cuadro 23 refleja el análisis de varianza para los grados Brix en la raíz, muestra que el efecto del bloque no fue significativo. Sin embargo, los periodos de cosecha presentaron un efecto altamente significativo sobre grados Brix en la raíz. El coeficiente de variación obtenido fue de 20.24%, lo cual representa una variabilidad considerable.

Cuadro 23. Análisis de varianza de °Bx de la raíz

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Bloque	0.28	3	0.09	1.69	0.2383 NS
Periodos	2.65	3	0.88	16.01	0.0006 **
Error	0.5	9	0.06		
Total	3.42	15			

Promedio (°Bx) = 1.16
 CV (%) = 20.24 %

**= P < 0.01; NS= P > 0.05

Para los grados Brix de la raíz mediante la prueba de Duncan del Cuadro 24, mostró diferencias significativas entre los periodos de cosecha evaluados. El mayor contenido de azúcares solubles se registró en el periodo de 10 días 1.82 °Bx, diferenciándose del resto de los tratamientos. Por otro lado, los periodos de 15, 20 y 25 días, con valores de 1.15, 0.91 y 0.76 grados Brix no presentaron diferencias.

Cuadro 24. Prueba de Duncan para el °Bx de la raíz

Periodos de cosecha	MEDIA	DUNCAN
10 días	1.82	A
15 días	1.15	B
20 días	0.91	B
25 días	0.76	B

En la medición de grados Brix en la raíz, como se puede observar, a los 10 días presento mayor promedio, donde por la movilización temprana de azúcares hacia la raíz desde la semilla, se almacena temporalmente como fuente energética para su elongación.

Corrales (2020), reporta que el FVH de cebada presentó su mayor concentración de azúcares en la raíz, alcanzando 0,92 °Bx cuando fue cosechado a los 12 días. El estudio se desarrolló en el centro poblado de Nuevo Mocce, Lambayeque, utilizando solución nutritiva A y B, y una densidad de siembra de 3 kg/m².

4.2.8. Análisis económico

Se realizó el análisis económico donde se evaluó los costos de producción para cada tratamiento, el parámetro utilizado fue la relación Beneficio/Costo y el cálculo se realizado fue en bolivianos.

4.2.8.1. Costos fijos

En el Anexo 21. Observamos los costos fijos de producción, asociados a la instalación y equipamiento del sistema de forraje verde hidropónico de cebada automatizado. Los costos se calcularon por metro cuadrado (Bs/m²), para ser distribuidos equitativamente entre los cuatro tratamientos (T1, T2, T3 y T4), cada uno con un costo fijo total de Bs 64.

4.2.8.2. Costos variables

Para realizar los variables se tomó en cuenta todos los materiales utilizados en la investigación por cada tratamiento en la producción de FVH.

El Anexo 22, muestra el análisis de los costos variables para la producción de forraje verde hidropónico de cebada, se identificaron cuatro componentes principales: semilla de cebada, hipoclorito de sodio, electricidad y agua, alcanzando un costo total de Bs 107.6. La distribución de estos costos varía entre los tratamientos, principalmente por el consumo de electricidad y agua.

4.2.8.3. Relación de B/C

Se realizó el análisis económico con el fin de identificar los tratamientos que mayores beneficios económicos puedan otorgar a los productores de forraje verde hidropónico. Todos los datos fueron calculados de los rendimientos obtenidos en cada tratamiento, con las ventajas obtenidas de cada uno de los tratamientos.

El Cuadro 25, muestra la relación de beneficio/costo para cuatro tratamientos (T1, T2, T3 y T4), tomando en cuenta el costo total de producción en bolivianos (Bs), el rendimiento en kilogramos, el precio de venta por kilogramo 6 Bs, y el ingreso bruto, calculado como producto del rendimiento por el precio.

Cuadro 25. Relación de beneficio costo

TRATAMIENTOS	COSTO BS	T1	T2	T3	T4
Costo total	363.63	91.9	96.4	101.0	110.5
Rendimiento		20.8	24.3	24.5	25.3
Precio*kg	6	6	6	6	6
I.B.=R*P		124.5	145.5	147	151.5
Beneficio/costo		1.36	1.51	1.46	1.37

Cada tratamiento presenta un costo creciente, desde 91.9 Bs en T1 hasta 110.5 Bs en T4. Paralelamente, se observa un aumento en el rendimiento, desde 20.8 kg en T1 hasta 25.3 kg en T4. Si bien el precio por kilogramo es constante de 6 Bs, los ingresos brutos varían según el rendimiento, siendo mayor en los tratamientos con mayor producción.

La relación beneficio/costo revela que T2 presenta la mayor rentabilidad económica en la producción de FVH de cebada, con un valor de 1.51, lo que indica que por cada boliviano invertido se obtiene un retorno de 0.51 Bs. Le siguen T3 (0.46), T4 (0.37) y T1 (0.36).

5. CONCLUSIONES

Según los objetivos planteados y los resultados obtenidos en el presente estudio, nos permite sustentar las siguientes conclusiones:

- El porcentaje de germinación de la investigación, evidenció un promedio del 95.5%, adecuado para una producción eficiente de FVH, superando ampliamente el mínimo requerido que es el 75%. A los 25, 20 y 15 días se alcanzaron las mayores alturas del FVH de cebada, con valores en promedio 27.54, 25.57 y 25.38 cm, donde no son significativamente diferentes, pero si en los valores. Los resultados referentes para la longitud de la raíz en FVH de cebada, la mayor longitud radicular presentó a los 25 y 20 días con promedios 12.87 y 12.21 cm. En cuanto al grosor del tallo en los diferentes periodos de cosecha, no se ha encontrado diferencias significativas, mostrando valores en promedio con diferencias mínimas, como el mayor grosor del tallo se observó a los 25 días con 2.14 mm y el menor a los 10 días con 2.06 mm, estos resultados fue influenciado por la mayor densidad de semillas que genero competencia de luminosidad donde se ha trabajado solo con 1000 lux, provocando así la formación de tallos delgados.
- De acuerdo a los rendimientos obtenidos de forraje verde hidropónico de cebada, a los 25 días se alcanza el mayor peso con 25.25 kg/m², seguido el 20 y 15 día con valores similares desde 24.5 a 24.25 kg/ m², y el bajo a los 10 días 20.75 kg/m². Todos estos resultados son muy importantes desde el punto de vista de las ventajas comparativas con relación a los sistemas de producción tradicional, lo que hace que la hidroponía es una alternativa muy viable en lugares con bajos recursos, principalmente la falta de agua o épocas de sequías. El rendimiento en materia seca, se obtiene a los 20 días con 3.55 kg/m², alcanza su punto óptimo de desarrollo fisiológico, en el cual acumula la mayor cantidad de biomasa. Este resultado evidencia que el sistema hidropónico posee una elevada eficiencia en el rendimiento de materia seca, donde representa incrementos sustanciales, duplicando e incluso triplicando el mayor rendimiento registrado bajo condiciones de cultivo tradicional en campo abierto.
- En cuanto los grados brix relacionados a los diferentes órganos del forraje verde hidropónico de cebada, hay una mayor concentración de solidos solubles totales en las hojas y en los periodos más tempranas. A los 10 días de cosecha se concentra 4.51

°Bx en la hoja, mientras el contenido de sólidos solubles totales en el tallo es 3.77 °Bx a los 10 días de cosecha, en la semilla se concentra 2.79 °Bx a los 10 días de cosecha y en el periodo de cosecha día 10 se concentra 1.82 °Bx en la raíz.

- Respecto al análisis económico, se tiene mayor relación Beneficio/Costo cuando se cosecha a los 15 días en el cual se obtiene un B/C de 1.51 Bs, superando a los demás periodos de cosecha. El tratamiento 2 es el que se debe tomar en cuenta ya que económicamente supera a los demás tratamientos porque muestra mayor rentabilidad en la producción de FVH de cebada, donde por 1 bs invertido se gana 0.51 ctvs.
- En base al análisis estadístico realizado, se rechaza parcialmente la H_0 , ya que, de las diez variables evaluadas, siete presentaron diferencias significativas entre los cuatro periodos de cosecha del FVH de cebada. Entre las variables agronómicas, la altura de planta y la longitud de raíz mostraron diferencias significativas, mientras que el porcentaje de germinación y el grosor del tallo no fue significativo. En cuanto a las variables de rendimiento, el rendimiento de materia seca fue significativo, a diferencia del rendimiento del FVH que no presento significancia. Finalmente, en las variables de grados Brix, la hoja, tallo, semilla y raíz se observaron diferencias significativas.

6. RECOMENDACIONES

En base a los objetivos, resultados y conclusiones del presente trabajo, se pueden formular las siguientes recomendaciones:

- Se recomienda realizar la cosecha del FVH de cebada a los 15 días, debido a que en este periodo contiene mayor contenido de sólidos solubles, rendimiento 24.25 kg/m² y un beneficio costo de 1.51 bs.
- Se recomienda seguir realizando investigaciones con otras especies gramíneas como trigo, avena, centeno, triticale, o maíz, que se utilicen la medición de grados brix para saber la potencialidad del forraje en la palatabilidad.
- Se recomienda construir los estantes con pisos a una altura de 50 cm, ya que la planta de FVH alcanzó una altura máxima de hasta 32 cm. Esta distancia facilita que el nebulizador riegue todas las bandejas.
- Se recomienda realizar investigaciones con la instalación de riego automatizado con retorno, para optimizar el uso sostenible del agua en la producción de FVH.
- Se recomienda construir los estantes y bandejas con materiales de segunda mano, para reducir costos de producción.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Abarca, P.;Aguirre, C.;Silva, L.;Mora, D. y Carrasco, J. 2016. Capítulo 7. Producción de forraje verde hidropónico para la pequeña agricultura. Chile, Boletín INIA N° 321 Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Consultado 25 feb. 2025. Disponible en https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/forraje_hidroponico/54-inia.pdf
- Abarca, P.;Aguirre, C. y Silva, L. 2020a. Capítulo 10. Producción de forraje verde hidropónico para la pequeña agricultura. O'Higgins-Chile, Instituto de Investigaciones Agropecuarias. 145-171 p. Consultado 25 feb. 2025. Disponible en <https://biblioteca.inia.cl/server/api/core/bitstreams/e98e53c6-92c2-4227-92f5-2f0eda4d17e7/content>
- Abarca, P.;Aguirre, C. y Torres, A. 2020b. Construcción de estructura de madera para producir forraje verde hidropónico. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. (37): 8. Consultado 27 feb. 2025. Disponible en <https://biblioteca.inia.cl/server/api/core/bitstreams/6a25d46c-5749-4c95-b9bc-b0d93a0e5c46/content>
- Arias, M.;Curasma, J.;Cordero, A.;Contreras, J.;Mayhua, P. y Vilcapaza, L. 2024. Harvest times on the nutritional value of hydroponic green barley forage. Revista De Investigaciones Veterinarias Del Perú. 35(5): 15. Consultado 10 jun. 2025. Disponible en <https://doi.org/10.15381/rivep.v35i5.25129>
- Arif, M.;Khalaf, Q. A. W.;Rehman, A. U.;Hussain, S. M.;Almohmadi, N. H.;Al-Baqami, N. M.;Abd El-Hack, M. E.;Kamal, M.;Tharwat, M. y Swelum, A. A. 2023. Effects of feeding maize hydroponic fodder on growth performance, nitrogen balance, nutrient digestibility, hematology, and blood metabolites of water buffalo calves. Place Published, (12): 1607-1613. Consultado 28 nov. 2024. Disponible en <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10824088/pdf/OpenVetJ-13-1607.pdf>
- Bedolla-Torres, M.;Palacios, A.;Palacios, O.;Choix, F.;Ascencio, F.;López, D.;Espinoza, J.;Luna, R.;Guillen, A.;Avila, N. y Ortega, R. 2015. La irrigación con levaduras incrementa el contenido nutricional del forraje verde hidropónico de maíz. Revista Argentina de Microbiología. Place Published, 236-244. Consultado 28 nov. 2024. Disponible en <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8167516/pdf/Vetworld-14-841.pdf>
- Birgi, J.;Gargaglione, V. y Utrilla, V. 2018. El forraje verde hidropónico como una alternativa productiva en Patagonia Sur: Productividad y calidad nutricional de dos variedades de cebada (*Hordeum vulgare*). Revista de Investigaciones Agropecuarias. 44(3): 316-323. Consultado 10 jun. 2025. Disponible en <https://www.redalyc.org/journal/864/86458368004/html/>

- Blanco-Capia, L.; Colque-Pérez, H. y Rosales-Mendoza, M. 2019. Producción de forraje verde hidropónico versus geopónico de cebada (*Hordeum vulgare* L.) en ambientes controlados. Selva Andina Biosphere. 7(2): 109-117. Consultado 25 feb. 2025. Disponible en http://www.scielo.org.bo/pdf/jsab/v7n2/v7n2_a05.pdf
- Calani, R. 2021. Aplicación de promotores naturales de crecimiento en el cultivo de cebada (*Hordeum vulgare* L.) como forraje verde hidropónico. Tesis Ing. Agr. La Paz, Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés. 58 p. Consultado 10 abr. 2025. Disponible en <https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/25611/T-2824.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Cantuca, F.; Moncayo, J. y Cerón, S. 2024. Sistema automatizado para una producción de forraje verde hidropónico en invernadero. Tesis Ingeniero Mecatrónico. San Juan de Pasto. Universidad Mariana. 88 p.
- Cardona, J.; Castro, E. y Suárez, E. 2022. Los grados brix como herramienta para determinar el potencial nutricional en forrajes. 1 ed. Colombia, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (agrosavia). en línea. Consultado 10 jun. 2025. Disponible en https://www.agrosavia.co/media/euxjm4ms/los-grados-brix-como-herramienta-para-determinar-el-potencial-nutricional-en-forrajes.pdf?utm_source=chatgpt.com
- Castillo, F.; Pérez, E.; Magaña, E. y Gómez, J. 2013. Producción de forraje hidropónico de trigo y cebada y su efecto en la ganancia de peso de borregos. Consultado 10 jun. 2025. Disponible en <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:170598332>
- Castrejón, M.; De La Cruz, J.; Mendoza, V.; Sumarriva-Bustinza, L.; De La Cruz-Rojas, L.; More, J.; Espinoza-Quispe, C.; Rojas-Felipe, E.; Caira Mamani, C. y Yaulilahua-Huacho, R. 2023. Effect of rhizobium and gibberellin on the production of hydroponic green forage of red clover (*Trifolium pratense* L.) variety quiñequeli. Brazilian journal of biology. 83(274345): 9. Consultado 25 feb. 2025. Disponible en <https://doi.org/10.1590/1519-6984.274345>
- Céspedes, R. 2021. Evaluación de la productividad y la calidad nutritiva de la cebada (*Hordeum vulgare*) como forraje verde, con aplicación de riego y biol en la estación experimental choquenaira. Tesis Maestría en Ciencias. La Paz – Bolivia Universidad Mayor de San Andrés. 73 p. Consultado 25 feb. 2025. Disponible en <https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/29737/TM-3038.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Condori, C. 2015. Evaluación de tres periodos de cosecha en dos variedades de cebada (*Hordeum vulgare* L.) para la producción de forraje verde hidropónico, en la localidad de Chuquiaguillo. Tesis Ing. Agr. . La Paz, Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés. 108 p.

- Corona, L. 2011. Producción de forraje verde en la mixteca poblana una alternativa nutricional para la época de sequía. Sistema Estatal de Extensionismo Rural, Secretaría de Desarrollo Rural del Estado de Puebla. Consultado 25 feb. 2025. Disponible en https://www.engormix.com/lecheria/forraje-verde-hidroponico/produccion-forraje-verde-mixteca_a28712/
- Corrales, N. 2020. Edad de cosecha y concentración de azúcar en el Germinado Hidropónico de cebada (*Hordeum vulgare*) en Lambayeque. Tesis Ing. Zoot. Lambayeque, Perú. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. 54 p.
- Elizondo, J. 2005. Forraje verde hidropónico: Una alternativa para la alimentación animal. ECAG-Infoma. (32): 36-39. Consultado 25 feb. 2025. Disponible en <https://ia904502.us.archive.org/17/items/manualzilla-id-6208381/6208381.pdf>
- FAO. 2001a. Métodos y factores que influyen en la producción de forraje verde hidropónico. 24. Consultado 25 jun. 2025. Disponible en <https://www.fao.org/4/ah472s/ah472s01.pdf>
- FAO. 2001b. Forraje verde hidropónico. Manual técnico. Oficina regional de la FAO para América Latina y el Caribe. 4. Consultado 10 abr. 2025. Disponible en http://www.fao.org/tempref/GI/Reserved/FTP_FaoRlc/old/prior/segalim/pdf/2.pdf
- FAO. 2024. Forraje Verde Hidropónico, manual técnico. InfoAgronomo. 55. Consultado 20 feb. 2025. Disponible en <https://infoagronomo.net/forraje-verde-hidroponico-fvh/#2-1-selecci%C3%B3n-de-semillas->
- Flores, S. 2019. Aplicación de abono orgánico líquido aeróbico en la producción de forraje verde hidropónico en dos variedades de cebada (*Hordeum vulgare* L.) en el centro experimental de Cota Cota. Tesis Ing. Agr. La Paz, Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés. 97 p. Consultado 10 abr. 2025. Disponible en <https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/20532/T-2636.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ghazi, N. y Al-Hashimi, M. 2011. Green Fodder Production and Water Use Efficiency of Some Forage Crops under Hydroponic Conditions. International Scholarly Research Notices. Consultado 10 jun. 2025. Disponible en <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.5402/2012/924672>
- Gisbert, V. 2024. Evaluación del cultivo de cebada (*Hordeum vulgare* L.) como forraje hidropónico, bajo un sistema de riego automatizado con tres diferentes fertilizantes líquidos. Tesis Título de Magister. La Paz, Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés. 54 p. Consultado 25 feb. 2025. Disponible en <https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/40381/TM-3338.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- González, S.;Viega, L.;Beretta, B.;Augusto, M. y Rossi, C. 2019. Efecto de la temperatura y la precipitación durante el llenado de grano sobre la dormición y sensibilidad al agua en granos de cebada (*Hordeum vulgare* L.). *AgriScientia*. 36(2): 19-27. Consultado 10 jun. 2025. Disponible en <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/agris/article/view/21867>
- Google-Earth. 2025. Estación Experimental de Kallutaca, La Paz, Bolivia. Google. en línea. Consultado 25 jun. 2025. Disponible en <https://earth.google.com/>
- Hernandez, R. 2024. Guía: Condiciones ambientales para la producción de FVH. Consultado 25 feb. 2024. Disponible en https://www.hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?id=128&main_page=page
- Hernández, R. 2024a. Guía: ¿Qué es el Forraje Verde Hidropónico? Hydro Environment-Inovación Agrícola. Consultado 25 feb. 2025. Disponible en <https://hydroenv.com.mx/id125/>
- Hernández, R. 2024b. Manual de Forraje Verde Hidropónico con Trigo: Todo en 8 Pasos. Consultado 10 jun. 2025. Disponible en <https://hydroenv.com.mx/id126/>
- INTAGRI. 2017. La Hidroponía: Cultivos sin Suelo. México. Serie Horticultura Protegida. Disponible en <https://www.intagri.com/articulos/horticultura-protegida/la-hidroponia-cultivos-sin-suelo>
- Jalina, C. y Palacio, Y. 2019. Evaluación del efecto productivo del forraje verde hidropónico de maíz y sorgo a tres densidades de siembra y su efecto sobre el comportamiento productivo en cabras en el CNIA-INTA, 2018. Tesis Ing. Agrícola. Managua, Nicaragua. Universidad Nacional de Ingeniería. 84 p. Consultado 26 feb. 2025. Disponible en <https://core.ac.uk/download/pdf/336876926.pdf>
- Jiménez, J. 2021. Condiciones Ambientales Óptimas para Producción de Forraje Verde Hidropónico como Alternativa de Solución para las Épocas de Heladas. Tesis Ing. Lima, Perú. Universidad César Vallejo. 54 p. Consultado 28 abr. 2025. Disponible en https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/79387/Jimenez_BJE-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Khaziev, D.;Gadiev, R.;Yusupova, C.;Kazanina, M. y Kopylova, S. 2021. Effect of hydroponic green herbage on the productive qualities of parent flock geese. *Veterinary World*. 14(4): 841-846. Consultado 25 jun. 2025. Disponible en <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8167516/pdf/Vetworld-14-841.pdf>
- Ledo, J. 2008. Forraje verde hidropónico. La Violeta. 12. Consultado 28 nov. 2024. Disponible en <https://www.cifumss.agro.bo/files/forrajeverdehidropnico.pdf>

- Limachi, J. 2018. Evaluación de tres niveles de biol aplicada a la producción de forraje hidropónico, en avena (*Avena sativa* L.) y cebada (*Hordeum vulgare* L.) en ambiente aatemperado. Tesis Ing. Agr. La Paz, Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés. 32 p. Consultado 10 abr. 2025. Disponible en <https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/18495/T-2569.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Machaca, R. 2021. Efecto de tres concentraciones de microorganismos eficaces en el cultivo de forraje verde hidropónico de *Triticum aestivum* "trigo", *Hordeum vulgare* "cebada" y *Zea mays* "maíz". Ayacucho - 2019. Tesis Bióloga, en la especialidad de ecología y recursos naturales. Ayacucho, Perú. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. 84 p. Consultado 10 abr. 2025. Disponible en <https://repositorio.unsch.edu.pe/server/api/core/bitstreams/a4e7b531-d9c3-4794-a030-a80b8247c8c6/content>
- MacNeil, C. 2024. Desmitificación del análisis de costo-beneficio: 5 pasos para tomar mejores decisiones. asana. Disponible en <https://asana.com/es/resources/cost-benefit-analysis>
- Mariño, C. 2022. Evaluación de dos productos desinfectantes para la producción de forraje verde hidropónico de avena (*avena sativa* L.) en el sector san pedro del cantón cevallos. Tesis Ing. Agr. Cevallos. Universidad Técnica de Ambato. 57 p. Consultado 20 feb. 2025. Disponible en <https://repositorio.uta.edu.ec/server/api/core/bitstreams/9106f4a8-97be-491b-ad93-3ca76fdf2163/content>
- Martinez, F. 2019. Forraje Verde Hidropónico (F.V.H) Para La Alimentación De Animales. Consultado 25 feb. 2025. Disponible en <https://infopastosyforrajes.com/suplementacion/forraje-verde-hidroponico/#comments>
- Martínez, M. 2022. Evaluación de parámetros bioquímicos relacionados con localidad maltera en 12 líneas comerciales de cebada cervecera (*Hordeum vulgare*). Tesis Ing. Agr. . Viedma, Río Negro. Universidad Nacional de Río Negro. 46 p. Consultado 28 jun. 2025. Disponible en http://rid.unrn.edu.ar:8080/bitstream/20.500.12049/9173/1/Martinez_D%C3%ADaz_Mar%C3%ADa_Eugenia-2022.pdf#page=37.09
- Melgarejo, L. 2010. Experimentos en Fisiología y Bioquímica Vegetal. 1 ed. Colombia, Universidad Nacional de Colombia. 277 p. Consultado 10 abr. 2025. Disponible en <https://www.uv.mx/personal/tcarmona/files/2019/02/Melgarejo-2010.pdf>
- Nina, E. y Fernández, C. 2017. Uso de dos métodos de producción bajo tres densidades de siembra en el cultivo verde hidropónico de cebada (*Hordeum vulgare* L.) en carpa solar. Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales. 4(2): 48-55. Consultado 25 feb. 2025. Disponible en http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2409-16182017000200007

- Ornelas, J. 2023. Guía de cultivo de forraje Verde hidropónico en casa. CultivosHidropónicos. Consultado 10 jun. 2025. Disponible en <https://cultivoshidroponicos.org/forraje-hidroponico/>
- Pinotti, P. 2020. Cebada, gran opción forrajera invernal para el ganado. Argentina agroempresario. Consultado 28 nov. 2024. Disponible en <https://agroempresario.com/publicacion/43168/cebada-gran-opcion-forrajera-invernal-para-el-ganado/>
- Quispe, A. 2013. Rendimiento de cebada y avena como forraje verde hidropónico en relación a la densidad de siembra en carpa solar. Tesis Ing. Agr. La Paz, Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés. 95 p. Consultado 28 nov. 2024. Disponible en <https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/4186/T-1907.pdf?isAllowed=y&sequence=1>
- Rojas, J. 2019. Producción de forraje verde hidropónico (F.H.V.) para la alimentación animal Cochabamba – Bolivia. Instituto Tecnológico Berto Nicolí. Consultado 28 nov. 2024. Disponible en https://repositorio.cemse.edu.bo/docs/repositorio/1proyecto-de-grado-jose-carlos-rojas-revollo_124.pdf
- Tambo, D.; Céspedes, R. y Esprella, B. 2016. Evaluación del efecto de biol bovino en la producción y calidad de cebada (*Hordeum Vulgare* L.) en época de invierno en la estación experimental choquenaira, Viacha- La Paz. Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales. 3(1): 55-66. Consultado 10 abr. 2025. Disponible en http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2409-16182016000100008&nrm=iso
- Tumiri, E. 2018. Comportamiento productivo de cebada (*Hordeum vulgare* L.) en dos cortes con riego por aspersión con la aplicación de biol bovino en estación experimental choquenaira. Tesis Ing. en Producción y Comercialización Agropecuaria La Paz, Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés. 129 p. Consultado 28 jun. 2025. Disponible en <https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/18565/T-2582.pdf?sequence=1&isAllowed=y#page=43.09>
- Urresta, A. 2019. Evaluación de tres soluciones nutritivas con diferentes niveles de biol en la producción de forraje verde hidropónico de cebada (*Hordeum vulgare* L.). Tesis Ingeniero Agropecuario. Ibarra. Universidad Técnica del Norte. 61 p. Consultado 10 abr. 2025. Disponible en <https://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/9858/2/03%20AGP%20249%20TRABAJO%20GRADO.pdf>
- Vilcara, E. y Pampa, P. 2023. Viabilidad técnica de la producción de forraje verde hidropónico a base de cebada (*Hordeum vulgare*) costa central – Perú. Revista Latinoamericana De Ciencias Agrarias 1(1): 15-30. Consultado 10 abr. 2025. Disponible en <https://doi.org/10.5281/zenodo.11153649>

- Vivas, J. y Mejía, W. 2022. Manual práctico para la elaboración de Forraje Verde Hidropónico en invernadero no convencional. Universidad Nacional Agraria. 34. Consultado 20 feb. 2025. Disponible en <https://repositorio.una.edu.ni/4576/1/NL02V856.pdf>
- Zagal-Tranquilino, M.;Martínez-González, S.;Salgado-Moreno, S.;Escalera-Valente, F.;Peña-Parra, B. y Carrillo-Díaz, F. 2016. Producción de forraje verde hidropónico de maíz con riego de agua cada 24 horas. Abanico veterinario. 6(1): 29-34. Consultado 25 feb. 2025. Disponible en https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2448-61322016000100029
- Zuñiga, A. y Beauregard, I. 2020. Evaluación de tres productos desinfectantes sobre semillas de maíz y cebada para la producción en la tecnología de Forraje Verde Hidropónico. Repertorio Científico. 23(2): 75. Consultado 20 feb. 2025. Disponible en <https://doi.org/10.22458/rc.v23i2.3180>

8. ANEXOS

Anexo 1. Módulo hidropónico y ambiente de la investigación



1.1. Invernadero

1.2. Módulo de FVH

Anexo 2. Estante para el FVH



Anexo 3. Instalación de riego automatizado



3.1. Riego

3.2. Tanque y bomba

Anexo 4. Instalación del sistema automatizado



4.1. Nebulizador

4.2. Contactor, temporizador y térmico

Anexo 5. Semilla de cebada



Anexo 6. Acondicionamiento de bandejas



6.1. Perforación de bandejas

Anexo 7. Remojo de las semillas



Anexo 8. Desinfección y lavado de las semillas



8.1. Desinfección con NaClO

8.2. Enjuagado

Anexo 9. Oreado



Anexo 10. Desinfección de bandejas

10.1. Desinfección con NaClO



10.1. Enjuagado

Anexo 11. Siembra

11.1. Densidad de siembra



11.2. Siembra

Anexo 12. Coberturas del estate para la germinación



12.1. Área oscura

12.2. Cubierta con nylon transparente

Anexo 13. Germinación de cebada



Anexo 14. Cosecha de forraje verde hidropónico



Anexo 15. Medición de grados brix (°Bx)

15.1 Refractómetro



15.2. Sabias para el análisis

Anexo 16. Mufla a una temperatura de 60 °C

16.1. Secado de FVH

Anexo 17. Peso de materia seca

Anexo 18. Evaluación del FVH



Anexo 19. Producción de FVH



Anexo 20. Análisis económico

Anexo 21. Costos fijos de producción para cada tratamiento

ITEM	Costos Bs/M ²	T1	T2	T3	T4
Construcción del ambiente hidropónico	60	15	15	15	15
Construcción de estantes de producción	20	5	5	5	5
Bandejas de producción	10	2.5	2.5	2.5	2.5
Equipos	166	41.5	41.5	41.5	41.5
Total, costos fijos	256	64	64	64	64

Anexo 22. Costos variables de producción para cada tratamiento

COSTOS VARIABLES	COSTO TOTAL	T1	T2	T3	T4
Semilla de cebada	45	11.25	11.25	11.25	11.25
Hipoclorito de sodio	30	7.5	7.5	7.5	7.5
Electricidad	25	8	12	16	25
Agua	8	1.1	1.6	2.2	2.73
Total, costos variables	107.6	27.85	32.35	36.95	46.48