

**UNIVERSIDAD NACIONAL  
TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS**



**FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGRARIAS  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÓNOMA**

**TESIS PARA OBTENER  
EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO AGRÓNOMO**

**ANÁLISIS DE PRODUCTIVIDAD DE CULTIVO DE  
FREJOL BAJO CONDICIONES DE UN SISTEMA  
AGROVOLTAICO**

**Autor: Bach. Duber Banda Martinez**

**Asesores: Dr. Segundo Manuel Oliva Cruz**

**Mg. Wildor Gosgot Angeles**

**Registro: (.....)**

**CHACHAPOYAS – PERÚ**

**2024**

## **DEDICATORIA**

Este trabajo lo dedico a mi familia, en especial a mis magníficos padres, por su constante apoyo y amor desinteresado, por lo que son mi motivación para seguir creciendo como humano y profesional.

*Duber Banda*

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, por la vida y salud que me brinda.

Al Programa Nacional de Investigación Científica y Estudios Avanzados (PROCIENCIA), que a través del Proyecto “Sistemas agrovoltaicos: energía, agua y soberanía alimentaria para adaptación al cambio climático en zona altoandina de la región Amazonas”, con Contrato N° PE501082273-2023-PROCIENCIA, por el financiamiento de la presente Tesis.

A mi papá, mamá, hermanos y amigos, por ser parte del proceso de mi formación profesional, gracias totales por su apoyo económico y moral.

A toda la plana docente de la carrera profesional de Ingeniería Agrónoma de la UNTRM, por impartir sus conocimientos durante mis cinco años de estudios.

A mis asesores, que con sus conocimientos me fortalecieron y acompañaron para realizar este trabajo de la manera correcta.

***Duber Banda***

**AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ  
DE MEDOZA DE AMAZONAS**

Ph.D. JORGE LUIS MAICELO QUINTANA

**Rector**

Dr. OSACAR ANDRÉS GAMARRA TORRES

**Vicerrector Académico**

Dra. MARÍA NELLY LUJÁN ESPINOZA

**Vicerrectora de investigación**

Dr. ERICK ALDO AUQUÍÑIVIN SILVA

**Decano de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias**

## VISTO BUENO DEL ASESOR DE LA TESIS



### ANEXO 3-L

#### VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL

El que suscribe el presente, docente de la UNTRM (X)/Profesional externo ( ), hace constar que ha asesorado la realización de la Tesis titulada Análisis de Productividad de cultivo de frejol bajo condiciones de un sistema agrovoltaico; del egresado Duber Banda Martínez de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias Escuela Profesional de Ingeniería Agrónoma de esta Casa Superior de Estudios.

El suscrito da el Visto Bueno a la Tesis mencionada, dándole pase para que sea sometida a la revisión por el Jurado Evaluador, comprometiéndose a supervisar el levantamiento de observaciones que formulen en Acta en conjunto, y estar presente en la sustentación.

Chachapoyas, 29 de agosto de 2024

Firma y nombre completo del Asesor

  
Segundo Hauvel Oliva Cruz

## VISTO BUENO DEL ASESOR DE LA TESIS



**UNTRM**

**REGLAMENTO GENERAL**  
PARA EL OTORGAMIENTO DEL GRADO ACADÉMICO DE  
BACHILLER, MAESTRO O DOCTOR Y DEL TÍTULO PROFESIONAL

### ANEXO 3-L

#### VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL

El que suscribe el presente, docente de la UNTRM (X)/Profesional externo ( ), hace constar que ha asesorado la realización de la Tesis titulada Análisis de Productividad de cultivo de frejol bajo condiciones de un sistema agrovoltáico; del egresado Duber Banda Martínez de la Facultad de Ingeniería y Ciencia Agrarias Escuela Profesional de Ingeniería Agrónoma de esta Casa Superior de Estudios.

El suscrito da el Visto Bueno a la Tesis mencionada, dándole pase para que sea sometida a la revisión por el Jurado Evaluador, comprometiéndose a supervisar el levantamiento de observaciones que formulen en Acta en conjunto, y estar presente en la sustentación.

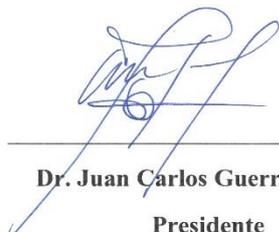
Chachapoyas, 29 de agosto de 2024

Firma y nombre completo del Asesor

Wildor Gasgot Angeles Mg.



## JURADO EVALUADOR DE LA TESIS



---

**Dr. Juan Carlos Guerrero Abad**  
Presidente



---

**Ms. Guillermo Idrogo Vásquez**  
Secretario



---

**Dr. Jorge Alberto Condori Apfata**  
Vocal

# CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE LA TESIS



## ANEXO 3-Q

### CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE LA TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL

Los suscritos, miembros del Jurado Evaluador de la Tesis titulada:

Análisis de productividad de cultivo de frejol bajo condiciones de un sistema agrovoltaico

presentada por el estudiante ( )/egresado (x) Duber Banda Martinez

de la Escuela Profesional de Ingeniería Agrónoma

con correo electrónico institucional 7749136691@untrm.edu.pe

después de revisar con el software Turnitin el contenido de la citada Tesis, acordamos:

- a) La citada Tesis tiene 17 % de similitud, según el reporte del software Turnitin que se adjunta a la presente, el que es menor (x) / igual ( ) al 25% de similitud que es el máximo permitido en la UNTRM.
- b) La citada Tesis tiene \_\_\_\_\_ % de similitud, según el reporte del software Turnitin que se adjunta a la presente, el que es mayor al 25% de similitud que es el máximo permitido en la UNTRM, por lo que el aspirante debe revisar su Tesis para corregir la redacción de acuerdo al Informe Turnitin que se adjunta a la presente. Debe presentar al Presidente del Jurado Evaluador su Tesis corregida para nueva revisión con el software Turnitin.



Chachapoyas, 04 de octubre del 2024.

[Signature]  
SECRETARIO

[Signature]  
PRESIDENTE

[Signature]  
VOCAL

OBSERVACIONES:

.....  
.....

## REPORTE TURNITIN

### PRODUCTIVIDAD DE CULTIVO DE FREJOL BAJO CONDICIONES DE UN SISTEMA AGROVOLTAICO

#### INFORME DE ORIGINALIDAD

<b>17</b> %	<b>17</b> %	<b>7</b> %	%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

#### FUENTES PRIMARIAS

<b>1</b>	<b>hdl.handle.net</b> Fuente de Internet	<b>4</b> %
<b>2</b>	<b>repositorio.untrm.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>2</b> %
<b>3</b>	<b>core-cms.prod.aop.cambridge.org</b> Fuente de Internet	<b>1</b> %
<b>4</b>	<b>www.mdpi.com</b> Fuente de Internet	<b>1</b> %
<b>5</b>	<b>repositorio.lamolina.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>1</b> %
<b>6</b>	<b>repositorio.inta.gob.ar</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1</b> %
<b>7</b>	<b>bdigital.zamorano.edu</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1</b> %
<b>8</b>	<b>www.ecoportel.net</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1</b> %
<b>9</b>	<b>oldri.ues.edu.sv</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1</b> %

*Dr. Carlos Guerrero Alad*

# ACTA DE SUSTENTACIÓN DE LA TESIS



UNTRM

REGLAMENTO GENERAL  
PARA EL OTORGAMIENTO DEL GRADO ACADÉMICO DE  
BACHILLER, MAESTRO O DOCTOR Y DEL TÍTULO PROFESIONAL

## ANEXO 3-S

### ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL

En la ciudad de Chachapoyas, el día 22 de OCTUBRE del año 2024, siendo las 15:00 horas, el aspirante: DUBER BANDA MARTINEZ, asesorado por DR. SEGUNDO M. OLIVA CRUZ Y MS. WILDOY GOSSET ANGELES defiende en sesión pública presencial () / a distancia ( ) la Tesis titulada: ANÁLISIS DE PRODUCTIVIDAD DE CULTIVO DE FRIJOL BAJO CONDICIONES DE UN SISTEMA AGROVOLTAICO, para obtener el Título Profesional de INGENIERO AGRÓNOMO, a ser otorgado por la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas; ante el Jurado Evaluador, constituido por:

Presidente: Dr. JUAN CARLOS GUERRERO ABAD

Secretario: Ms. GUILLERMO IDRAGO VÁSQUEZ

Vocal: Dr. JORGE ALBERTO CONDORI APIAZA

Procedió el aspirante a hacer la exposición de la Introducción, Material y métodos, Resultados, Discusión y Conclusiones, haciendo especial mención de sus aportaciones originales. Terminada la defensa de la Tesis presentada, los miembros del Jurado Evaluador pasaron a exponer su opinión sobre la misma, formulando cuantas cuestiones y objeciones consideraron oportunas, las cuales fueron contestadas por el aspirante.

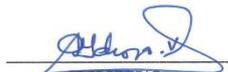
Tras la intervención de los miembros del Jurado Evaluador y las oportunas respuestas del aspirante, el Presidente abre un turno de intervenciones para los presentes en el acto de sustentación, para que formulen las cuestiones u objeciones que consideren pertinentes.

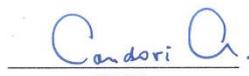
Seguidamente, a puerta cerrada, el Jurado Evaluador determinó la calificación global concedida a la sustentación de la Tesis para obtener el Título Profesional, en términos de:

Aprobado () por Unanimidad () / Mayoría ( ) Desaprobado ( )

Otorgada la calificación, el Secretario del Jurado Evaluador lee la presente Acta en esta misma sesión pública. A continuación se levanta la sesión.

Siendo las 16:30 horas del mismo día y fecha, el Jurado Evaluador concluye el acto de sustentación de la Tesis para obtener el Título Profesional.

  
SECRETARIO

  
VOCAL

  
PRESIDENTE

OBSERVACIONES:  
.....

## ÍNDICE

DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTO .....	iii
AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ DE MEDOZA DE AMAZONAS .....	iv
VISTO BUENO DEL ASESOR DE LA TESIS.....	v
VISTO BUENO DEL ASESOR DE LA TESIS.....	vi
JURADO EVALUADOR DE LA TESIS.....	vii
CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE LA TESIS .....	viii
REPORTE TURNITIN.....	ix
ACTA DE SUSTENTACIÓN DE LA TESIS .....	x
ÍNDICE .....	xi
ÍNDICE DE TABLAS .....	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiv
RESUMEN.....	xv
ASBTRAT .....	xvi
I. INTRODUCCIÓN.....	17
II. MATERIALES Y MÉTODOS.....	19
2.1. Ubicación de la unidad de estudio.....	19
2.2. Unidad de estudio .....	20
2.3. Metodología.....	21
2.4. Manejo del experimento .....	23
2.5. Preparación del suelo para el cultivo.....	24
2.6. Selección de las semillas .....	25
2.7. Prueba de germinación de las semillas .....	26
2.8. Análisis de suelo de las parcelas experimentales .....	26

2.9.	Siembra de las semillas de frejol en sistemas agrovoltaicos .....	27
2.10.	Instalación de una estación agrometeorológica .....	28
2.11.	Instalación del sistema de riego .....	28
2.12.	Caracterización morfológica del frejol .....	29
2.13.	Labores culturales .....	33
III.	RESULTADOS .....	36
3.1.	Germinación de semillas .....	36
3.2.	Desarrollo morfológico del cultivo de frejol .....	36
3.3.	Días a la germinación .....	38
3.4.	Altura de planta (cm) .....	38
3.5.	Número de hojas trifoliadas .....	41
3.6.	Número de flores por planta (semanas) .....	43
3.7.	Número de vainas por planta .....	45
3.8.	Longitud de las vainas (cm) .....	46
3.9.	Peso de las vainas por planta (g) .....	48
3.10.	Peso de los granos por planta (g) .....	49
3.11.	Rendimiento (Kg/ha) .....	51
3.12.	Irradiancia ambiente y bajo el sistema fotovoltaico .....	53
IV.	DISCUSIÓN .....	54
V.	CONCLUSIONES .....	60
VI.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	61
	ANEXOS .....	66

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Distribución de los factores evaluados .....	21
<b>Tabla 2.</b> Descripción de los tratamientos evaluados .....	21
<b>Tabla 3.</b> Anva para días a la emergencia .....	38
<b>Tabla 4.</b> Anva para altura de planta a los 49 días .....	39
<b>Tabla 5.</b> Anva para altura de planta a los 91 días .....	40
<b>Tabla 6.</b> Anva para hojas trifoliadas a los 49 días. ....	41
<b>Tabla 7.</b> Anva para hojas trifoliadas a los 91 días .....	42
<b>Tabla 8.</b> Anva para número de flores semana 3.....	44
<b>Tabla 9.</b> Anva para el número de vainas por planta.....	45
<b>Tabla 10.</b> Anva para longitud de vainas.....	46
<b>Tabla 11.</b> Anva para peso de vainas.....	48
<b>Tabla 12.</b> Anva para el peso de los granos.....	50
<b>Tabla 13.</b> Anva para rendimiento Kg/ha.....	51

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Ubicación de la unidad de estudio.....	19
<b>Figura 2.</b> Módulo fotovoltaico y cultivo de frejol.....	20
<b>Figura 3.</b> Distribución de las unidades experimentales.....	22
<b>Figura 4.</b> Estructura de soporte de los paneles.....	23
<b>Figura 5.</b> Sistema fotovoltaico monofacial. B. Bifacial.....	24
<b>Figura 6.</b> Preparación del suelo.....	25
<b>Figura 7.</b> Semillas de frejol Panamito (A) Chaucha (B).....	25
<b>Figura 8.</b> Prueba de germinación .....	26
<b>Figura 9.</b> Extracción de muestra de suelo y etiquetado.....	27
<b>Figura 10.</b> Siembra de semillas de frejol.....	27
<b>Figura 11.</b> Instalación de una estación agrometeorológica.....	28
<b>Figura 12.</b> Instalación del sistema de riego por goteo.....	29
<b>Figura 13.</b> Medición de altura de la planta de frejol (panamito y chaucha.....	30
<b>Figura 14.</b> Hojas trifoliadas de panamito (A) y chaucha (B).....	30
<b>Figura 15.</b> A. Flores de panamito. B. Flores de chaucha.....	31
<b>Figura 16.</b> Número de vainas de panamito y chaucha .....	31
<b>Figura 17.</b> Medición de longitud de vaina chaucha (A) y panamito (B) .....	32
<b>Figura 18.</b> Peso de las vainas panamito (A) y chaucha (B) .....	32
<b>Figura 19.</b> Peso de los granos Chaucha (A) y panamito (B).....	33
<b>Figura 20.</b> Riego por goteo .....	34
<b>Figura 21.</b> A. Suelo sin compost. B. Suelo enriquecido con compost.....	34
<b>Figura 22.</b> Plagas, enfermedades y control .....	35
<b>Figura 23.</b> A. Germinación de semillas chaucha y panamito respectivamente.....	36
<b>Figura 24.</b> Desarrollo morfológico del frejol chaucha (a) y panamito (b).....	37
<b>Figura 25.</b> Análisis Tukey para altura de planta a los 49 días .....	39
<b>Figura 26.</b> Análisis Tukey para altura de planta a los 91 días .....	40
<b>Figura 27.</b> Análisis Tukey para hojas trifoliadas a 49 días.....	42
<b>Figura 28.</b> Anva para hojas trifoliadas a los 91 días .....	43
<b>Figura 29.</b> Análisis Tukey para número de flores semana 3.....	44
<b>Figura 30.</b> Análisis Tukey para número de vainas.....	45
<b>Figura 31.</b> Análisis Tukey para longitud de vainas.....	47
<b>Figura 32.</b> Análisis Tukey para peso de vainas por planta .....	49
<b>Figura 33.</b> Análisis Tukey para peso de granos (g).....	50
<b>Figura 34.</b> Anva para rendimiento Kg/ha.....	52
<b>Figura 35.</b> Irradiancia promedio durante el ciclo del cultivo.....	53

## RESUMEN

La producción de alimentos y energía simultáneamente es uno de los desafíos que se enfrenta en la actualidad, uno de los mecanismos que optimiza el suelo es la agrovoltaica. Por ello, la investigación se centró en evaluar la productividad de dos variedades de frejol (panamito y chaucha) bajo sistemas agrovoltaicos (bifacial y monofacial). Para ello se instalaron los sistemas agrovoltaicos a una altura de 2.91 m sobre una superficie de 20 m<sup>2</sup>, en donde se distribuyó parcelas de 1 m<sup>2</sup>, dos variedades de frejol y dos distanciamientos de siembra (25 y 35cm) por lo que se tuvo un total de 12 tratamientos y se evaluaron características morfológicas como días a la emergencia, altura de planta, número de hojas trifoliadas, número de flores, número de vainas, peso de vainas, peso de granos y rendimiento. Los resultados obtenidos demuestran que los sistemas agrovoltaicos propician condiciones para el cultivo de frejol debido a que, la variedad chaucha presentó una productividad de 700.5kg/ha, además de buenas características morfológicas como altura de planta, número de flores, número de hojas trifoliadas, número de vainas, longitud de vainas, peso de las vainas, peso de los granos y rendimiento, asimismo, la variedad panamito presentó una productividad de 618.9 kg/ha en el mismo sistema. En comparación con el sistema convencional que registró 387 kg/ha. Entonces, los sistemas agrovoltaicos es una opción viable para la producción de frejol, porque se logra optimizar el uso del suelo de forma sostenible.

**Palabras clave:** Productividad, suelo, altura de planta, panel solar, monofacial y bifacial.

## **ASBTRAT**

Simultaneously producing food and energy is one of today's major challenges, and one of the mechanisms that optimizes soil use is agrivoltaics. Therefore, the research focused on evaluating the productivity of two varieties of beans (Panamito and Chaucha) under agrivoltaic systems (bifacial and monofacial). For this purpose, agrivoltaic systems were installed at a height of 2.90 m over a 20 m<sup>2</sup> surface, where 1 m<sup>2</sup> plots were distributed, with two bean varieties and two planting spacings (25 cm and 35 cm). This resulted in a total of 12 treatments, and morphological characteristics were evaluated, such as days to germination, plant height, number of trifoliolate leaves, number of flowers, number of pods, pod weight, grain weight, and yield. The results demonstrate that agrivoltaic systems promote favorable conditions for bean cultivation. The Chaucha variety showed a productivity of 700.5 kg/ha, along with good morphological characteristics such as plant height, number of flowers, number of trifoliolate leaves, number of pods, pod length, pod weight, grain weight, and yield. Similarly, the Panamito variety exhibited a productivity of 618.9 kg/ha in the same system, compared to the conventional system, which recorded 387 kg/ha. Thus, agrivoltaic systems are a viable option for bean production, as they optimize soil use in a sustainable way.

**Keywords:** Productivity, soil, plant height, solar panel, monofacial, bifacial.

## I. INTRODUCCIÓN

En los próximos años la demanda de alimentos y energía aumentará a un ritmo acelerado y su seguridad de abastecimiento se ha convertido en el principal problema, especialmente en los países en desarrollo (Chamara & Beneragama, 2020). Actualmente, los sistemas agrícolas mundiales no logran garantizar la seguridad alimentaria ni contribuir a la sostenibilidad ambiental. Las prácticas agrícolas desempeñan un papel crucial en el logro de los objetivos de sostenibilidad (Swart et al., 2023). En ese contexto, según proyecciones se prevé que la población mundial alcance los 9700 millones en 2050 y los 10900 millones en 2100, pero sus intervalos de proyección del 95% podrían estar entre 9400 y 10100 millones para 2050 y entre 9400 y 12700 millones para 2100 (Gu et al., 2021). Además, según la base de datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, hace mención que superar el hambre y la malnutrición en el siglo XXI significa aumentar la cantidad y la calidad de los alimentos, y simultáneamente asegurar la producción de alimentos de manera sostenible, con eficacia y seguridad (FAO, 2022)

Frente a esta problemática, el cultivo de frejol (*Phaseolus vulgaris* L.) resulta una alternativa para mitigar la demanda de alimentos, ya que es la legumbre de consumo humano más importante a nivel mundial y una importante fuente de proteína vegetal, minerales, antioxidantes y compuestos bioactivos (Karavidas et al., 2022). También, el frejol es la principal fuente de proteína para la población rural y urbana de menores ingresos en Centroamérica y el Caribe. Se menciona que al menos el 60% de los frejoles en América Latina y el 50% en África se cultivan en suelos severamente deficientes en fósforo (Chávez et al., 2020). Se sabe que las legumbres son un alimento básico en muchas partes del mundo y se producen en una variedad de climas y suelos. Según la Organización de las Naciones Unidas, las legumbres son una de las leguminosas más importantes en la dieta mundial (ONU, 2024)

En el Perú, en el año 2023, el cultivo de frejol alcanzó 43678.36 toneladas de producción, con una superficie sembrada de 62198.50 hectáreas. Por otro lado, en la región Amazonas, la producción para el año 2023 llegó a 2929.82 toneladas de frejol, con una superficie sembrada de 6369.00 hectáreas (Midagri, 2024)

La asignación y gestión de tierras agrícolas es una preocupación emergente debido a la escasez de suelo, lo que también se asocia con la disminución del suministro de energía y agua, así como la creciente demanda de alimentos a nivel mundial (Nie et al., 2018). En ese sentido, el impulso de las energías renovables es una tendencia a nivel global, dentro de ellas destaca la energía solar fotovoltaica, la cual requiere de terrenos para su instalación. Por lo tanto, la competencia por la tierra puede surgir en el futuro para uso agrícola y generación de electricidad basada en energía fotovoltaica (Santra, 2018). La energía solar fotovoltaica (PV) ha crecido rápidamente a lo largo de los años, lo que ha llevado a una competencia territorial entre la instalación de sistemas fotovoltaicos para generar energía y la utilización de tierras para la agricultura para satisfacer la creciente demanda de consumo de la población humana (Reeza et al., 2024)

Frente a esta problemática aparecen los sistemas agrovoltaicos como alternativa para producir de manera simultánea, en un mismo terreno, energía y alimentos. Según, Elkadeem et al. (2024), los sistemas agrovoltaicos representan una solución inteligente que combina la producción de electricidad a partir de tecnología solar fotovoltaica con la producción agrícola evitando conflictos de uso del suelo. La agrovoltaica permite el uso dual de la tierra tanto para la agricultura como para la generación de energía fotovoltaica, lo que aumenta considerablemente la eficiencia del uso de la tierra, lo que permite una expansión de la capacidad fotovoltaica en tierras de cultivo mientras se mantienen las actividades agrícolas (Trommsdorff et al., 2022)

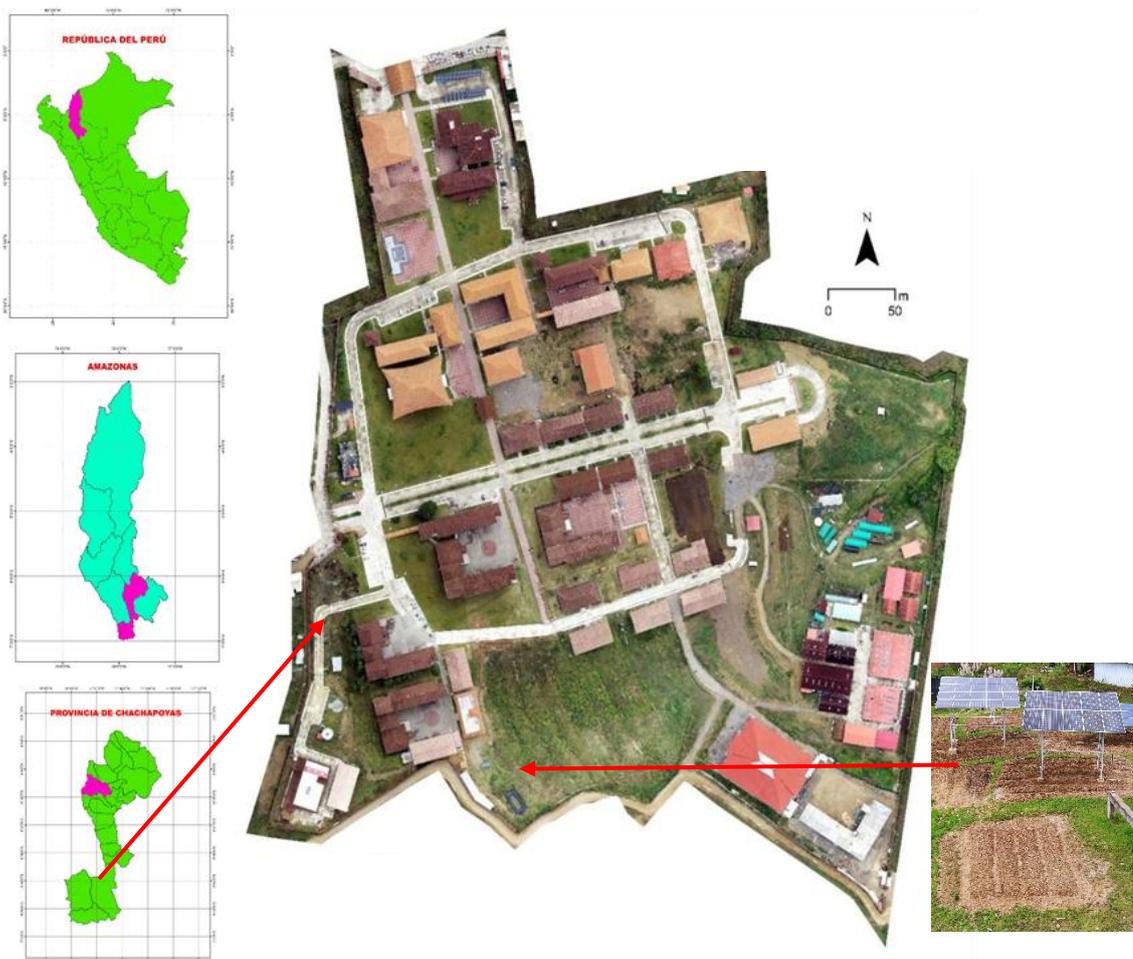
Se debe reconocer la importancia del cultivo de frejol, que en Perú es considerado como uno de los principales cultivos para la producción de alimento básico, siendo su consumo 3 kg/persona/año, lo que representa un consumo diario de 7 g, llegando a ser de 4 kg/persona/año en las zonas rurales, es decir 11 g diarios de frejol (INEI, 2012)

Sin embargo, no existe data sobre la instalación de un cultivo en sistema agrovoltaico en la región Amazonas, por ello, se instaló el cultivo de frejol bajo un sistema agrovoltaico en el Campus de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, usando dos tecnologías de sistemas fotovoltaicos: monofaciales y bifaciales, las variedades de frijol usadas fueron panamito y chaucha, con dos distanciamientos de siembra. Las variables evaluadas fueron la altura de planta, días a la emergencia, número de hojas trifoliadas, número de flores por planta, número de vainas por planta, peso de las vainas, peso de los granos y longitud de vainas.

## II. MATERIAL Y MÉTODOS

### 2.1. Ubicación de la unidad de estudio

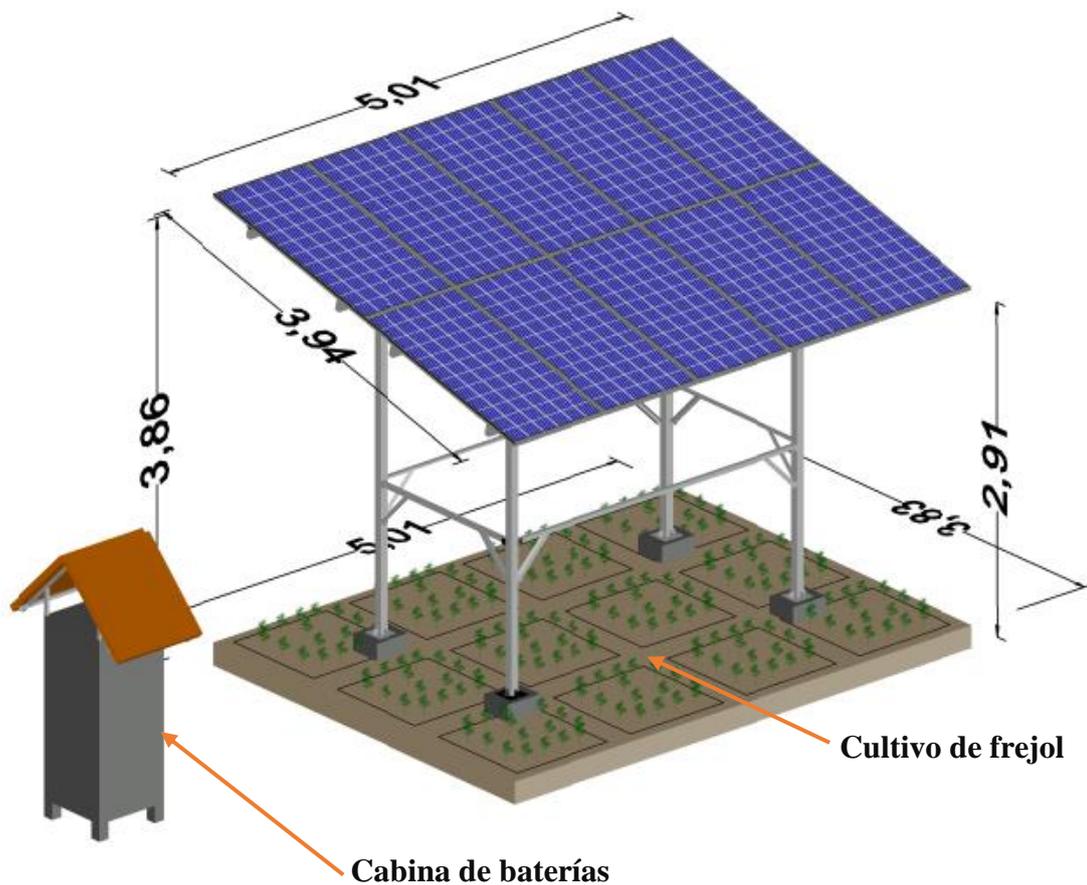
La investigación se ejecutó en el Campus de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, ubicado en el distrito de Chachapoyas, provincia de Chachapoyas, región Amazonas; en las coordenadas  $6^{\circ}13'59''\text{S}$   $77^{\circ}51'11''\text{O}$ . Tiene una precipitación pluvial abundante y cuenta con una temperatura que oscila entre  $10^{\circ}\text{C}$  y  $21^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 1.** Ubicación de la unidad de estudio

## 2.2. Unidad de estudio

La unidad de estudio en la investigación se basó en dos sistemas agrovoltaicos (sistema fotovoltaico monofacial y bifacial) y una parcela de control sin sombra, en ambos se instaló dos variedades de frejol (panamito y chaucha). Los sistemas fotovoltaicos constaron de diez módulos solares orientado en la dirección Norte – Sur, con ángulo de inclinación de  $15^\circ$  Sur para optimizar el rendimiento; estos módulos se ubicaron sobre una estructura metálica de 2.90 m de altura, además, de un conjunto de componentes eléctricos y electrónicos para el almacenamiento y consumo de la energía generada. En la superficie cubierta por los módulos solares se instalaron las parcelas de frejol (Figura 2)



**Figura 2.** Módulo fotovoltaico y cultivo de frejol

## 2.3. Metodología

### 2.3.1. Diseño experimental

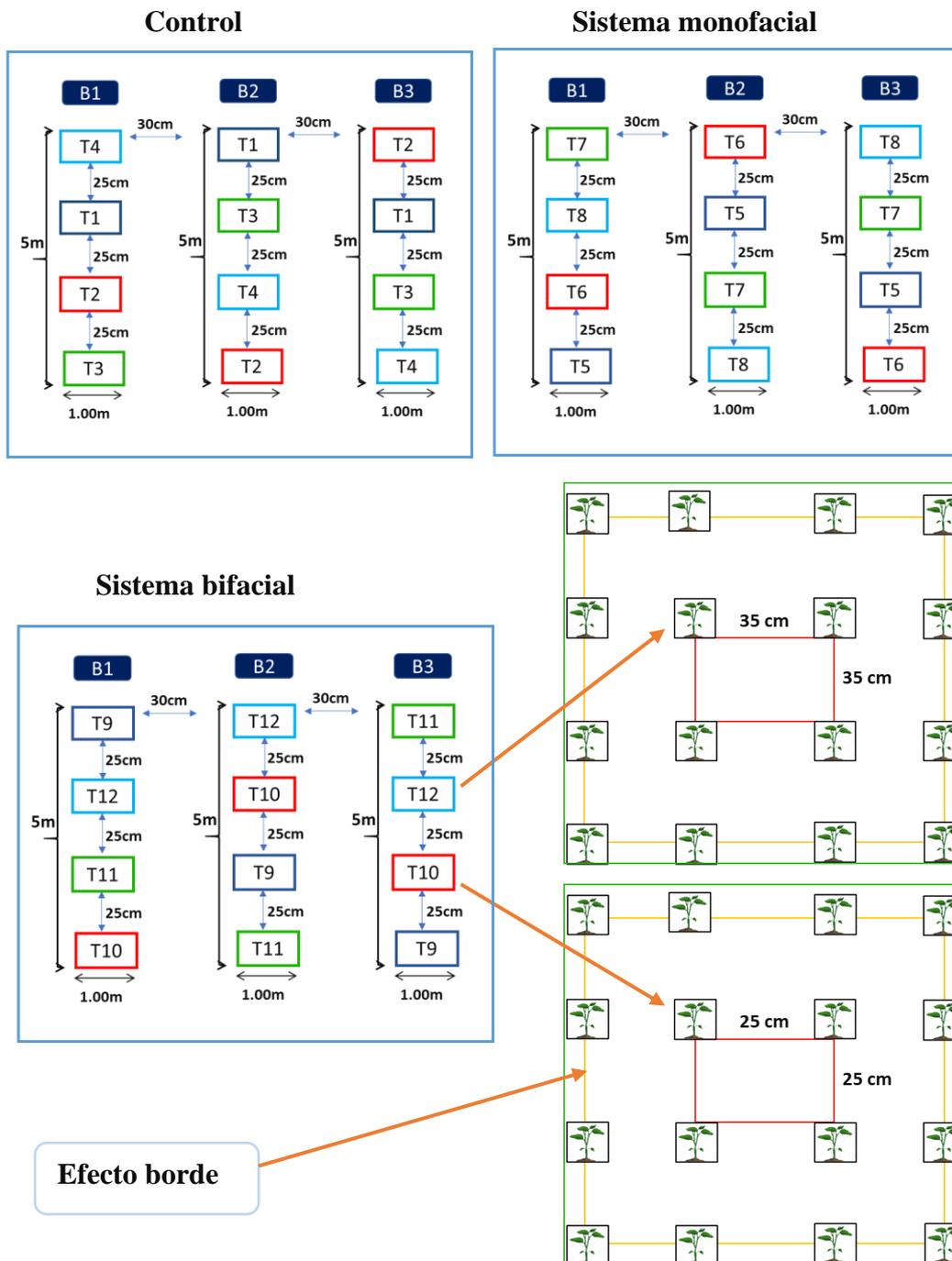
Se empleó un diseño de bloques completamente al azar (DBCA) con un arreglo factorial 2x2x3, siendo el factor A las 2 variedades de frejol (panamito y chaucha), el factor B los dos distanciamientos de siembra (25 cm y 35 cm) y el factor C los tipos de sistema (Control, monofacial y bifacial), en la tabla 1 se muestra la distribución de los factores evaluados y la tabla 2 muestra la descripción de tratamientos evaluados. En la combinación de estos factores se obtuvo 12 tratamientos con 3 bloques (repeticiones), haciendo un total de 48 unidades experimentales (Figura 3). En cada unidad experimental se evaluaron 4 plantas de frejol, teniendo en cuenta el efecto borde se evaluaron un total de 144 plantas de las dos variedades en toda la investigación.

**Tabla 1.** Distribución de los factores evaluados

<b>Factores</b>	
Factor A	Frejol panamito (V1) Frejol chaucha (V2)
Factor B	Distanciamiento de siembra 25 cm (D1) Distanciamiento de siembra 35 cm (D2)
Factor C	Control, Monofacial y Bifacial

**Tabla 2.** Descripción de los tratamientos evaluados

<b>Factor A</b>	<b>Factor B</b>	<b>Factor C</b>	<b>AxBxC</b>	<b>Código</b>
Variedad panamito (A1)	Distanciamiento 1 (B1)	Convencional (C1)	A1B1C1	T1
	Distanciamiento 2 (B2)	Convencional (C1)	A1B2C1	T2
Variedad chaucha (A2)	Distanciamiento 1 (B1)	Convencional (C1)	A2B1C1	T3
	Distanciamiento 2 (B2)	Convencional (C1)	A2B2C1	T4
Variedad panamito (A1)	Distanciamiento 1 (B1)	Monofacial (C2)	A1B1C2	T5
	Distanciamiento 2 (B2)	Monofacial (C2)	A1B2C2	T6
Variedad chaucha (A2)	Distanciamiento 1 (B1)	Monofacial (C2)	A2B1C2	T7
	Distanciamiento 2 (B2)	Monofacial (C2)	A2B2C2	T8
Variedad panamito (A1)	Distanciamiento 1 (B1)	Bifacial (C3)	A1B1C3	T9
	Distanciamiento 2 (B2)	Bifacial (C3)	A1B2C3	T10
Variedad chaucha (A2)	Distanciamiento 1 (B1)	Bifacial (C3)	A2B1C3	T11
	Distanciamiento 2 (B2)	Bifacial (C3)	A2B2C3	T12

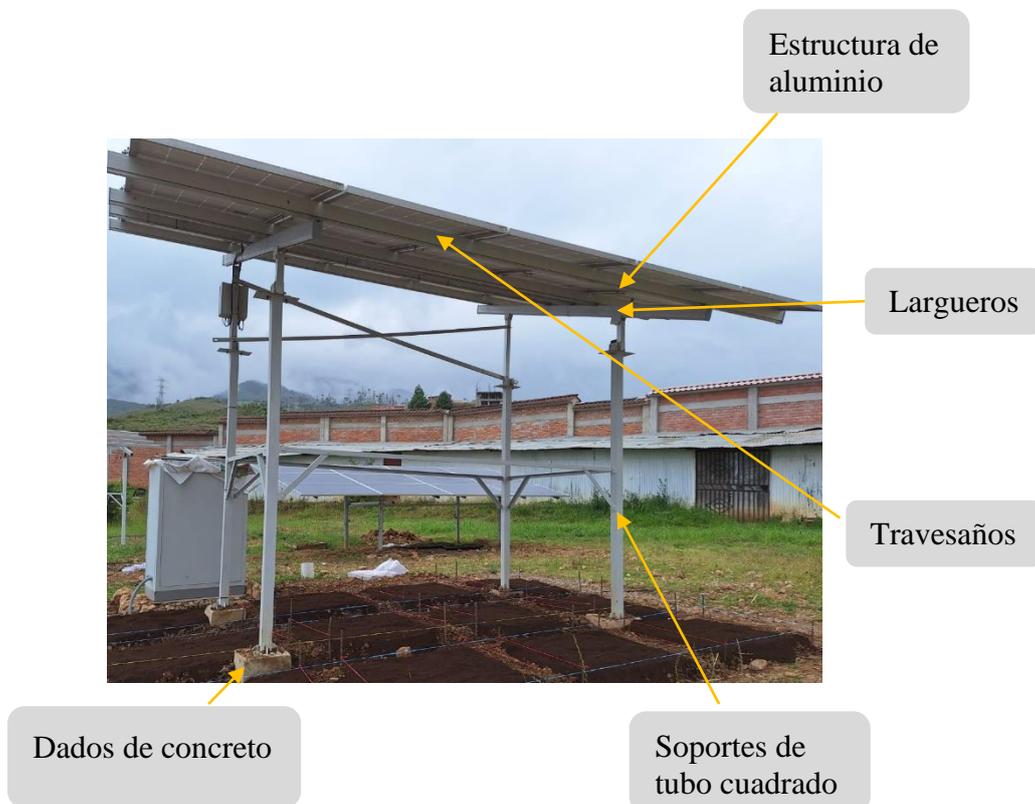


**Figura 3.** Distribución de las unidades experimentales

## 2.4. Manejo del experimento

### 2.4.1. Instalación de la estructura de soporte para los paneles

Las estructuras que soportan los módulos solares del sistema agrovoltaico constan de 4 soportes de tubo cuadrado de 7.5x7.5 cm, con una altura de 2.40 m, anclados a dados de concreto. La distancia entre los cuatro soportes se distribuye de 1.60 m ancho y el largo de 3.08 m. Sobre este soporte se ha anclado una estructura de aluminio, con una altura en la parte baja de 28 cm y la parte alta de 81 cm, en las cuales se fijan dos largueros de aluminio de 3.40 m de longitud y sobre estos se distribuyen cuatro travesaños de aluminio de 5.20 m de longitud, en donde se fijaron los paneles (Figura 4). Esta estructura fue instalada para el sistema fotovoltaico monofacial y bifacial.



**Figura 4.** Estructura de soporte de los paneles

#### 2.4.2. Instalación de los paneles fotovoltaicos

Sobre las estructuras metálicas orientadas en la dirección Norte-Sur, se fijaron módulos solares. Para el sistema fotovoltaico monofacial se instalaron diez módulos solares de marca Q CELLS, modelo Q. PEAK L-G5 375 de tecnología monocristalino, cuyas dimensiones de cada módulo solar fue de 1.96 x 0.99 m. Mientras que, para el sistema fotovoltaico bifacial. de marca CanadianSolar, modelo CS3W- 400PB-AG(IEC1500V) de tecnología policristalino, cuyas dimensiones de cada módulo solar fue de 2.13 x 1.05 m. En ambos sistemas (monofacial y bifacial) la superficie cubierta total de los módulos solares fue de 20 m<sup>2</sup> aproximadamente (Figura 5)



**Figura 5.** Sistema fotovoltaico monofacial. B. Bifacial.

#### 2.5. Preparación del suelo para el cultivo

La preparación del suelo consistió en la labranza del mismo con ayuda de un motocultor de 7 hp, que se realizó un movido del suelo, quedando listo para la distribución de las parcelas experimentales y la siembra del frejol (Figura 6). Esta actividad tuvo como finalidad construir una cama de plantación con un suelo mullido, aireado y enriquecido con la incorporación de la materia orgánica, de tal forma que favorezca la germinación de la semilla, enraizamiento de la planta, la retención de agua, la actividad microbiológica y los cambios químicos que se producen en la temporada de cultivo; como lo recomienda Burba, (2021).



**Figura 6.** Preparación del suelo

## 2.6. Selección de las semillas

Las variedades de frejol instaladas fueron panamito y chaucha, las cuales se han seleccionado según el Código Nacional del Banco de Germoplasma del INIA, ambas de crecimiento determinado. La variedad panamito con código PER1003549, sus semillas son de forma oval y color blanco puro (Figura 4. A). Asimismo, la variedad chaucha con código PER1003542, sus semillas tienen forma cúbica, con un color predominante café claro y rayas moradas como se muestra en la figura 4B (Vásquez et al., 2023).



**Figura 7.** Semillas de frejol Panamito (A) Chaucha (B)

## 2.7. Prueba de germinación de las semillas

La prueba de germinación tiene como objetivo evaluar la capacidad que tienen las semillas para producir plantas vigorosas y normales, antes de ser sembradas bajo los sistemas fotovoltaicos. Las semillas de frejol fueron obtenidas del banco de germoplasma perteneciente al INIA – Chachapoyas. En cada bandeja se colocó una base de papel toalla húmedo, luego, se colocó cien semillas de frejol variedad panamito y en la otra bandeja cien semillas de frejol variedad chaucha. Finalmente, se cubrió con papel toalla, durante 7 días consecutivos hasta observar que la radícula presentaba al menos 3 mm de largo Salazar et al. (2020) en todo este periodo se aplicó un riego diario para mantener la humedad como se muestra en la (Figura 8)



**Figura 8.** Prueba de germinación

## 2.8. Análisis de suelo de las parcelas experimentales

El análisis del suelo agrícola se realizó para determinar su fertilidad y potencial para sostener un cultivo, además, para conocer su textura y sus diferentes parámetros fisicoquímicos relacionados con su fertilidad (Lizcano, 2019). Para ello, se tomó 1kg de muestra de suelo aplicando el método del cuarteo, luego el almacenamiento y traslado de la muestra se realizó de acuerdo al protocolo establecido por el Laboratorio de Investigación de Suelos y Aguas (LABISAG) de la UNTRM (Figura 9)



**Figura 9.** Extracción de muestra de suelo y etiquetado

## **2.9. Siembra de las semillas de frejol en sistemas agrovoltaicos**

Se sembró las semillas siguiendo la distribución de los tratamientos y repeticiones explicado anteriormente (Figura 10). En cada sistema agrovoltaico se distribuyó las dos variedades de frejol en los tres bloques bajo los sistemas. Es decir, en dos tratamientos de cada bloque de forma aleatoria, teniendo en cuenta una superficie de  $1\text{m}^2$ .



**Figura 10.** Siembra de semillas de frejol

## 2.10. Instalación de una estación agrometeorológica

Se ha instalado un sistema meteorológico con sensores de radiación fotosintética, humedad de hoja y suelo integrado a un data logger de marca: HOBO y modelo: H21-USB (Figura 11). Todos los sensores fueron de marca ONSET, asimismo, el sensor de Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR - Photosynthetically Active Radiation y modelo: S-LIA-M003. El sensor de humedad de hoja es de modelo: S-LWA-M003, y el sensor de humedad de suelo modelo: S-SMD-M005.



**Figura 11.** Instalación de una estación agrometeorológica

## 2.11. Instalación del sistema de riego

Se instaló canaletas en el borde inferior de los conjuntos de paneles que constituyen cada sistema agrovoltaico, con la finalidad de cosechar el agua de lluvia que cae sobre su superficie y conducirla a un tanque de polietileno de 200 litros ubicado de manera horizontal sobre una estructura de metal a 1.80 m del suelo, donde se almacenó dicha agua, ganando altura, para ser usada en el riego por goteo del cultivo de frejol (Figura 12). Entonces, se realizó riego por goteo para ello, se usó manguera de 16 mm de polietileno de color negro, tendida a lo largo de las parcelas experimentales, a la que se insertó goteros de manera que queden al lado de cada una de las plantas de frejol y le suministren la cantidad de agua que requieren para su desarrollo vegetativo. La red de mangueras con goteros se conectó con uniones, codos, tes y llaves de paso para

dirigir adecuadamente el flujo de agua de riego. Cabe recalcar, que el agua es vital para la producción de los cultivos y la seguridad alimentaria en todo el mundo, tal como lo menciona Kahramanoğlu et al., (2020) y el cultivo de frejol no es la excepción.



**Figura 12.** Instalación del sistema de riego por goteo

## **2.12. Caracterización morfológica del frejol**

### **2.12.1. Altura de planta (cm)**

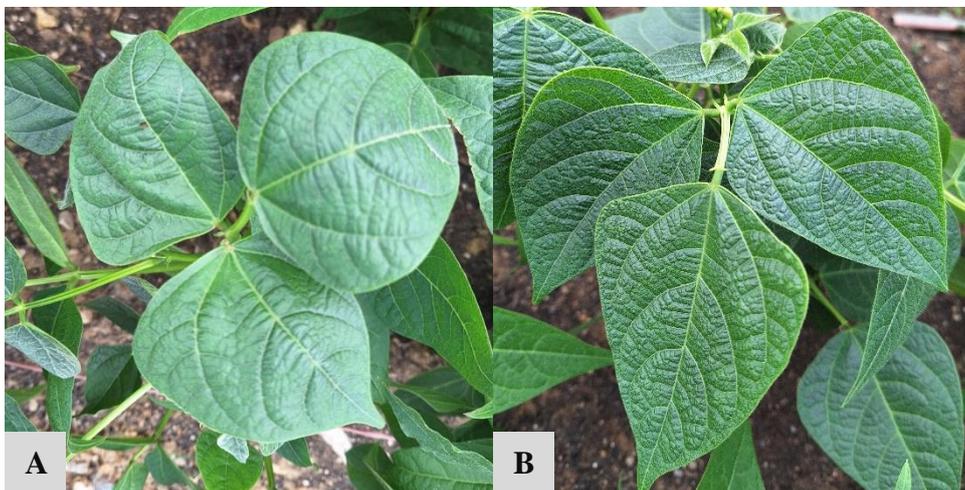
Para medir la altura de la planta se utilizó una cinta métrica (figura 13). La evaluación de esta variable se realizó tres veces. La primera evaluación se hizo a los 21 días después del germinado, la segunda evaluación se realizó a los 49 días y la última fue a los 91 días cuando la planta ya se encontraba en etapa de producción; cubriendo así todo el ciclo del cultivo.



**Figura 13.** Medición de altura de la planta de frejol (panamito y chaucha)

### 2.12.2. Número de hojas trifoliadas por planta

La primera evaluación se realizó al principio del ciclo de crecimiento que fue a los 21 días con el fin de evaluar el desarrollo temprano de las plantas. (Figura 14). La segunda evaluación fue en el punto medio del ciclo de crecimiento que fue a los 49, para observar cómo están progresando las plantas hacia la fase de madurez. La tercera y última evaluación se hizo cerca del final del ciclo de crecimiento a los 91 días, para determinar el estado final de las hojas antes de la cosecha.



**Figura 14.** Hojas trifoliadas de panamito (A) y chaucha (B)

### 2.12.3. Número de flores por planta

Durante la aparición de las primeras flores, que fue a los 55 días aproximadamente, se realizó un conteo de las flores por cada planta evaluada; a partir de allí, se realizó un conteo cada 7 días, es decir cada semana. En total se realizó un conteo de 4 semanas, realizando así 4 conteos de la variable número de flores, esto nos permitió verificar el total de número de flores por planta (Figura 15)



**Figura 15.** A. Flores de panamito. B. Flores de chaucha

### 2.12.4. Numero de vainas por planta

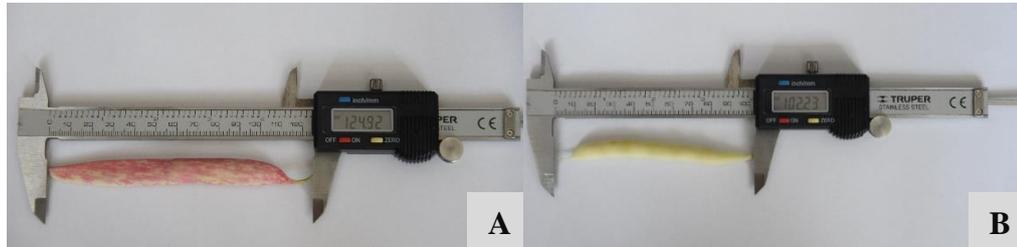
Para el conteo de las vainas en frejol se precedió a cosechar las vainas de cada planta evaluada, para posteriormente ser contadas. Esta actividad se realizó en término medio de maduración, es decir que las vainas no estaban ni completamente verdes ni completamente secas (Figura 16).



**Figura 16.** Número de vainas de panamito y chaucha

### 2.12.5. Longitud de las vainas (cm)

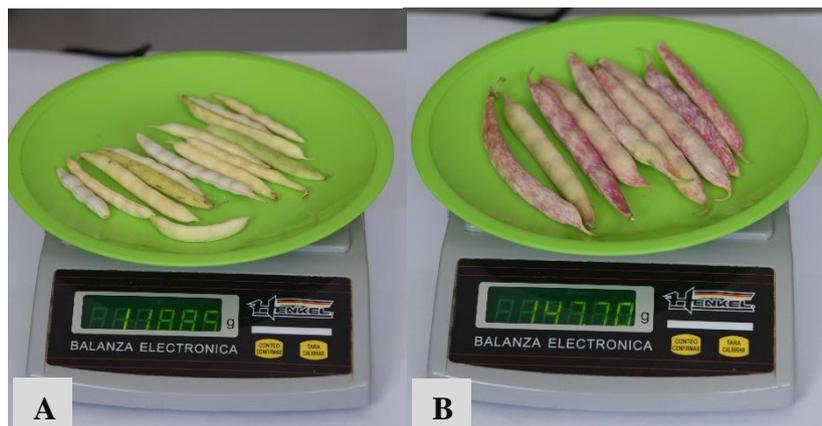
Para medir la longitud de las vainas se cosecho las vainas de cada planta evaluada, para luego ser medida con ayuda de un vernier de precisión. Esto se realizó a cuatro vainas de cada planta, para luego promediar la longitud de las cuatro vainas obteniendo así una muestra representativa (Figura 17).



**Figura 17.** Medición de longitud de vaina chaucha (A) y panamito (B)

### 2.12.6. Peso de las vainas (g)

El peso de las vainas de frejol es un indicador para evaluar la calidad y el rendimiento del cultivo. Para esta actividad se usó una balanza electrónica, lo que permitió obtener datos precisos y consistentes, esenciales para una investigación más sólida (Figura 18). Para ello, se pesó todas las vainas de cada planta evaluada, esta medida nos indicó la salud y el desarrollo de las plantas.



**Figura 18.** Peso de las vainas panamito (A) y chaucha (B)

### 2.12.7. Peso de los granos (g)

Para medir el peso de los granos de frijol se quitó la cascara dejando solo las semillas de todas vainas cosechadas por planta a evaluar. Es decir, el peso de granos se realizó a cada planta evaluada y luego se promedió por tratamiento. Luego, se procedió a pesar con ayuda de una balanza electrónica en gramos (Figura 19).



**Figura 19.** Peso de los granos Chaucha (A) y panamito (B)

### 2.12.8. Rendimiento (Kg/ha)

Para el rendimiento, se consideró el peso de los granos de todas las plantas en  $1\text{m}^2$ , luego se promedió el peso de todas las plantas en  $1\text{m}^2$ , seguidamente se extrapoló para 1ha ( $10000\text{m}^2$ ), es decir el promedio en  $1\text{m}^2$  se multiplicó por toda el área en 1ha ( $10000\text{m}^2$ ). Esto se realizó a las dos variedades de frijol, de esa manera se obtuvo un rendimiento promedio por hectárea.

## 2.13. Labores culturales

### ▪ Riego

Se aplicó riego por goteo a todas las plantas que conformaban la investigación, se instaló un riego por goteo para las parcelas experimentales (Figura 20). El riego se realizó interdiario, hasta la etapa de llenado y maduración.



**Figura 20.** Riego por goteo

▪ **Enriquecimiento del suelo con compost**

A partir de los resultados obtenidos del análisis de suelo (anexo 1), se optó por enriquecer el suelo con compost de forma homogénea con la finalidad de mejorar las propiedades físicas de la mayoría de los suelos, especialmente suelos con estructura pobre y bajos niveles de materia orgánica, como lo sugiere Kranz et al. (2020). El compost se obtuvo de la Planta de Tratamiento de Residuos Sólidos de la Municipalidad Provincial de Chachapoyas, cuyas propiedades se muestra en el anexo 2, el cual se aplicó en área donde será sembrada la planta (Figura 21)



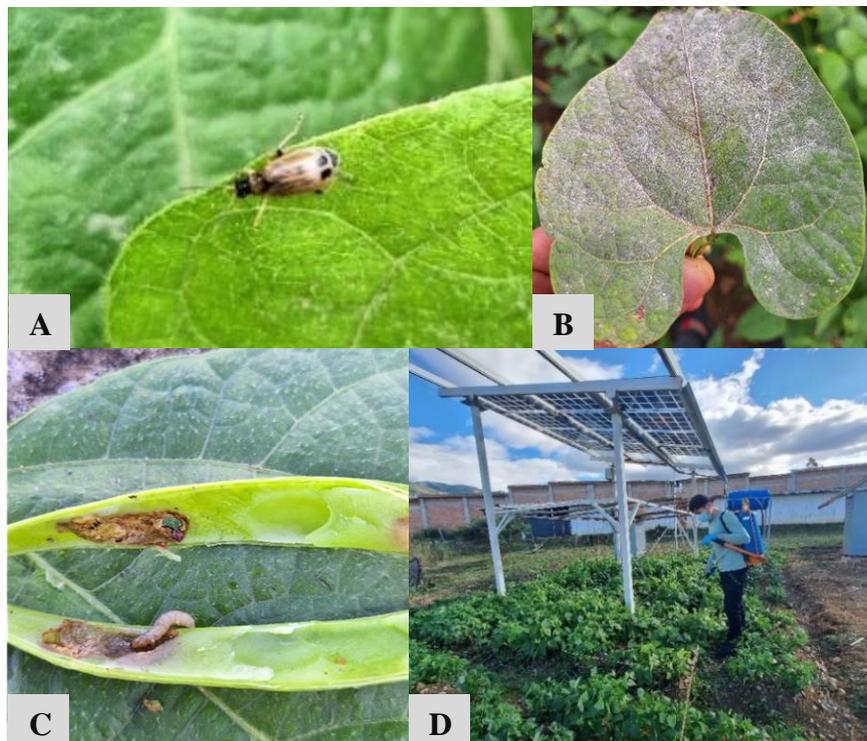
**Figura 21.** A. Suelo sin compost. B. Suelo enriquecido con compost.

- **Control de malezas**

Esta labor se realizó con ayuda de un machete y lampa en tres ocasiones, uno al inicio de la germinación y dos durante la etapa vegetativa con el fin de evitar la competencia por nutrientes, etc.

- **Control fitosanitario**

Se llevó a cabo un monitoreo constante del cultivo con el objetivo de detectar plagas y enfermedades que se presenten el cultivo. Gracias al monitoreo se logró identificar a plagas como el insecto Diabrotica (*Diabrotica* spp) (Figura 22 A) y Perforador de vainas (*Heliothis* spp) (Figura 22 C). En cuanto a las enfermedades se encontró al hongo Oídio o mildiu polvoriento (*Erysiphe polygoni*) (Figura 22 B). Para el control de plagas se usó un insecticida Lovera (Lambda-cyhalothrin 105 g/l + Thiamethoxam 141g/l), con una concentración de 15 ml por mochila fumigadora de 20 L (Figura 22 D). Para el caso de hongo mildiu polvoriento se usó un producto químico con nombre comercial ORION® 25 EW, es un fungicida sistémico con acción protectora, curativa y erradicante con ingrediente activo Tebuconazole.



**Figura 22.** Plagas, enfermedades y control

### III. RESULTADOS

#### 3.1. Germinación de semillas

A los 7 días de la germinación se tuvo 87 semillas germinadas de 100 de la variedad chaucha y 91 semillas germinadas de 100 de la variedad panamito (Figura 23). A continuación, se representará en porcentaje de germinación para las dos variedades.

- Variedad panamito

$$\text{Porcentaje de germinación} = \frac{91}{100} \times 100 = 91\%$$

- Variedad Chaucha

$$\text{Porcentaje de germinación} = \frac{87}{100} \times 100 = 87\%$$

En ese sentido, los porcentajes de germinación obtenidos para las dos variedades de semillas fueron:

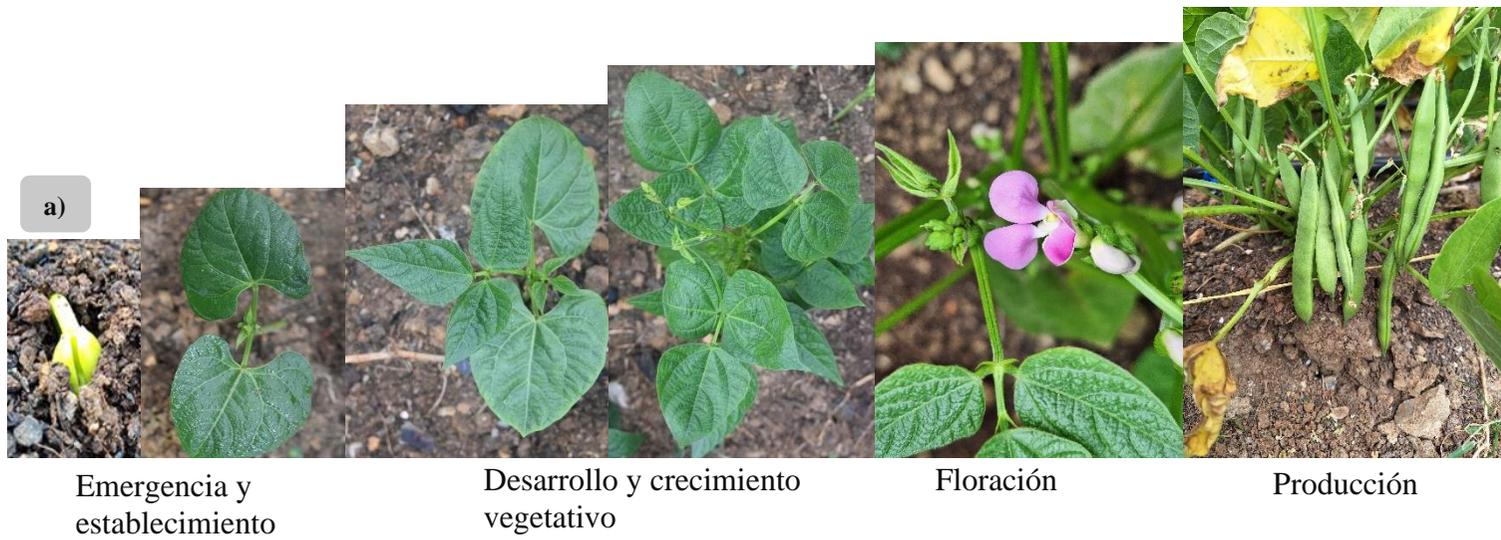
- **Panamito: 91% y Chaucha: 87%**



**Figura 23.** A. Germinación de semillas chaucha y panamito respectivamente.

#### 3.2. Desarrollo morfológico del cultivo de frejol

En la figura 24, se muestra desarrollo fenológico de las dos variedades (panamito y chaucha) que tuvo el cultivo bajo los sistemas fotovoltaicos, este proceso va desde la emergencia hasta la productividad.



**Figura 24.** Desarrollo morfológico del frejol chaucha (a) y panamito (b)

### 3.3. Días a la emergencia

No existen diferencias estadísticas significativas para días a la emergencia (Tabla 3). Esto nos indica que no hay efecto en la interacción para días a la emergencia, con respecto a los sistemas, variedades y distanciamiento de siembra.

**Tabla 3.** Anva para días a la emergencia

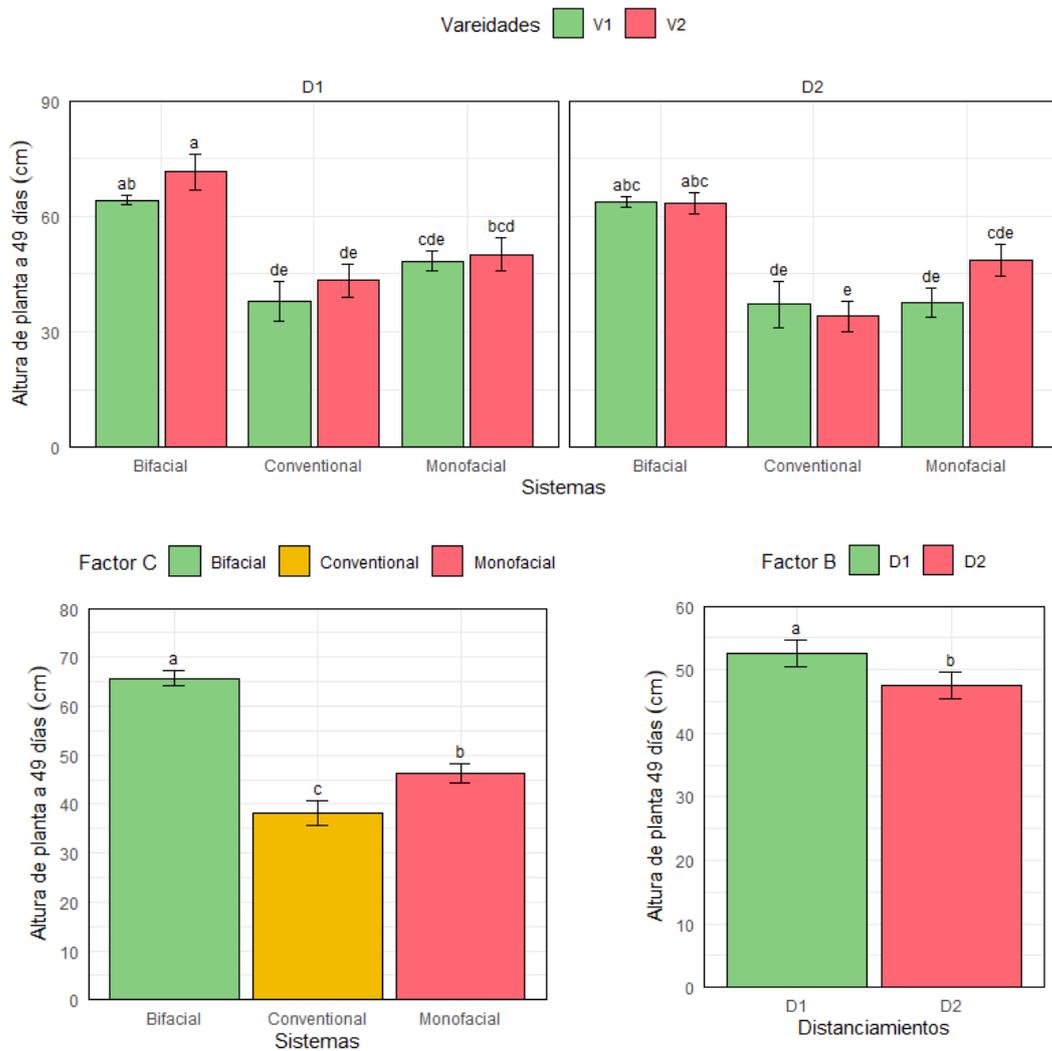
Factor	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	Sig
Blocks	2	50.889	25.444	37.684	0.000	***
Sistemas	2	2.889	1.444	2.139	0.122	ns
Variedad	1	0.111	0.111	0.165	0.686	ns
Distanciamiento de siembra	1	1.000	1.000	1.481	0.226	ns
Sistemas: variedad	2	0.222	0.111	0.165	0.848	ns
Sistemas: distanciamiento	2	2.000	1.000	1.481	0.231	ns
Variedad: distanciamiento	1	2.778	2.778	4.114	0.045	*
Sistemas: variedad: distanciamiento	2	0.222	0.111	0.165	0.848	ns
Residuals	130	87.778	0.675			
Blocks						
Significance		0.001 ***	0.01 **	0.05 *		

### 3.4. Altura de planta (cm)

En la variable altura de planta, a los 21 días no hubo diferencias significativas entre los tratamientos. Sin embargo, a los 49 y 91 días sí se observaron diferencias importantes en la interacción de estos factores. La variedad Chaucha, en el sistema bifacial con distanciamiento de 25 cm (T11), alcanzó la mayor altura a los 49 y 91 días (71.51 cm y 139.38 cm respectivamente). En contraste, la menor altura fue con la misma variedad y un distanciamiento de 35 cm en sistema convencional (T4), registrando 34.03 cm y 102.3 cm. Asimismo, se observa que el factor B (distanciamientos de siembra), existen diferencias significativas, donde el D1 (25cm) tiene mejores resultados para altura de planta a los 49 días y 91 días. También, para el factor C (sistemas), existen diferencias altamente significativas entre sistemas, donde el sistema nuevamente el sistema bifacial obtuvo los mejores resultados para altura de planta a los 49 días y 91 días, como se muestra en las tablas 4 y 5 figuras 25 y 26.

**Tabla 4.** Anva para altura de planta a los 49 días

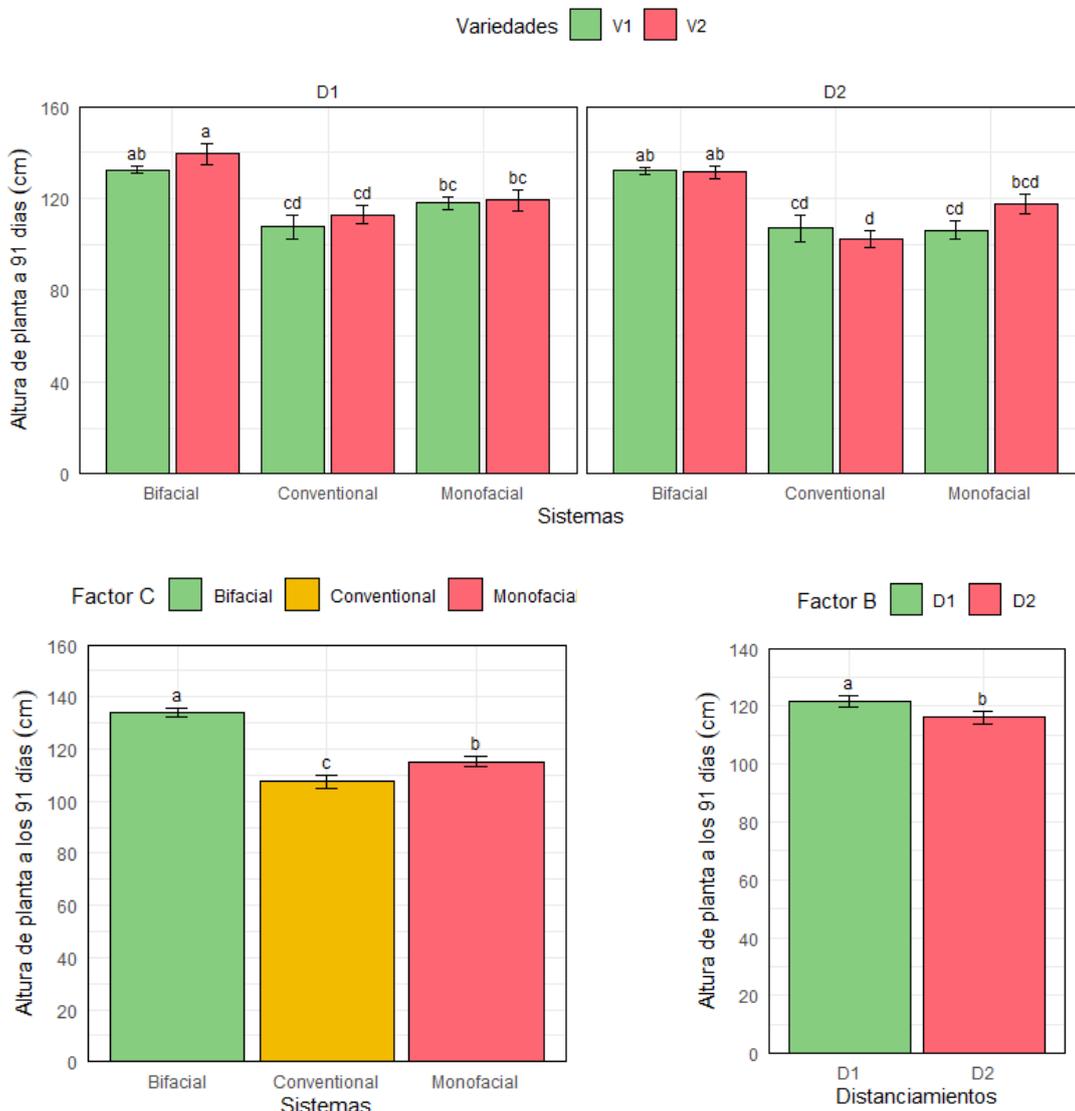
Factor	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	Sig
Blocks	2	7778.693	3889.347	30.132	0.0000	***
Sistemas	2	19351.572	9675.786	74.962	0.0000	***
Variedad	1	485.211	485.211	3.759	0.0547	ns
Distanciamiento de siembra	1	954.141	954.141	7.392	0.0074	**
Sistemas: variedad	2	159.793	79.897	0.619	0.5401	ns
Sistemas: distanciamiento	2	20.319	10.159	0.079	0.9244	ns
Variedad: distanciamiento	1	48.453	48.453	0.375	0.5412	ns
Sistemas: variedad: distanciamiento	2	588.892	294.446	2.281	0.1062	ns
Residuals	130	16779.840	129.076			
---						
Significance		0.001 ***	0.01 **	0.05 *		



**Figura 25.** Análisis Tukey para altura de planta a los 49 días

**Tabla 5.** Anva para altura de planta a los 91 días

Factor	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	Sig
Blocks	2	7778.693	3889.347	30.132	0.0000	***
Sistemas	2	19351.572	9675.786	74.962	0.0000	***
Variedad	1	485.211	485.211	3.759	0.0547	ns
Distanciamiento de siembra	1	954.141	954.141	7.392	0.0074	**
Sistemas: variedad	2	159.793	79.897	0.619	0.5401	ns
Sistemas: distanciamiento	2	20.319	10.159	0.079	0.9244	ns
Variedad: distanciamiento	1	48.453	48.453	0.375	0.5412	ns
Sistemas: variedad: distanciamiento	2	588.892	294.446	2.281	0.1062	ns
Residuals	130	16779.840	129.076			
---						
Significance		0.001 ***	0.01 **	0.05 *		



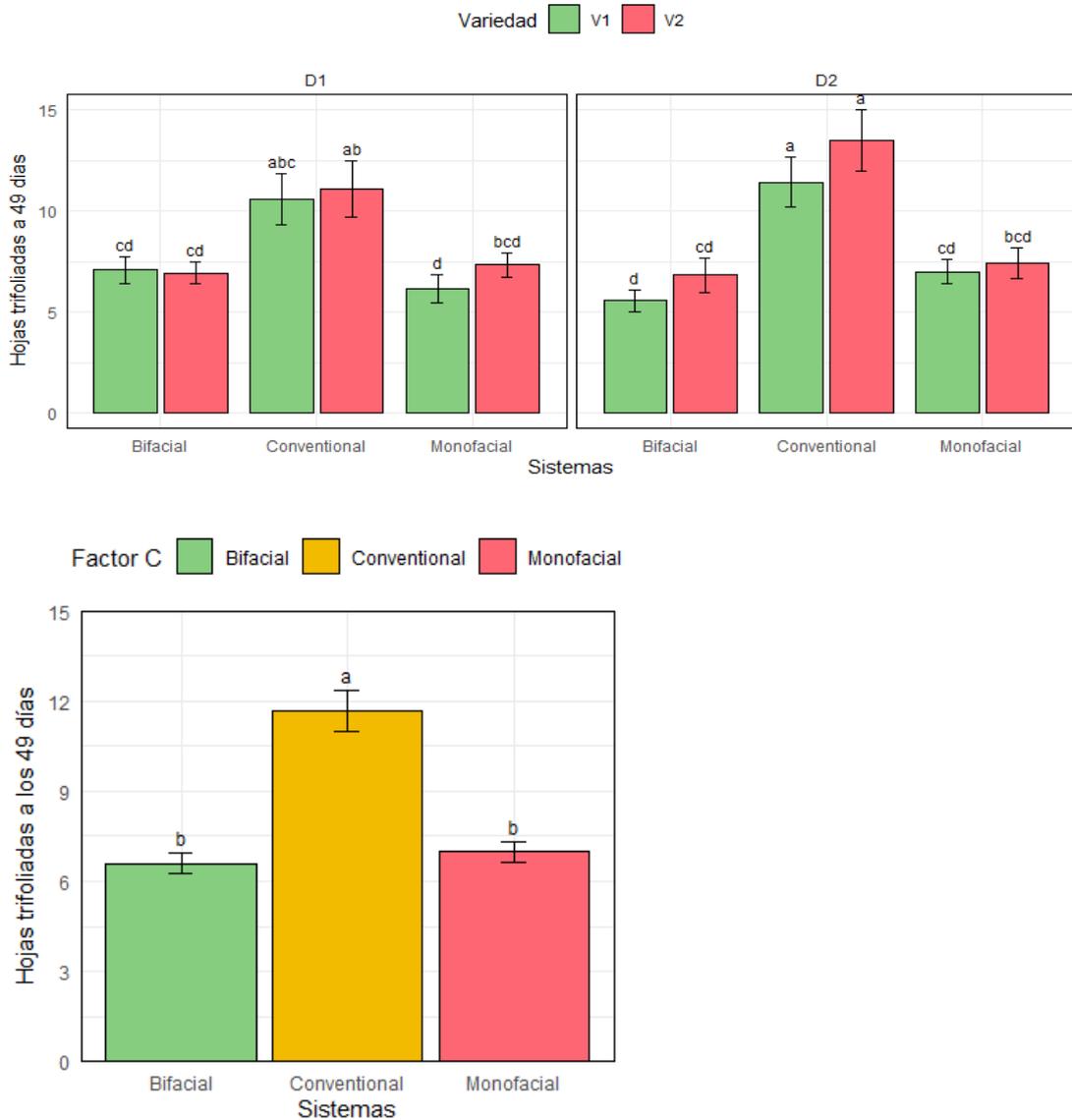
**Figura 26.** Análisis Tukey para altura de planta a los 91 días

### 3.5. Número de hojas trifoliadas

A los 21, no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos indicando, que los sistemas, variedades y distanciamiento de siembra, no afectaron el crecimiento en esta etapa (Anexo 2 y 3). No obstante, a los 49 días sí hubo diferencias significativas para la interacción entre sistemas, variedad y distanciamiento de siembra. Se observan seis grupos estadísticos, donde la interacción entre el sistema de siembra convencional más la variedad panamito con distanciamiento 35 cm (T2), obtuvo el mayor número de hojas trifoliadas con un valor promedio de 11.42 hojas por planta. Asimismo, la misma variedad y distanciamiento, pero en el sistema de siembra bifacial (T10), obtuvo el menor número de hojas trifoliadas con un promedio de 5.58 hojas por planta. Asimismo, existen diferencias estadísticas altamente significativas para el factor c, donde el sistema convencional, obtuvo el mayor número de hojas trifoliadas a los 49 días de evaluación, tabla 6 figura 27. A los 91 días existen diferencias altamente significativas para los sistemas (Factor C), donde el sistema bifacial, obtuvo el mayor número de hojas trifoliadas, como se muestra en la tabla 7 y figura 28.

**Tabla 6.** Anva para hojas trifoliadas a los 49 días.

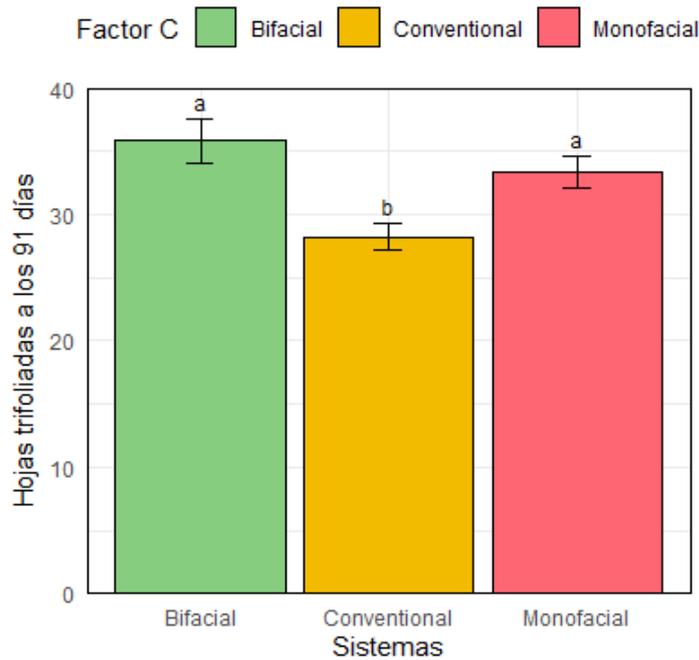
Factor	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	Sig
Blocks	2	336.681	168.340	19.738	0.000	***
Sistemas	2	757.389	378.694	44.402	0.000	***
Variedad	1	27.563	27.563	3.232	0.075	ns
Distanciamiento de siembra	1	6.674	6.674	0.782	0.378	ns
Sistemas: variedad	2	3.500	1.750	0.205	0.815	ns
Sistemas: distanciamiento	2	35.056	17.528	2.055	0.132	ns
Variedad: distanciamiento	1	5.063	5.063	0.594	0.442	ns
Sistemas: variedad: distanciamiento	2	10.167	5.083	0.596	0.552	ns
Residuals	130	1108.736	8.529			
Significance		0.001 ***	0.01 **	0.05 *		



**Figura 27.** Análisis Tukey para hojas trifoliadas a 49 días.

**Tabla 7.** Anva para hojas trifoliadas a los 91 días

Factor	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	Sig
Blocks	2	17.3889	8.6944	0.0927	0.9115	ns
Sistemas	2	1433.5556	716.7778	7.6438	0.0007	***
Variedad	1	25.8403	25.8403	0.2756	0.6005	ns
Distanciamiento de siembra	1	7.5625	7.5625	0.0806	0.7769	ns
Sistemas: variedad	2	26.7222	13.3611	0.1425	0.8673	ns
Sistemas: distanciamiento	2	85.1667	42.5833	0.4541	0.6360	ns
Variedad: distanciamiento	1	396.6736	396.6736	4.2302	0.0417	*
Sistemas: variedad: distanciamiento	2	102.3889	51.1944	0.5459	0.5806	ns
Residuals	130	12190.36	93.77			
Significance		0.001 ***	0.01 **	0.05 *		



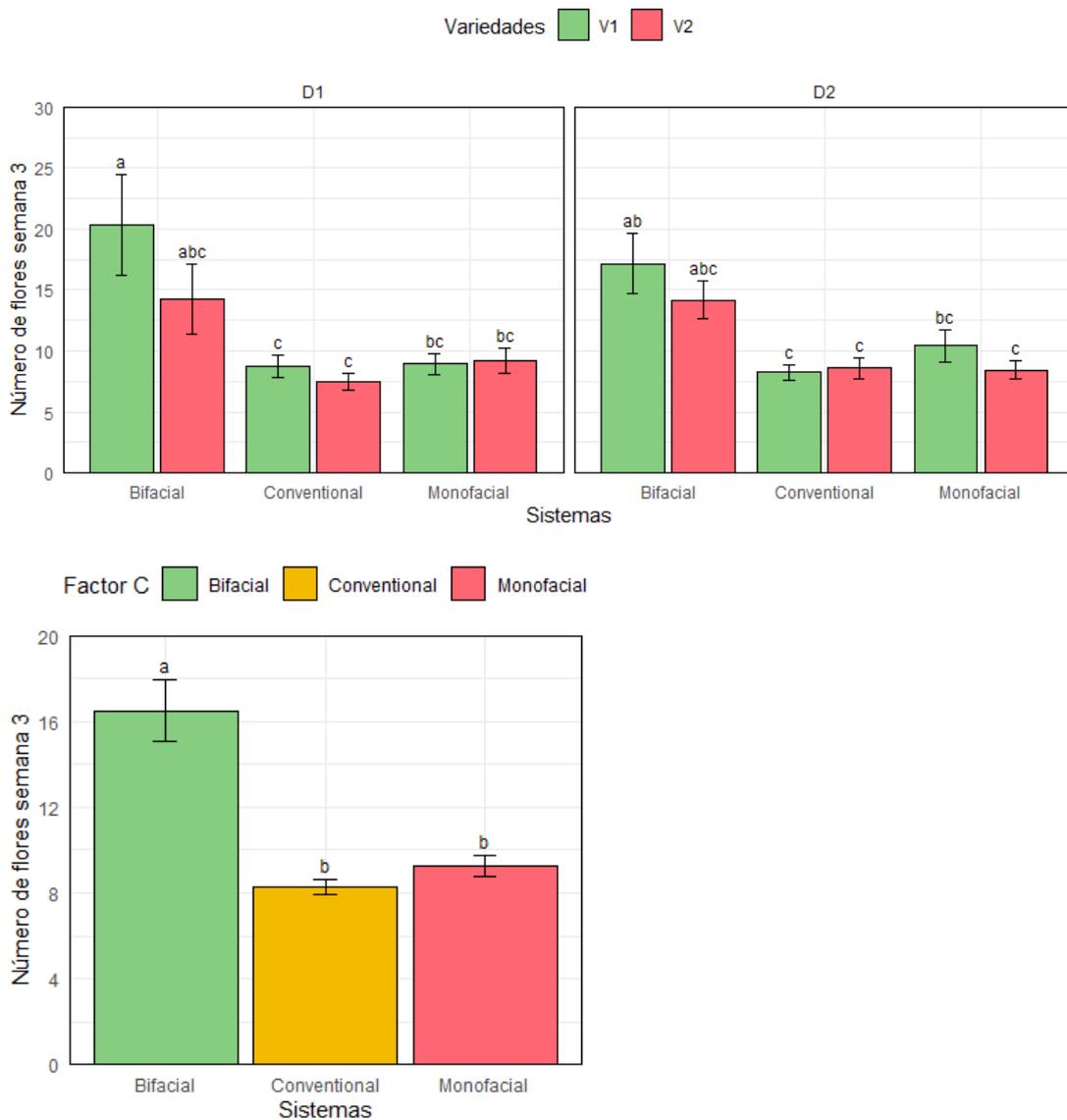
**Figura 28.** Anva para hojas trifoliadas a los 91 días

### 3.6. Número de flores por planta (semanas)

No existen diferencias estadísticas significativas en los tratamientos en la semana uno, dos y cuatro de evaluación (Anexos 4, 5 y 6). Esto indica que no hay efecto en número de flores por planta, con respecto a los sistemas, variedades y distanciamiento en estas semanas. Contrariamente, en la semana tres si existe diferencias estadísticas significativas para la interacción entre sistemas, variedades y distanciamiento. Se muestran cinco grupos estadísticos, donde la variedad panamito con la interacción del sistema bifacial y distanciamiento 25 cm (T9), obtuvo el mayor número de flores en la semana 3 con un valor promedio de 20.33 flores por planta. El menor número de flores en esa semana lo obtuvo la variedad chaucha en el sistema convencional en el mismo distanciamiento (T3), con un valor promedio de 7.5 flores por planta. Asimismo, existen diferencias altamente significativas para los sistemas (Factor C), donde en el sistema bifacial se obtuvo el mayor número de flores. Estos resultados se pueden observar en la Tabla 8 y la Figura 29.

**Tabla 8.** Anva para número de flores semana 3

Factor	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	Sig
Blocks	2	273.389	136.694	3.608	0.030	*
Sistemas	2	1933.722	966.861	25.518	0.000	***
Variedad	1	138.063	138.063	3.644	0.058	ns
Distanciamiento de siembra	1	3.674	3.674	0.097	0.756	ns
Sistemas: variedad	2	121.167	60.583	1.599	0.206	ns
Sistemas: distanciamiento	2	30.722	15.361	0.405	0.668	ns
Variedad: distanciamiento	1	5.840	5.840	0.154	0.695	ns
Sistemas: variedad: distanciamiento	2	45.389	22.694	0.599	0.551	ns
Residuals	130	4925.694	37.890			
Significance		0.001 ***	0.01 **	0.05 *		



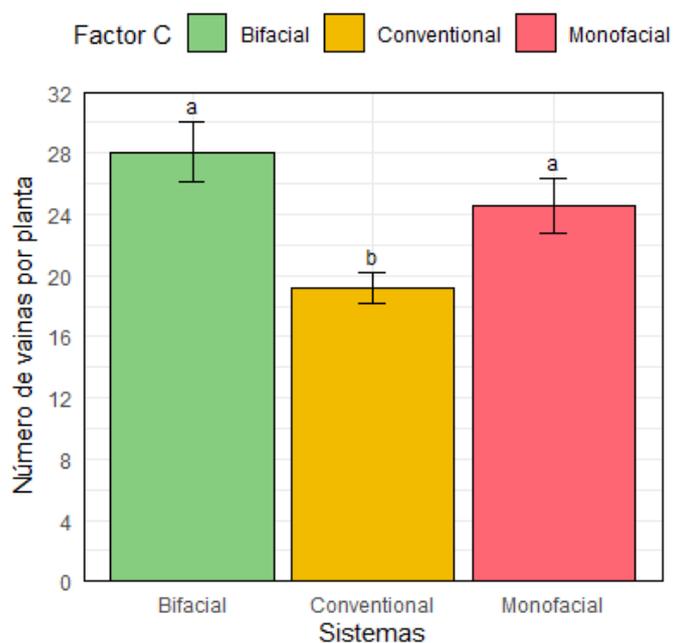
**Figura 29.** Análisis Tukey para número de flores semana 3

### 3.7. Número de vainas por planta

No existen diferencias estadísticas significativas para los tratamientos en el número de vainas por planta. Esto nos indica que no hay efecto en el número de vainas por planta con respecto a las variedades y distanciamiento de siembra. Sin embargo, si existe diferencias altamente significativas para los sistemas (Factor C), donde el bajo el sistema bifacial, se obtuvo el mayor número de vainas con respecto a los demás sistemas, tabla 9 y figura 30.

**Tabla 9.** Anva para el número de vainas por planta

Factor	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	Sig
Blocks	2	1958.431	979.215	8.193	0.000	***
Sistemas	2	1910.264	955.132	7.992	0.001	***
Variedad	1	676.000	676.000	5.656	0.019	*
Distanciamiento de siembra	1	200.694	200.694	1.679	0.197	ns
Sistemas: variedad	2	129.542	64.771	0.542	0.583	ns
Sistemas: distanciamiento	2	86.431	43.215	0.362	0.697	ns
Variedad: distanciamiento	1	113.778	113.778	0.952	0.331	ns
Sistemas: variedad: distanciamiento	2	7.597	3.799	0.032	0.969	ns
Residuals	130	15536.569	119.512			
---						
Significance		0.001 ***	0.01 **	0.05 *		



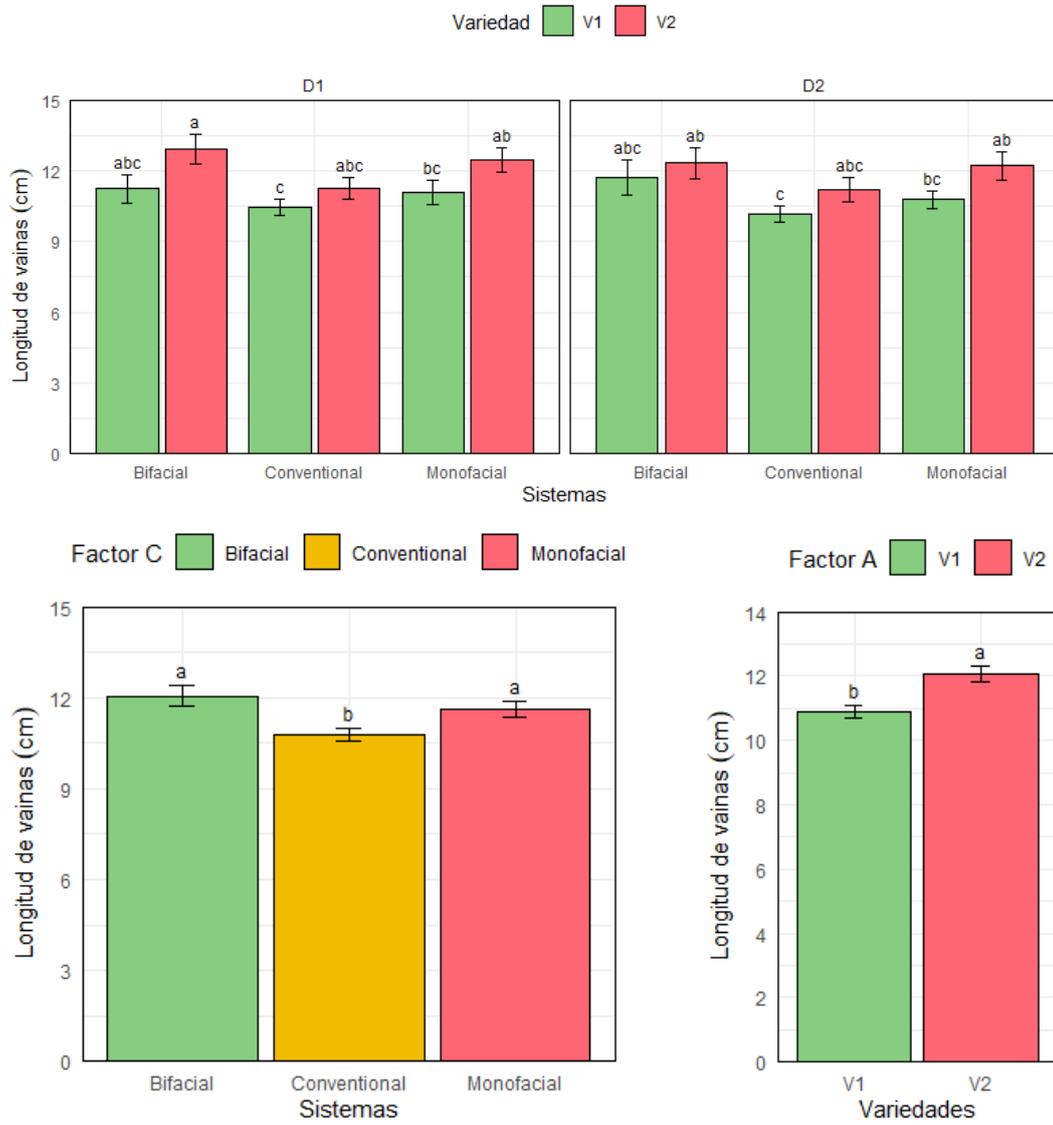
**Figura 30.** Análisis Tukey para número de vainas

### 3.8. Longitud de las vainas (cm)

Existen diferencias significativas para longitud de vainas con respecto a los tratamientos entre sistemas, variedad y distanciamiento de siembra. Se observan cinco grupos estadísticos, donde la variedad chaucha, con la interacción del sistema bifacial y un distanciamiento de siembra a 25 cm (T11), obtuvo la mayor longitud de vainas con un valor promedio de 12.92 cm. Mientras que la menor longitud lo obtuvo la variedad panamito con distanciamiento 35 cm en el sistema convencional (T2). Asimismo, se muestran diferencias altamente significativas para los sistemas (Factor C), donde las vainas de las platas sembradas bajo el sistema bifacial, obtuvieron la mayor longitud con respecto a los demás sistemas. Además, también existen diferencias altamente significativas para las variedades (Factor A), donde la variedad chaucha fue la que obtuvo la mayor longitud de vainas, como se observa en la tabla 10 y figura 31.

**Tabla 10.** Anva para longitud de vainas

Factor	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	Sig
Blocks	2	246.445	123.223	74.789	0.000	***
Sistemas	2	41.428	20.714	12.572	0.000	***
Variedad	1	48.463	48.463	29.414	0.000	***
Distanciamiento de siembra	1	0.942	0.942	0.572	0.451	ns
Sistemas: variedad	2	1.456	0.728	0.442	0.644	ns
Sistemas: distanciamiento	2	0.261	0.130	0.079	0.924	ns
Variedad: distanciamiento	1	0.695	0.695	0.422	0.517	ns
Sistemas: variedad: distanciamiento	2	2.910	1.455	0.883	0.416	ns
Residuals	130	214.189	1.648			
---						
Significance		0.001 ***	0.01 **	0.05 *		



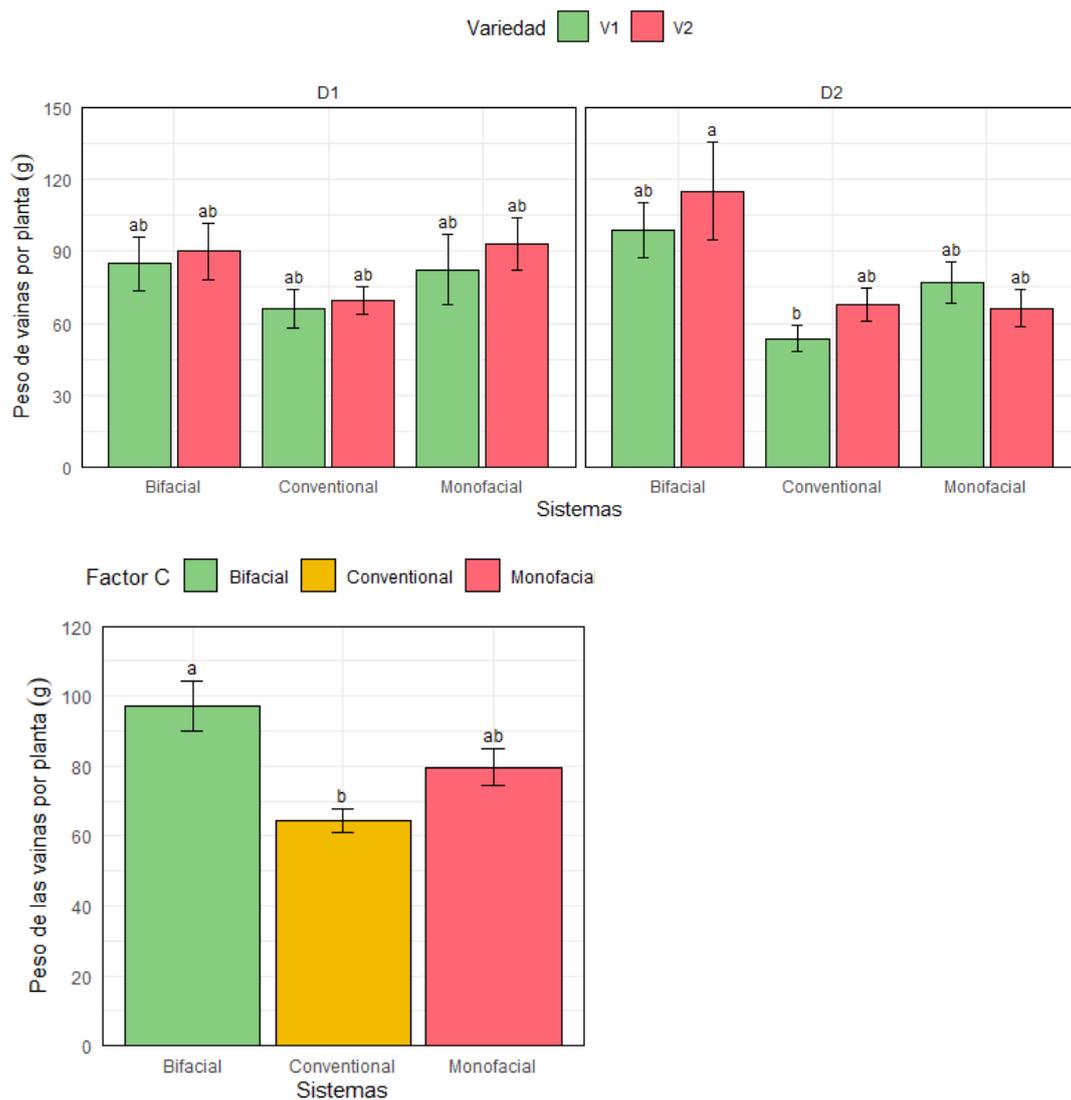
**Figura 31.** Análisis Tukey para longitud de vainas

### 3.9. Peso de las vainas por planta (g)

Existen diferencias significativas para el peso de vainas por planta con respecto a los tratamientos. Se observan tres grupos estadísticos, donde la variedad chaucha, con la interacción del sistema bifacial y un distanciamiento de siembra a 35 cm (T12), obtuvo el mayor peso promedio de 115.09 g de vainas por planta. Asimismo, el menor peso lo obtuvo la variedad panamito con un peso promedio de 53.65 g, a un distanciamiento entre planta de 35 cm, sembrado bajo en el sistema convencional (T2). Igualmente, existen diferencias altamente significativas para los sistemas (Factor C), donde el peso de las vainas de plantas sembradas bajo el sistema bifacial, obtuvieron el mayor peso, estos resultados se observan en la tabla 11 y figura 32.

**Tabla 11.** Anva para peso de vainas

Factor	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	Sig
Blocks	2	1926.35	963.18	0.67	0.513	ns
Sistemas	2	26084.82	13042.41	9.09	0.000	***
Variedad	1	1516.58	1516.58	1.06	0.306	ns
Distanciamiento de siembra	1	48.77	48.77	0.03	0.854	ns
Sistemas: variedad	2	751.31	375.65	0.26	0.770	ns
Sistemas: distanciamiento	2	8233.84	4116.92	2.87	0.060	ns
Variedad: distanciamiento	1	0.40	0.40	0.00	0.987	ns
Sistemas: variedad: distanciamiento	2	2130.08	1065.04	0.74	0.478	ns
Residuals	130	186469.54	1434.38			
---						
Significance		0.001 ***	0.01 **	0.05 *		



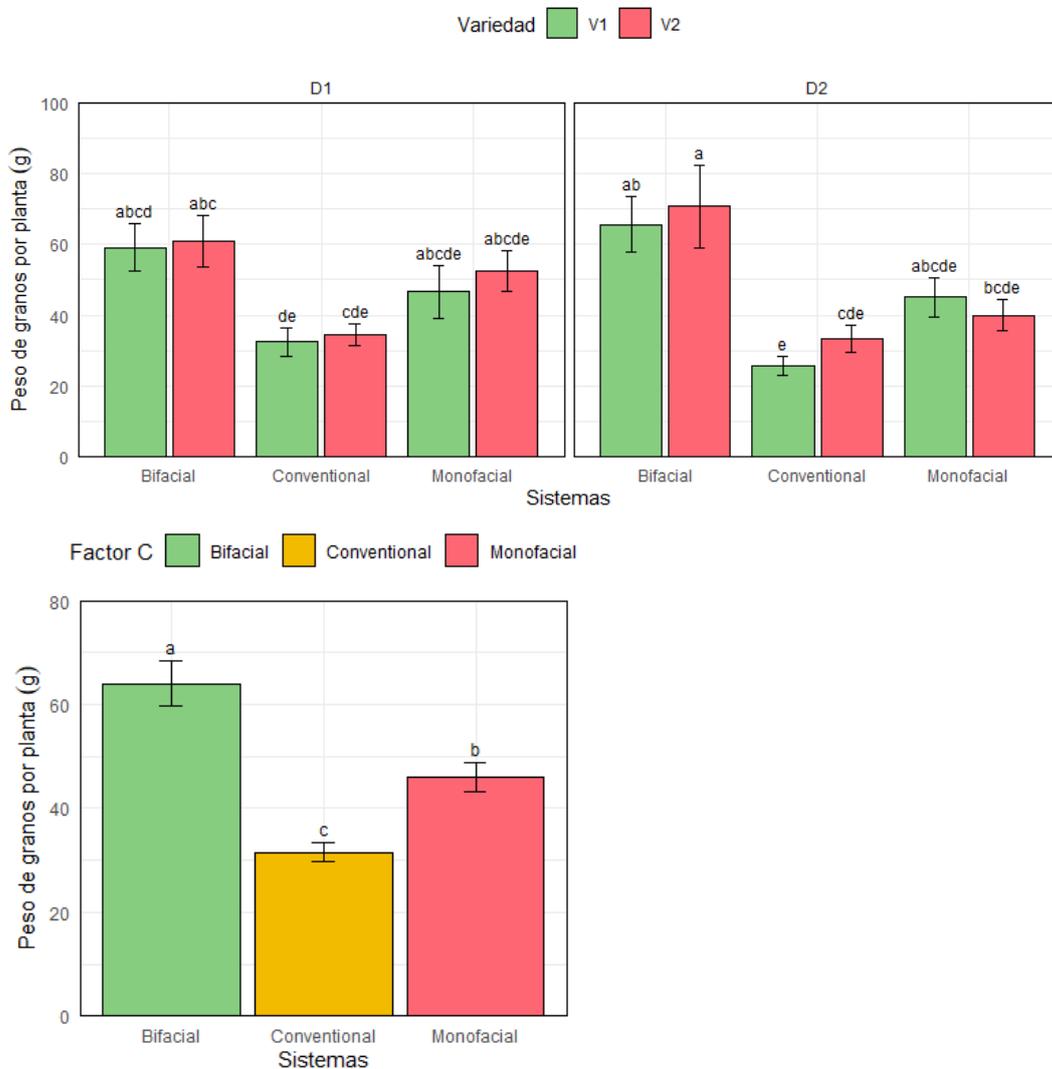
**Figura 32.** Análisis Tukey para peso de vainas por planta

### 3.10. Peso de los granos por planta (g)

Existen diferencias significativas para el peso de granos por planta para los tratamientos. Se observan ocho grupos estadísticos, donde la variedad chaucha, con la interacción del sistema bifacial y un distanciamiento de siembra a 35 cm (T12), obtuvo el mayor peso de granos, con valor promedio de 70.69 g. A su vez, la variedad panamito en el sistema convencional, con distanciamiento de siembra 35 cm (T2), obtuvo el menor peso de granos con un promedio de 25.68 g. Además, existen diferencias altamente significativas para los sistemas (Factor C), donde los granos de las plantas sembradas bajo el sistema bifacial, obtuvieron el mayor peso de los granos, como se aprecia en la tabla 12 y figura 32.

**Tabla 12.** Anva para el peso de los granos

Factor	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	Sig
Blocks	2	1180.087	590.044	1.234	0.2944	ns
Sistemas	2	25487.345	12743.673	26.662	0.0000	***
Variedad	1	293.694	293.694	0.614	0.4345	ns
Distanciamiento de siembra	1	27.834	27.834	0.058	0.8097	ns
Sistemas: variedad	2	134.136	67.068	0.140	0.8692	ns
Sistemas: distanciamiento	2	1534.525	767.263	1.605	0.2048	ns
Variedad: distanciamiento	1	3.709	3.709	0.008	0.9299	ns
Sistemas: variedad: distanciamiento	2	498.890	249.445	0.522	0.5946	ns
Residuals	130	62135.593	477.966			
---						
Significance		0.001 ***	0.01 **	0.05 *		



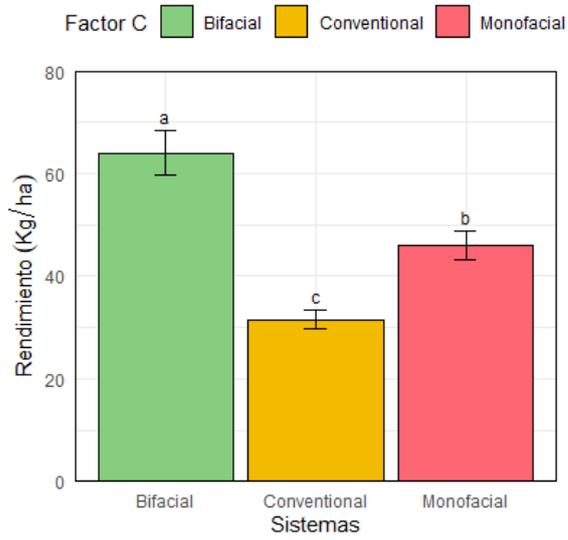
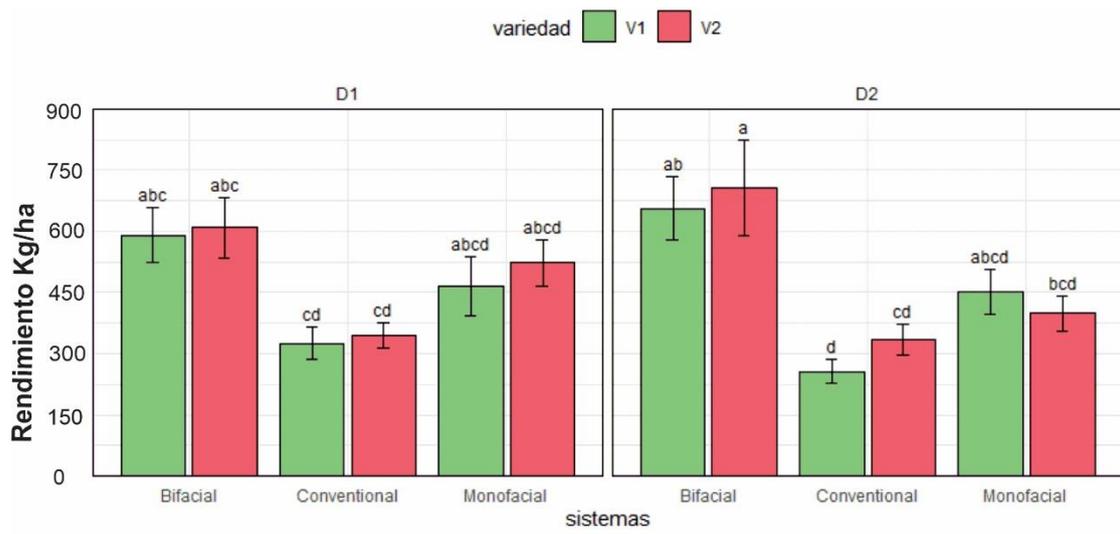
**Figura 33.** Análisis Tukey para peso de granos (g)

### 3.11. Rendimiento (Kg/ha)

Se evaluó el rendimiento de dos variedades de frejol, panamito (V1) y chaucha (V2), bajo tres sistemas de cultivo (bifacial, convencional y monofacial) y dos distanciamientos de siembra D1 (25 cm), D2 (35cm). Los resultados indican que el sistema bifacial, combinado con un distanciamiento 35 cm (T12), mostró los mejores resultados, destacando la variedad Chaucha, que alcanzó el mayor rendimiento de 70.69 g/m<sup>2</sup> que convertido en 1ha es 706.9 kg/ha. En general, la variedad chaucha superó ligeramente a panamito en todos los sistemas y distanciamientos, excepto en el sistema monofacial donde el panamito fue mejor con un distanciamiento de 35 cm. Asimismo, existen diferencias altamente significativas para los sistemas (Factor C), donde se observa que, en el sistema bifacial, se obtuvieron los mejores resultados en cuanto a rendimiento con respecto a los demás sistemas, como se aprecia en la tabla 12 y figura 32.

**Tabla 13.** Anva para rendimiento Kg/ha

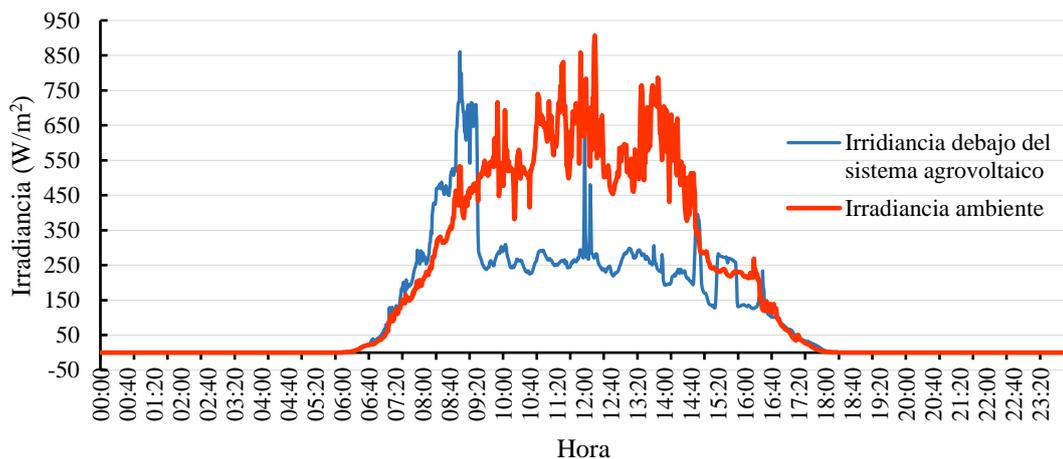
Factor	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	Sig
Blocks	2	1180.087	590.044	1.234	0.294	ns
Sistemas	2	25487.345	12743.673	26.662	0.000	***
Variedad	1	293.694	293.694	0.614	0.435	ns
Distanciamiento de siembra	1	27.834	27.834	0.058	0.810	ns
Sistemas: variedad	2	134.136	67.068	0.140	0.869	ns
Sistemas: distanciamiento	2	1534.525	767.263	1.605	0.205	ns
Variedad: distanciamiento	1	3.709	3.709	0.008	0.930	ns
Sistemas: variedad: distanciamiento	2	498.890	249.445	0.522	0.595	ns
Residuals	130	62135.593	477.966			
---						
Significance		0.001 ***	0.01 **	0.05 *		



**Figura 34.** Anva para rendimiento Kg/ha

### 3.12. Irradiancia ambiente y bajo el sistema fotovoltaico

La irradiancia es la intensidad de la luz solar que llega a un área específica en un tiempo determinado. Se midió la irradiancia promedio durante todo el periodo de evaluación del estudio. En la figura 33, se muestra que irradiancia es a partir de las 6.30 am hasta 17:30 aproximadamente. En la gráfica las curvas de color azul representan a la irradiancia bajo los sistemas fotovoltaicos, alcanzando un pico más a las 8: 30 am hasta las 9:00 am, esto debido a la posición de los paneles que durante esa hora recibe con mayor magnitud los rayos solares. Asimismo, las gráficas de color rojo representan a la irradiancia que cae en superficie terrestre, es decir fuera de los paneles, presentan una curva de irradiancia constante desde las 6.30 am hasta las 17.30 horas que es cuando el sol se oculta, teniendo su pico más alto de irradiancia desde las 9:00 hasta las 15:00 horas que son las horas de mayor radiación solar.



**Figura 35.** Irradiancia promedio durante el ciclo del cultivo

#### IV. DISCUSIÓN

En la investigación se realizó la germinación de semillas, previo a sembrar en las parcelas. Los resultados mostraron una tasa de germinación del 87 % para la variedad chaucha y 91 % para la variedad panamito a los 7 días después de poner a germinar. Estos resultados son debido a que la variedad panamito tiene mejor viabilidad y vigor germinativo en comparación con la variedad chaucha. es debido a factores genéticos de cada variedad, así como también la calidad y tipo de semilla. La tasa de germinación de ambas variedades supera lo establecido por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Ganadería (FAO, 2018), la cual establece que para bancos de germoplasma el valor inicial de germinación de una semilla deberá ser mayor al 85 % para la mayoría de semillas, exceptuando especies forestales que se aceptan un porcentaje menor.

En ese contexto, existen estudios que reportan tasas de germinación de frejol común, como las variedades 'Biser' (C1) y 'Trešnjevac' (C4) con tasa de germinación del 100%, mientras que para la variedad 'Bijeli' (C2) y 'Kornjača' (C3) alcanzaron un 98% (Vidak et al., 2022). Asimismo, se reporta un porcentaje de germinación de 96 %, para una variedad KBL-3, seguido de las demás variedades PB0002 (95 %) y PB0001 (93 %), mientras que el menor porcentaje de germinación 69% se observó en la variedad KBL-1 (Uprety et al., 2021). Este estudio tiene una tasa de germinación con más vigor germinativo a las semillas que usamos en la investigación, sin embargo no se alejan de los porcentajes de otros estudios. De ahí que, los resultados obtenidos en la investigación en relación a los estudios antes mencionados, las variedades de frejol panamito y chaucha están en un porcentaje de germinación aceptable.

En cuanto a días a la emergencia, no existen diferencias estadísticas significativas para los tratamientos. Esto nos indica que no hay efecto en días a la emergencia, con respecto a los tratamientos distribuidos en los sistemas agrolvoltaicos monofacial, bifacial y el control. Esto se aduce a que la mayoría de las plantas correspondientes a la investigación, germinaron en un rango de 7 a 10 días, por lo cual no se registraron diferencias estadísticas.

La altura de la planta es un indicador sustancial del crecimiento del cultivo, ya que contribuye a la evaluación de la productividad del cultivo y a la toma de decisiones en

el manejo del mismo (Xie et al., 2021). Es por ello, que se realizó las evaluaciones a los 21 días (inicio del desarrollo vegetativo), a los 49 días (etapa media del desarrollo del cultivo) y los 91 días (etapa de producción cerca de la cosecha).

En cuanto la evaluación de altura de planta a los 21 días no se tuvo diferencias significativas, debido a que la altura en esa etapa fenológica era similar para todas las plantas de frejol evaluadas. Mientras que, a los 49 días si hubo diferencias estadísticas significativas donde, la variedad chaucha con la interacción del sistema bifacial y distanciamiento de siembra de 25 cm entre planta y planta, mostró la mayor altura promedio de 69.38 cm, respecto a los demás tratamientos. Por otro lado, la variedad chaucha con la interacción del sistema convencional, pero con un distanciamiento de siembra 35 cm entre planta y planta, presentó la menor altura promedio de 32,30 cm.

La variedad chaucha obtuvo la mayor altura de planta en comparación a lo estimado por Frühauf et al. (2022), quienes desarrollaron modelos de crecimiento de frejol donde muestran que, en un rango de 40 a 50 días, la altura oscila entre 45 a 60 cm, por lo que, la variedad panamito está por debajo de lo reportado por los autores, a pesar, que son variedades distintas. Esta diferencia el sistema utilizado influyen significativamente en la altura de las plantas, generalmente se debe a la competencia de luz, nutrientes en un distanciamiento de siembra más alta y tipo de variedad de frejol. Este resultado refuerza lo dicho por Kumar et al. (2020), quienes indican en su estudio las condiciones óptimas y un distanciamiento de siembra menor favorecen a una altura de planta máxima, mientras que las condiciones subóptimas, eso se debe a un nivel bajo de nutrientes más un alto distanciamiento de siembra se tendrá una altura mínima.

Asimismo, a los 91 días la interacción de la variedad chaucha con el sistema bifacial sigue con la tendencia de obtener la mayor altura promedio con 139.38 cm. En cambio, la variedad panamito mostró la menor altura promedio de 102.30 cm. Cabe mencionar, que bajos los paneles la altura de planta fue mayor, ya que se vio afectada por la sombra que genera los paneles, a este fenómeno se conoce como etiolación que es el crecimiento anormal de las plantas debido a la falta de luz adecuada (Cossu et al., 2021). Este crecimiento favoreció ya que su producción fue desde la base hasta la parte más alta de la planta, mostrando mayor número de flores, vainas y producción.

Los resultados que se obtuvo a los 21 y 91 días no se muestran diferencias significativas en el número de hojas trifoliadas por planta entre la interacción de sistemas variedad y

distanciamiento de siembra. Sin embargo, a los 49 días si existen diferencias significativas, reforzando la tendencia observada anteriormente, se observa que la variedad chacha con la interacción del sistema convencional, con un distanciamiento de siembra 35 cm, adquirió el mayor número de hojas trifoliadas, esto demuestra que la variedad chaucha sembrado al aire libre con un distanciamiento de siembra 2, causan un desarrollo foliar más vigoroso a medida que avanza el ciclo de cultivo. Por su parte, la variedad panamito bajo el sistema bifacial sembrado con el mismo distanciamiento, obtuvo el menor número de hojas trifoliadas, indicando que esta combinación no ayuda en el desarrollo foliar de la planta.

Los resultados que se obtuvo en la investigación están por debajo a lo reportado por Ali et al. (2019) en donde, el número de hojas trifoliadas son 7.4, 14.0 y 26.0 para 4, 6 y 8 semanas de instalado las plantas respectivamente. Esta diferencia, se debe a que las variedades de frejol y condiciones ambientales. Si bien es cierto, el cultivo de frejol bajo los paneles fotovoltaicos no se vio muy afectado en cuanto al desarrollo y número de hojas por planta, empero, Cossu et al. (2021) mencionan que las plantas de frejol bajo el techo fotovoltaico son afectadas por la escasez de luz, por ende, en el área foliar disminuye.

Para la variable número de flores por planta, a la semana uno, dos y cuatro no se observaron diferencias significativas para los tratamientos. Esto nos indica que no hay efecto en el número de flores por planta con respecto a los tratamientos distribuidos en los sistemas agrovoltaicos monofacial, bifacial y sistema de siembra convencional. Sin embargo, para la semana tres si se observan diferencias significativas para los tratamientos. Se muestran cinco grupos estadísticos, donde la variedad panamito con la interacción del sistema bifacial y distanciamiento de siembra 25 cm, obtuvo el mayor número de flores con un valor aproximado de 21 flores. El menor valor y el menor número de flores en esa semana lo obtuvo la chaucha en el sistema convencional en el mismo distanciamiento, con un valor promedio de 6 flores por planta.

Los resultados obtenidos en la investigación, a los 49 días fueron cercanos a lo expuesto por Rinaldi et al. (2023) donde, a los 28 días y 200 msnm obtuvieron 34 flores, asimismo, a los días y 400 msnm obtuvieron 38 flores por planta, a los 30 días y 600 msnm 19 flores. Finalmente, a los 46 y 49 días con alturas de 800 y 1000 msnm obtuvieron 9 y 4.74 flores respectivamente. Por su parte, Tabot et al. (2021), obtuvieron

un promedio de número de flores por planta de 31.76, 28.33 y 23.33 en sus evaluaciones realizadas. Además, mencionan que las plantas regadas con agua dulce se observó un incremento en el número de flores de frejol.

En el análisis de datos obtenidos en la investigación, reveló que no existen diferencias significativas entre las interacciones para el número de vainas por planta. sin embargo, el número de vainas obtenidos por variedad son diferentes, comparando con otras investigaciones refuerzan lo mencionado.

Los resultados obtenidos, en comparación a Bareke, (2019) menciona, que la variedad influye en el número de vainas por planta, donde las variedades destacadas obtuvieron promedios de vainas por planta de 25.4, 67.4, 51.4, 41.2 y 31. Asimismo, en otra investigación, sus tratamientos más destacados en su primera, segunda y tercera evaluación en cuanto al número de vainas por planta fueron el T2 con ( 4, 15 y 12 vainas ) y el T5 con ( 4,13 y 11 vainas) respectivamente (Madushani & Karunarathna, 2023).

Para la longitud de las vainas hubo diferencias significativas para los tratamientos, en lo cual donde la variedad chaucha, con la interacción del sistema bifacial y un distanciamiento de siembra a 25 cm obtuvo la mayor longitud de vainas con valor promedio de 14.15. Esto podría ser porque las plantas en el distanciamiento de siembra de 25 cm, conjuntamente con el sistema bifacial, puede favorecer un crecimiento más vigoroso y uniforme de las vainas del frejol chaucha. Los resultados encontrados comparando con investigaciones previas son consistentes en cuanto a la longitud de la vaina obtenidos en 25 cm de distanciamiento de siembra.

En un estudio obtuvieron como resultado que la longitud de la vaina fue mayor cuando el distanciamiento de siembra era menor (33 cm), además, de una dosis media de fertilizantes nitrogenados y potásicos. En cuanto a la aplicación de fertilizantes, es decir las plantas fertilizadas con una dosis media de nitrógeno sin potasio produjeron las vainas más largas, siendo las más representativas de (Hussein & Benmoussa, 2023).

Además, en otras investigaciones también mencionan la longitud de vaina como una variable importante, donde con un espaciamiento de 60 x t5 cm entre plantas, combinado con una fertilización de 40.70.53 kg de NPK / ha más cobertura de suelo, se obtuvo una mejor longitud de vaina (20.66 cm) (Neethu et al., 2021). Cabe mencionar, que estos resultados comparando con lo que obtuvimos en el presente trabajo son distintos en

cuanto a modelo de estudio, variedad de frejol, tipo de suelo, entre otras diferencias. Sin embargo, evaluaron la misma variable que es longitud de la vaina donde obtuvieron la mayor longitud fue de 20.66 cm, mientras que en este presente trabajo se obtuvo la mayor longitud de 14.15 cm.

El análisis de varianza realizado para el peso de las vainas si existe diferencias estadísticas significativas para los tratamientos. Donde la variedad chaucha, con la interacción del sistema bifacial y un distanciamiento de siembra a 35 cm obtuvo el mayor peso de vainas por planta. En comparación con otras investigaciones realizadas, mencionan que peso de vaina fue de 17,69 g, esto se dio gracias a la combinación de tratamientos con 60 × 75 cm con 44:70:53 kg ha<sup>-1</sup> + mulching + pulverización de micronutrientes (Neethu et al., 2021). Si bien es cierto, los escenarios de investigación son distintos, pero no se aleja de lo obtenido en esta investigación.

En la evaluación del peso de los granos, se observaron diferencias estadísticas significativas para los tratamientos, destacando la variedad chaucha con la interacción del sistema bifacial y un distanciamiento de siembra a 35 cm obtuvo el mayor peso de granos por planta con un peso promedio de 67.97g, lo que sugiere que esta combinación de factores promueve un desarrollo mayor de granos. Asimismo, la variedad panamito en el mismo sistema bifacial, con distanciamiento de siembra 35 obtuvo el menor peso de granos. Esta diferencia puede estar marcada por las características genéticas y sus respuestas a manejo agronómico. En ese sentido, la calidad en términos de peso del grano se vio afectada porque las plantas bajo los paneles se vieron influidas por la sombra que este generó, bajo el techo fotovoltaico el peso en porcentaje fue de 30 % en la primera evaluación y 45% en la segunda (Cossu et al., 2021).

En comparación con los resultados obtenidos, el peso de los granos no se vio afectada, ya que la producción fue normal incluso mejor bajo los paneles, ya que solo se vio afectada en cuanto al tamaño, mas no en el peso y calidad del grano. Asimismo, en otra investigación se encontró que el número y peso de semillas por vaina había aumentado a medida que aumentaba el espaciado entre hileras, es así que obtuvieron el peso de cien semillas de las distintas variedades Nasir, Goberesha y Asendabo local con 48.82 g, 49.24 g y 89.21 g respectivamente (Merga, 2020). Sin embargo, los resultados obtenidos en la presente investigación se obtuvieron un mayor peso de semillas a 25 cm de

distanciamiento de siembra y sistema bifacial obtuvieron el mayor peso de granos por planta.

Los resultados más destacados correspondientes al rendimiento, muestran que la variedad chaucha, sistema bifacial con distanciamiento de siembra 25, logró el mayor rendimiento en grano alcanzando 706.9 kg/ha. Por su parte, la variedad panamito con distanciamiento de siembra 25, correspondiente al sistema bifacial, también obtuvo un rendimiento notable con 618.9 kg/ha, ligeramente inferior a la variedad chaucha. Estos resultados indican que tanto la variedad chaucha y panamito obtuvieron un rendimiento notable en sistema bifacial con distanciamiento de siembra 25 cm entre planta y planta.

El rendimiento comparado a otras investigaciones, donde obtuvieron un rendimiento de grano mostró diferencias significativas entre cultivares. El cultivar camanejo presentó el mayor rendimiento (2,77 t/ha), y los rendimientos medios obtenidos fueron superiores a la media nacional de 1,2 t/ha (Saravia et al., 2023). Si bien es cierto, estos rendimientos son mayores a lo que se obtuvo, porque son variedades y ambientes diferentes a lo realizado. Asimismo, es importante recalcar que, en el presente trabajo de investigación, no se usó fertilizantes químicos para aumentar la productividad, sin embargo, al ser un suelo con restos de construcción y pobre en nutrientes, se optó por enriquecer con compost producto de desechos orgánicos. En ese sentido, (Rajiv & Tomar, 2022), obtuvieron un rendimiento de vainas verdes de 6,17 t/ha con la aplicación de NPK.

## V. CONCLUSIONES

La productividad del cultivo de frejol bajo sistemas agrovoltaicos (bifacial y monofacial) en comparación con un sistema de siembra convencional fue mayor debido a que los sistemas agrovoltaicos propician el crecimiento de la planta (altura), por lo que se presentan mayor cantidad de flores y, por ende, mayor número vainas.

En cuanto a las variedades evaluadas (panamito y chaucha) se desarrollaron de forma similar en los sistemas agrovoltaicos y convencional. Sin embargo, la variedad chaucha tuvo mejor desarrollo en cuánto a altura de planta bajo el sistema bifacial y monofacial en comparación con el panamito y en el sistema de siembra convencional. Cabe mencionar, que para ambas variedades se tuvo que emplear tutores debido a que bajo los paneles las plantas se etiolaron a pesar de ser variedades con crecimiento determinado.

Los sistemas agrovoltaicos propician condiciones para el cultivo de frejol ya que, la variedad chaucha presentó una productividad por hectárea de 706.9 kg/ha, por ende, tuvo mayores características morfológicas en altura de planta, mayor número de flores, hojas trifoliadas, mayor número de vainas, longitud de vainas, peso de la vainas peso de los granos y rendimiento, en comparación con la variedad panamito la cual presentó una productividad de 618.9 kg/ha mientras que en el sistema convencional se registró 387 kg/ha.

## VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ali, A. D., Habila, S., Isiwu, N. C., Osaji, K. J., & Nyam, D. D. (2019). Effects of Tin Mine Tailings on the Growth and Development of Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in Jos, Nigeria. *Journal of Agriculture and Ecology Research International*, 1–7. <https://doi.org/10.9734/jaeri/2019/v19i130071>
- Bareke, T. (2019). Diversity and genetic potential of various morphological traits among common bean (*Phaseolus vulgaris*, Fabaceae) landraces. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 20(11). <https://doi.org/10.13057/biodiv/d201116>
- Burba, J. L. L. A. M. y L. V. M. (2021). *Manejo de suelos y preparación del terreno para el cultivo de ajo en áreas bajo riego de Mendoza*.
- Chamara, R., & Beneragama, C. (2020). Agrivoltaic systems and its potential to optimize agricultural land use for energy production in Sri Lanka: A Review. In *Tel: +94714774271 Journal of Solar Energy Research* (Vol. 5, Issue 2). JSER. <https://jser.ut.ac.ir>
- Cossu, M., Sirigu, A., Deligios, P. A., Farci, R., Carboni, G., Urracci, G., & Ledda, L. (2021). Yield Response and Physiological Adaptation of Green Bean to Photovoltaic Greenhouses. *Frontiers in Plant Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.655851>
- Elkadeem, M. R., Zainali, S., Lu, S. M., Younes, A., Abido, M. A., Amaducci, S., Croci, M., Zhang, J., Landelius, T., Stridh, B., & Campana, P. E. (2024). Agrivoltaic systems potentials in Sweden: A geospatial-assisted multi-criteria analysis. *Applied Energy*, 356, 122108. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122108>
- FAO. (2018). *Normas para bancos de germoplasma de recursos fitogenéticos para la alimentación y la agricultura*.
- Frühauf, A. C., Silva, E. M., Fernandes, T. J., & Muniz, J. A. (2022). Predicting height growth in bean plants using non-linear and polynomial models. *Revista*

*Agrogeoambiental*, 13(3). <https://doi.org/10.18406/2316-1817v13n320211625>

Gu, D., Andreev, K., & Dupre, M. E. (n.d.). *Major Trends in Population Growth Around the World*.

Hussein, A. M., & Benmoussa, M. (2023). Planting Density and Dose of Nitrogen and Potassium as Influencing Pod Characters of Snap Bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 11(4), 634–638. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v11i4.634-638.5324>

Jheiner Vásquez-García Nuri C. Vilca-Valqui Roiber F. Malqui-Ramos. (2023). *CATÁLOGO DE FRIJOL en Regiones Andinas del Banco de Germoplasma del INIA*.

Kahramanoğlu, İ., Usanmaz, S., & Alas, T. (2020). Water footprint and irrigation use efficiency of important crops in Northern Cyprus from an environmental, economic and dietary perspective. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 27(1), 134–141. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2019.06.005>

Karavidas, I., Ntatsi, G., Vougeleka, V., Karkanis, A., Ntanasi, T., Saitanis, C., Agathokleous, E., Ropokis, A., Sabatino, L., Tran, F., Iannetta, P. P. M., & Savvas, D. (2022). Agronomic Practices to Increase the Yield and Quality of Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.): A Systematic Review. In *Agronomy* (Vol. 12, Issue 2). MDPI. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020271>

Kranz, C. N., McLaughlin, R. A., Johnson, A., Miller, G., & Heitman, J. L. (2020). The effects of compost incorporation on soil physical properties in urban soils – A concise review. *Journal of Environmental Management*, 261, 110209. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110209>

Kumar, V., Kumar, P., & Khan, A. (2020). Optimization of PGPR and silicon fertilization using response surface methodology for enhanced growth, yield and biochemical parameters of French bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under saline stress. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 23, 101463. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101463>

Lizcano Toledo, R. O. V. D. (2019). *Muestreo de Suelos, Técnicas de Laboratorio e Interpretación de Análisis de Suelos*.

- Madushani, G. H. K., & Karunarathna, B. (2023). Impact of organic liquid fertilizers on growth and yield performance of Green Bean (<em>Phaseolus vulgaris</em> L.) in non-circulating hydroponic system. *AGRIEAST: Journal of Agricultural Sciences*, 17(1), 25–41. <https://doi.org/10.4038/agrieast.v17i1.119>
- Merga, J. T. (2020). Evaluation of common bean varieties (*Phaseolus vulgaris* L.) to different row-spacing in Jimma, South Western Ethiopia. *Heliyon*, 6(8), e04822. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04822>
- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (Minagri). (2024). *Perfil productivo y competitivo de los principales cultivos del sector*. <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiYjYwYTk5MDgtM2M0MS00NDMyLTgzNDEtMjNhNjEzYWQyOTNlIiwidCI6IjdmMDg0NjI3LTdmNDAtNDg3OS04OTE3LTk0Yjg2ZmQzNWYzZiJ9>
- Neethu, T. M., Adivappar, N., Srinivasa, V., & Girijesh, G. K. (2021). Effect of Spacing and Fertigation on Growth and Yield Parameters of French Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under Protected Cultivation. *LEGUME RESEARCH - AN INTERNATIONAL JOURNAL*, Of. <https://doi.org/10.18805/LR-4288>
- Nie, Y., Avraamidou, S., Li, J., Xiao, X., & Pistikopoulos, E. N. (2018). Land use modeling and optimization based on food-energy-water nexus: a case study on crop-livestock systems. In *Computer Aided Chemical Engineering* (Vol. 44, pp. 1939–1944). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64241-7.50318-9>
- Unidas, O. M. de las N. (2024). *Población | Naciones Unidas*. <https://www.un.org/es/global-issues/population>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2022). *Informe de las Naciones Unidas: las cifras del hambre en el mundo aumentaron hasta alcanzar los 828 millones de personas en 2021*. FAO.
- RAJIV, & TOMAR, S. (2022). Integrated use of organic and inorganic sources of nutrients in french bean (*Phaseolus vulgaris*). *The Indian Journal of Agricultural Sciences*, 92(4), 445–449. <https://doi.org/10.56093/ijas.v92i4.123899>

- Reeza, A. A., Noor, N. F. M., Ahmed, O. H., & Masuri, M. A. (2024). Shading Effect of Photovoltaic Panels on Growth of Selected Tropical Vegetable Crops. *Scientia Horticulturae*, 324, 112574. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112574>
- Rinaldi, F. B., Sudiana, E., & Hardiyati, T. (2023). Global warming and the phenology of Yard-long Beans (*Vigna unguiculata* subsp. *cylindrica* (L.) Verdc.). *Interdisciplinary International Journal of Conservation and Culture*, 1(2), 73–79. <https://doi.org/10.25157/ijcc.v1i2.3514>
- Salazar Mercado, S. A., Botello Delgado, E. A., & Quintero Caleño, J. D. (2020). Optimización de la prueba de tetrazolio para evaluar la viabilidad en semillas de *Solanum lycopersicum* L. *Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, 21(3), 1–12. [https://doi.org/10.21930/rcta.vol21\\_num3\\_art:1344](https://doi.org/10.21930/rcta.vol21_num3_art:1344)
- Santra, P. (2018). Agri-Voltaic System for Climate Smart Agriculture and Clean Energy Generation. In *SATSA Mukhapatra-Annual Technical Issue* (Vol. 22).
- Saravia, D., Valqui-Valqui, L., Salazar, W., Quille-Mamani, J., Barboza, E., Porrás-Jorge, R., Injante, P., & Arbizu, C. I. (2023). Yield Prediction of Four Bean (*Phaseolus vulgaris*) Cultivars Using Vegetation Indices Based on Multispectral Images from UAV in an Arid Zone of Peru. *Drones*, 7(5), 325. <https://doi.org/10.3390/drones7050325>
- Sebastian Chávez, R., Escuela, R., Panamericana, A., & Honduras, Z. (2020). *Respuesta del cultivo de frijol común a bajo contenido de fósforo en el suelo: Revisión de Literatura*.
- Swart, R., Levers, C., Davis, J. T. M., & Verburg, P. H. (2023). Meta-analyses reveal the importance of socio-psychological factors for farmers' adoption of sustainable agricultural practices. *One Earth*, 6(12), 1771–1783. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2023.10.028>
- Tabot, P. T., Mebong, M. P., Abeche, A. J., Kedju, N. C., & Nyama, B. C. (2021). Ecophysiological responses of *Phaseolus vulgaris* L. to salinity and irrigation regimes in screen house. *International Journal of Current Research in Biosciences and Plant Biology*, 8(2), 11–22. <https://doi.org/10.20546/ijcrbp.2021.802.002>

- Trommsdorff, M., Dhal, I. S., Özdemir, Ö. E., Ketzer, D., Weinberger, N., & Rösch, C. (2022). Agrivoltaics: Solar power generation and food production. In *Solar Energy Advancements in Agriculture and Food Production Systems* (pp. 159–210). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-89866-9.00012-2>
- Uprety, A., Dahal, B. R., & Shrestha, B. (2021). Germination and Seed Vigour of Indigenous Bean (*Phaseolus Vulgaris*) Genotype in Nepal. *SAARC Journal of Agriculture*, *18*(2), 67–75. <https://doi.org/10.3329/sja.v18i2.51109>
- Vidak, M., Lazarević, B., Javornik, T., Šatović, Z., & Carović-Stanko, K. (2022). Seed Water Absorption, Germination, Emergence and Seedling Phenotypic Characterization of the Common Bean Landraces Differing in Seed Size and Color. *Seeds*, *1*(4), 324–339. <https://doi.org/10.3390/seeds1040027>
- Xie, T., Li, J., Yang, C., Jiang, Z., Chen, Y., Guo, L., & Zhang, J. (2021). Crop height estimation based on UAV images: Methods, errors, and strategies. *Computers and Electronics in Agriculture*, *185*, 106155. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106155>

## ANEXOS

### Anexo 1. Análisis de varianza para altura de planta a los 21 días.

Factor	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	Sig
Blocks	2	22.483	11.241	6.388	0.002	**
Sistemas	2	1.741	0.871	0.495	0.611	ns
Variedad	1	7.245	7.245	4.117	0.044	*
Distanciamiento de siembra	1	4.237	4.237	2.408	0.123	ns
Sistemas: variedad	2	2.489	1.245	0.707	0.495	ns
Sistemas: distanciamiento	2	1.884	0.942	0.535	0.587	ns
Variedad: distanciamiento	1	6.891	6.891	3.916	0.050	*
Sistemas: variedad: distanciamiento	2	3.318	1.659	0.943	0.392	ns
Residuals	130	228.761	1.760			
Significance		0.001 ***	0.01 **	0.05 *		

### Anexo 2. Análisis de varianza para hojas trifoliadas a 21 días

Factor	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	Sig
Blocks	2	129.1667	64.5833	28.5573	0.0000	***
Sistemas	2	3.7917	1.8958	0.8383	0.4348	ns
Variedad	1	8.0278	8.0278	3.5497	0.0618	ns
Distanciamiento de siembra	1	0.6944	0.6944	0.3071	0.5804	ns
Sistemas: variedad	2	3.3472	1.6736	0.7400	0.4791	ns
Sistemas: distanciamiento	2	8.1806	4.0903	1.8086	0.1680	ns
Variedad: distanciamiento	1	10.0278	10.0278	4.4341	0.0372	*
Sistemas: variedad: distanciamiento	2	6.5139	3.2569	1.4401	0.2406	ns
Residuals	130	294.0000	2.2615			
Significance		0.001 ***	0.01 **	0.05 *		

### Anexo 3. Análisis de varianza para hojas trifoliadas a los 91 días

Factor	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	Sig
Blocks	2	17.389	8.694	0.093	0.912	***
Sistemas	2	1433.556	716.778	7.644	0.001	ns
Variedad	1	25.840	25.840	0.276	0.601	ns
Distanciamiento de siembra	1	7.562	7.562	0.081	0.777	ns
Sistemas: variedad	2	26.722	13.361	0.142	0.867	ns
Sistemas: distanciamiento	2	85.167	42.583	0.454	0.636	ns
Variedad: distanciamiento	1	396.674	396.674	4.230	0.042	*
Sistemas: variedad: distanciamiento	2	102.389	51.194	0.546	0.581	ns
Residuals	130	12190.361	93.772			
Significance		0.001 ***	0.01 **	0.05 *		

**Anexo 4.** Anva para número de flores semana 1

Factor	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	Sig
Blocks	2	2.042	1.021	0.690	0.503	ns
Sistemas	2	2.000	1.000	0.676	0.510	ns
Variedad	1	2.007	2.007	1.357	0.246	ns
Distanciamiento de siembra	1	7.562	7.562	5.115	0.025	*
Sistemas: variedad	2	0.722	0.361	0.244	0.784	ns
Sistemas: distanciamiento	2	2.167	1.083	0.733	0.483	ns
Variedad: distanciamiento	1	0.063	0.063	0.042	0.837	ns
Sistemas: variedad: distanciamiento	2	0.667	0.333	0.225	0.798	ns
Residuals	130	192.208	1.479			
Significance		0.001 ***	0.01 **	0.05 *		

**Anexo 5.** Anva para hojas semana 2

Factor	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	Sig
Blocks	2	5.389	2.694	0.702	0.498	ns
Sistemas	2	2.889	1.444	0.376	0.687	ns
Variedad	1	0.444	0.444	0.116	0.734	ns
Distanciamiento de siembra	1	4.000	4.000	1.042	0.309	ns
Sistemas: variedad	2	7.056	3.528	0.919	0.402	ns
Sistemas: distanciamiento	2	0.667	0.333	0.087	0.917	ns
Variedad: distanciamiento	1	0.250	0.250	0.065	0.799	ns
Sistemas: variedad: distanciamiento	2	8.167	4.083	1.064	0.348	ns
Residuals	130	499.111	3.839			
Significance		0.001 ***	0.01 **	0.05 *		

**Anexo 6.** Anva para el número de flores semana 4

Factor	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	Sig
Blocks	2	1980.375	990.187	8.576	0.0003	***
Sistemas	2	1705.542	852.771	7.386	0.0009	***
Variedad	1	560.111	560.111	4.851	0.0294	*
Distanciamiento de siembra	1	136.111	136.111	1.179	0.2796	ns
Sistemas: variedad	2	228.181	114.090	0.988	0.3750	ns
Sistemas: distanciamiento	2	94.014	47.007	0.407	0.6664	ns
Variedad: distanciamiento	1	90.250	90.250	0.782	0.3783	ns
Sistemas: variedad: distanciamiento	2	13.875	6.938	0.060	0.9417	ns
Residuals	130	15009.292	115.456			
Significance		0.001 ***	0.01 **	0.05 *		



**Anexo 2.** Resultados del análisis de suelo realizado al compost que se usó para nutrir y abonar al suelo de la parcela experimental.

	 UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRIGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS	Código: CCFG - 036	Versión: 01
		INFORME DE ENSAYO N° 660	

**1. DATOS :**

Solicitante : DUBER BANDA MARTINEZ

Departamento : AMAZONAS  
Provincia : CHACHAPOYAS  
Distrito : CHACHAPOYAS

Casero : NO ESPECÍFICA  
Cod. Cliente : COMPOST  
Cod. Labisag : 660  
Fecha : viernes, 19 de abril de 2024

**2. RESULTADO DEL ANÁLISIS SOLICITADO CARACTERIZACIÓN**

Lab	Número de Muestra Muestra	pH (1:1)	C.E. (1:1) dS/m	P ppm	K %	C %	M.O %	N %	Análisis Mecánico			Clase textural	CIC	Cationes Cambiables					Suma de Cationes	Suma de Bases	% Sat. De Bases
									Arena %	Limo %	Arcilla %			Ca+2 meq/100g	Mg+2	K+	Na+ Al+3 + H+				
660	COMPOST	8.20	5.70	107.04	13216.02	15.68	27.04	1.21	-	-	-	-	47.59	20.20	7.93	18.42	1.04	0.00	47.59	47.59	100

A = Arena ; A.Fr. = Arena Franca ; Fr.A. = Franco Arenoso ; Fr. = Franco ; Fr.L. = Franco Limoso ; L = Limoso ; Fr.Ar.A. = Franco Arcillo Arenoso ; Fr.Ar. = Franco Arcilloso ; Fr.Ar.L. = Franco Arcillo Limoso ; Ar.A. = Arcillo Arenoso ; Ar.L. = Arcillo Limoso ; Ar. = Arcilloso

**Nota:** Cabe resaltar que la muestra tomada en campo, no fue recolectada por el personal del laboratorio.

Los resultados presentados son válidos únicamente para la muestra ensayada, queda prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita de LABISAG. Los resultados no pueden ser usados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

UNIVERSIDAD NACIONAL  
TORIBIO RODRIGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS  
LABISAG  
Mg. LILY DEL PILAR MARTINEZ CONTRERAS  
RESPONSABLE

RESPONSABLE DE LABISAG

UNIVERSIDAD NACIONAL  
TORIBIO RODRIGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS  
LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN DE SUELOS Y AGUAS LABISAG  
ING. EULER WILLIAN GARCIA SALDANA  
RESPONSABLE DEL ÁREA DE SUELOS

RESPONSABLE DEL ÁREA DE SUELOS LABISAG

Recibi Conforme: Nombre: DNI: Fecha y Hora:  Firma de Conformidad
--