

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA



TESIS:

**Dosis de biosílíce y biochar enriquecido en el rendimiento
en vaina verde de haba (*Vicia faba* L.) en Huamanguilla,
Ayacucho - 2024.**

Para optar el título profesional de:
INGENIERO AGRÓNOMO

PRESENTADO POR:
Bach. Gil Edison DE LA CRUZ HUAMAN

ASESOR:
Dr. Raúl José PALOMINO MARCATOMA

AYACUCHO - PERÚ

2026

A Dios, por darme la fuerza, la sabiduría, la salud y la perseverancia para culminar esta etapa académica. Gracias por acompañarme en cada paso y hacer posible este logro y cuidar siempre de los míos.

A mis padres Rolando De La Cruz Mendoza y Concepción Huamán Álvarez, que gracias a su apoyo constante pude culminar mis estudios.

A mis hermanos Antony, weber, Wilmer, David y Jhon por estar conmigo en mi etapa profesional.

AGRADECIMIENTOS

A mi querida alma mater, la **Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga**, institución que me brindó la oportunidad de crecer y formarme académicamente.

A la Facultad de Ciencias Agrarias, de la **Escuela Profesional de Agronomía** de manera especial a los docentes quienes compartieron sus conocimientos y experiencias tanto en las aulas como en los laboratorios y centros experimentales.

A todos los profesores que tuve el privilegio de conocer, en especial al **Dr. Raúl José Palomino Marcatoma**, por su invaluable apoyo y guía constante, que hicieron posible la realización de esta tesis.

A mis padres, **Rolando De La Cruz Mendoza y Concepción Huamán Álvarez** por su apoyo incondicional, y a mis hermanos, por su constante ánimo y motivación para que pudiera culminar con éxito esta hermosa carrera de Agronomía.

A **Rosmery Diaz Gutiérrez**, por su apoyo, compañía y su constante ánimo durante todo el proceso de elaboración de mi tesis.

Agradezco sinceramente a mis compañeros de estudio, quienes estuvieron a mi lado brindándome apoyo, motivación y compañía durante todo el recorrido de esta apasionante y enriquecedora carrera de Ingeniería Agronómica.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	ii
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE ANEXOS	x
RESUMEN	xi
ABSTRACT.....	xii
INTRODUCCIÓN	13
CAPÍTULO I	16
MARCO TEÓRICO	16
1.1. ANTECEDENTES.....	16
1.1.1. Antecedentes de biochar o biocarbón	16
1.1.2. Antecedentes de biosílice (silicio)	22
1.1.3. Antecedentes agronómicos comparativos del cultivo de haba (<i>Vicia faba</i> L.) 25	
1.2. EL CULTIVO DE HABA (<i>Vicia faba</i> L.)	28
1.2.1. Origen y distribución	28
1.2.2. Introducción de habas en el Perú	29
1.2.3. Taxonomía del cultivo de habas	29
1.3. DESCRIPCIÓN BOTÁNICA DEL HABA.....	29
1.4. FASES FENOLÓGICAS	31
1.5. RENDIMIENTO DE HABAS EN VAINA VERDE.....	32
1.6. REQUERIMIENTOS EDAFOCLIMÁTICOS	32
1.6.1. Clima y temperatura.....	32
1.6.2. Suelos.....	33
1.6.3. Precipitación	33
1.7. MANEJO AGRONÓMICO	34
1.7.1. Preparación del suelo	34
1.7.2. Fertilización química y orgánica.....	34
1.7.3. Siembra	35
1.7.4. Riego.....	36

1.7.5.	Aporque	37
1.7.6.	Plagas y enfermedades.....	37
1.7.7.	Cosecha.....	37
1.8.	VARIEDAD DE HABA QUELCAO DE ANTA.....	38
1.9.	BIOCHAR O BIOCARBÓN	38
1.9.1.	Definición de Biochar	38
1.9.2.	Origen del biochar: “Terra Preta” en la Amazonia.....	39
1.9.3.	Propiedades fisicoquímicas del biochar según su biomasa de origen.....	40
1.9.4.	Producción del biochar	43
1.9.5.	Efectos del biochar en el suelo	47
1.10.	DIATOMITAS O TIERRA DE DIATOMEA	49
1.10.1.	Origen.....	49
1.10.2.	Propiedades físicas y químicas.....	50
CAPÍTULO II.....		59
METODOLOGÍA.....		59
2.1.	UBICACIÓN DEL ESTUDIO.....	59
2.1.1.	Ubicación política	59
2.1.2.	Ubicación geográfica	59
2.1.3.	Ubicación ecológica.....	59
2.2.	ANTECEDENTES DEL TERRENO	60
2.3.	CONDICIONES CLIMÁTICAS	61
2.4.	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO	63
2.4.1.	Interpretación del análisis del suelo.....	64
2.5.	MATERIALES	65
2.5.1.	Material genético	65
2.6.	FACTORES DE ESTUDIO.....	65
2.7.	TRATAMIENTOS.....	66
2.8.	Diseño experimental.....	66
2.9.	Descripción de la parcela experimental	67
2.10.	Instalación y conducción del campo experimental.....	69
2.10.1.	Labores de preparación del suelo y apertura de surcos.....	69

2.10.2.	Replanteo y demarcación del campo experimental.....	69
2.10.3.	Aplicación de la fertilización química	70
2.10.4.	Aplicación de biochar enriquecido.....	70
2.10.5.	Desinfección previa de las semillas	71
2.10.6.	Siembra	71
2.10.7.	Labores culturales	71
2.10.8.	Aplicación de biosílice (tierra de diatomea)	73
2.11.	Variables y criterios de evaluación.....	74
2.11.1.	Rentabilidad económica	75
CAPÍTULO III.....		76
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		76
3.1.	Altura de la planta	76
3.2.	Número de macollos por planta	83
3.3.	Número de flores por planta.....	87
3.4.	Número de vainas por planta.....	91
3.5.	Longitud de vaina (cm)	96
3.6.	Diámetro de vaina (cm).....	100
3.7.	Número de granos por vaina	104
3.8.	Peso de 100 semillas (g).....	107
3.9.	Porcentaje de materia seca del grano (%)	111
3.10.	Rendimiento de vaina verde	114
3.11.	Rentabilidad económica	119
3.11.1.	Ingreso bruto (S/. ha ⁻¹)	120
3.11.2.	Costo total de producción (S/. ha ⁻¹).....	120
3.11.3.	Valor neto (S/. ha ⁻¹).....	120
3.11.4.	Rentabilidad y relación benéfico/costo (B/C)	120
CAPITULO IV		122
CONCLUSIONES		122
RECOMENDACIONES.....		123
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		124
ANEXOS		137

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Composición química de diatomita en algunos yacimientos del Perú	52
Tabla 2.1. Promedio de variables climáticas – Estación San Pedro de Cachi (2024–2025).....	61
Tabla 2.2. Análisis de caracterización e interpretación de los resultados del suelo.....	64
Tabla 2.3. Codificación y descripción de los tratamientos.....	66
Tabla 2.4. Descripción y unidad de medida de la parcela experimental del anexo Tayancayocc	67
Tabla 3.1. Análisis de varianza de altura de la planta a los 60 días, 90 días y madurez fisiológica de haba, bajo el efecto de las dosis de biochar y biosílíce.	77
Tabla 3.2. Análisis de varianza de número de macollos por planta de haba, bajo el efecto de las dosis de biochar y biosílíce.....	83
Tabla 3.3. Análisis de varianza de número de flores por planta de haba, bajo el efecto de las dosis de biochar y biosílíce	88
Tabla 3.4. Análisis de varianza de número de vainas por planta de haba, bajo el efecto de las dosis de biochar y biosílíce	92
Tabla 3.5. Análisis de varianza de longitud de vainas de haba, bajo el efecto de las dosis de biochar y biosílíce	96
Tabla 3.6. Análisis de varianza del diámetro promedio de vainas de haba, bajo el efecto de las dosis de biochar y biosílíce.....	100
Tabla 3.7. Análisis de varianza del número de granos promedio por vaina, bajo el efecto de las dosis de biochar y biosílíce.....	104
Tabla 3.8. Análisis de varianza del peso de 100 semillas promedio de haba verde, bajo el efecto de las dosis de biochar y biosílíce.	108
Tabla 3.9. Análisis de varianza de materia seca de los granos de haba, bajo el efecto de las dosis de biochar y biosílíce	111
Tabla 3.10. Análisis de varianza del rendimiento promedio de la vaina verde de haba, bajo el efecto de las dosis de biochar y biosílíce.	114
Tabla 3.11. Análisis de rentabilidad económica en cada tratamiento por efecto de las dosis de biochar y biosílíce	119

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Foto de la morfología del haba de la variedad Quelcao.....	38
Figura 1.2. Obtención del biochar después de la pirolisis.....	42
Figura 1.3. Resumen de las propiedades fisicoquímicas del biocarbón que afectan la inmovilización de microorganismos en la matriz del biocarbón.	42
Figura 1.4. Esquema del reciclaje de residuos y nutrientes en la Estación Experimental de Pastos y Forrajes Indio Hatuey (EEPFIH).	44
Figura 1.5. Resumen del proceso de elaboración de biochar.....	46
Figura 1.6. Característica de la tierra de diatomea de color blanco.....	51
Figura 1.7. Mecanismos de resistencia en la interacción silicio-patógeno.....	57
Figura 1.8. El papel del silicio en las interacciones planta-patógeno.....	58
Figura 2.1. Mapa de ubicación geográfica del experimento.....	60
Figura 2.2. Climograma de referencia para Huamanguilla (anexo Tayancayocc) con la estación San Pedro de Cachi (2024–2025)	62
Figura 2.3. Representación gráfica de la unidad experimental.....	68
Figura 2.4. Disposición de los bloques en el experimento.....	68
Figura 2.5. Distribución de tratamientos en cada bloque.....	69
Figura 3.1. Prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$) de los efectos principales de las dosis de biochar y biosílíce en la altura de la planta de haba a los 60 días.....	78
Figura 3.2. Modelos de regresión del comportamiento de la altura de la planta a los 60 días por efecto de las dosis de biosílíce en cada dosis de biochar.	79
Figura 3.3. Prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$) de los efectos simples de las dosis de biosílíce en cada dosis de biochar en la altura a los 90 días de haba.	80
Figura 3.4. Modelos de regresión del comportamiento de altura de la planta de haba a los 90 días, bajo el efecto de las dosis de biosílíce en cada dosis de biochar.....	81
Figura 3.5. Prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$) del efecto principal de las dosis de biochar en la altura de la planta de haba evaluado en la madurez fisiológica.....	82
Figura 3.6. Prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$) de los efectos principales de las dosis de biochar y biosílíce en número de macollos por planta.....	84
Figura 3.7. Modelos de regresión del comportamiento de número de macollos por planta de haba, bajo el efecto de las dosis de biosílíce en cada dosis de biochar.....	87
Figura 3.8. Prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$) de los efectos simples de las dosis de biosílíce en cada dosis de biochar en el número de flores por planta.....	89

Figura 3.9. Modelos de regresión lineal del comportamiento de número de flores de haba, bajo el efecto de las dosis de biosilíce en cada dosis de biochar.	91
Figura 3.10. Prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$) de los efectos simples de las dosis de biosilíce en cada dosis de biochar en el número de vainas por planta.	93
Figura 3.11. Modelos de regresión del comportamiento de número de vainas por planta de haba, bajo el efecto de las dosis de biosilíce en cada dosis de biochar.....	95
Figura 3.12. Prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$) de los efectos simples de las dosis de biosilíce en cada dosis de biochar en la longitud de vainas de haba	97
Figura 3.13. Modelo de regresión del comportamiento de longitud promedio de vainas de haba, bajo el efecto de las dosis de biosilíce en cada dosis de biochar.....	99
Figura 3.14. Prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$) de los efectos principales de biochar y biosilíce en diámetro promedio de vainas de haba.....	102
Figura 3.15. Modelo de regresión del comportamiento del diámetro promedio de las vainas de haba, bajo el efecto de las dosis biosilíce en cada dosis de biochar.	103
Figura 3.16. Prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$) de los efectos principales de las dosis de biochar y biosilíce en número de granos promedio por vaina.	105
Figura 3.17. Modelo de regresión del comportamiento del número de granos promedio de las vainas de haba, bajo el efecto de las dosis de biosilíce en cada dosis de biochar..	107
Figura 3.18. Prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$) de los efectos principales de las dosis de biochar y biosilíce en peso de 100 semillas de haba verde.....	109
Figura 3.19. Modelos de regresión del comportamiento de peso de 100 semillas de haba verde, bajo el efecto de las dosis de biosilíce en cada dosis de biochar.	110
Figura 3.20. Prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$) de los efectos simples de las dosis de biosilíce en cada dosis de biochar en materia seca de grano de haba.....	112
Figura 3.21. Modelos de regresión lineal del comportamiento de materia seca de grano de haba, bajo el efecto de las dosis de biosilíce en cada dosis de biochar.....	113
Figura 3.22. Prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$) de los efectos simples de las dosis de biosilíce en cada dosis de biochar en el rendimiento de la vaina verde de haba.	116
Figura 3.23. Modelos de regresión del comportamiento de rendimiento de vaina verde de haba, bajo el efecto de las dosis de biosilíce en cada dosis de biochar.....	117

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Resultados del análisis del suelo de la parcela experimental del Anexo de Tayancayocc del Distrito de Huamanguilla.....	138
Anexo 2. Fotografías del muestreo del suelo para su análisis	139
Anexo 3. Registro fotográfico de la desinfección de semillas de habas.....	140
Anexo 4. Fotografías de siembra de habas	140
Anexo 5. Fotografías de preparación y aplicación de biochar sobre el suelo	141
Anexo 6. Registro fotográfico sobre la aplicación de biol sobre biochar.....	142
Anexo 7. Registro de fotografías sobre la aplicación de biosilice.....	144
Anexo 8. Registro de fotografías de las variables evaluadas.....	145
Anexo 9. Costo de producción del cultivo de haba verde para una hectárea en los tratamientos.....	147
Anexo 10. Resumen de costos directos e indirectos.....	170

RESUMEN

Garantizar la seguridad alimentaria en un contexto de cambio climático y crecimiento demográfico constituye uno de los principales desafíos de la agricultura actual, especialmente en zonas altoandinas donde la producción depende de la fertilidad del suelo, la disponibilidad hídrica y el manejo sostenible. En este contexto, el uso de biochar y biosílíce representa una alternativa agronómica para mejorar las condiciones del suelo y fortalecer el desarrollo productivo de los cultivos. La presente investigación tuvo como objetivo evaluar las dosis de biosílíce y biochar enriquecido en el rendimiento en vaina verde de haba (*Vicia faba* L.) en Huamanguilla, Ayacucho - 2024, Ayacucho. El estudio se desarrolló durante la campaña agrícola 2024-2025 en el anexo de Tayancayocc, distrito de Huamanguilla, provincia de Huanta, a 3458 m s. n. m. Se empleó un Diseño de Bloques Completos al Azar con arreglo factorial de 3×4 , considerando tres niveles de biochar: 0.0, 1.0 y 2.0 t ha⁻¹, y cuatro niveles de biosílíce: 0.0, 0.5, 1.0 y 1.5 %, con tres repeticiones, totalizando 36 unidades experimentales. Las variables evaluadas fueron: altura de planta, número de macollos/planta, número de flores/planta, número de vainas/planta, longitud y diámetro de vaina, número de granos/vaina, peso de 100 semillas, porcentaje de materia seca, rendimiento de vaina verde y rentabilidad económica. Los datos fueron analizados mediante análisis de varianza y prueba de Duncan al 5 % de significancia. Los resultados evidenciaron que la aplicación de biochar y biosílíce influyó significativamente en el crecimiento y rendimiento del cultivo. La mayor respuesta agronómica se obtuvo con 2.0 t ha⁻¹ de biochar y 1.5 % de biosílíce, tratamiento que alcanzó 168.48 cm de altura de planta a los 90 días, 39 flores por planta, 36 vainas por planta, 13.90 cm de longitud de vaina, 51.20 % de materia seca del grano y el mayor rendimiento de vaina verde con 11.77 t ha⁻¹. En el análisis económico, este mismo tratamiento obtuvo la mayor relación beneficio/costo, con un valor de S/ 1.01 por cada sol invertido. Se concluye que la aplicación combinada de biochar y biosílíce constituye una alternativa agronómica eficiente para mejorar el rendimiento y la rentabilidad del cultivo de haba en condiciones altoandinas de Huamanguilla, Ayacucho.

Palabras clave: biochar, biosílíce, haba, rendimiento, rentabilidad.

ABSTRACT

Ensuring food security in the context of climate change and population growth is one of the main challenges facing agriculture today, especially in high Andean regions where production depends on soil fertility, water availability, and sustainable management. In this context, the use of biochar and biosilica represents an agronomic alternative to improve soil conditions and strengthen crop productivity. This research aimed to evaluate the effects of biosilica and biochar enrichment on the green pod yield of broad beans (*Vicia faba* L.) in Huamanguilla, Ayacucho, in 2024. The study was conducted during the 2024-2025 growing season in the Tayancayocc annex, Huamanguilla district, Huanta province, at an altitude of 3458 meters above sea level. A Randomized Complete Block Design with a 3×4 factorial arrangement was used, considering three levels of biochar: 0.0, 1.0, and 2.0 t ha⁻¹, and four levels of biosilica: 0.0, 0.5, 1.0, and 1.5%, with three replications, totaling 36 experimental units. The variables evaluated were: plant height, number of tillers/plant, number of flowers/plant, number of pods/plant, pod length and diameter, number of grains/pod, weight of 100 seeds, percentage of dry matter, green pod yield and economic profitability. The data were analyzed using analysis of variance and Duncan's multiple range test at a 5% significance level. The results showed that the application of biochar and biosilica significantly influenced crop growth and yield. The greatest agronomic response was obtained with 2.0 t ha⁻¹ of biochar and 1.5% biosilica. This treatment resulted in a plant height of 168.48 cm at 90 days, 39 flowers per plant, 36 pods per plant, a pod length of 13.90 cm, 51.20% grain dry matter, and the highest green pod yield at 11.77 t ha⁻¹. In the economic analysis, this same treatment yielded the highest benefit-cost ratio, with a value of S/ 1.01 for every sol invested. It is concluded that the combined application of biochar and biosilica constitutes an efficient agronomic alternative to improve the yield and profitability of broad bean cultivation under the high Andean conditions of Huamanguilla, Ayacucho.

Keywords: biochar, biosilica, broad bean, yield, profitability.

INTRODUCCIÓN

El cultivo de haba (*Vicia faba* L.) constituye una de las principales leguminosas alimenticias y económicas de la sierra peruana, debido a su importancia en la seguridad alimentaria y generación de ingresos para los pequeños productores altoandinos. Según el Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (Midagri, 2024) durante el año 2023 el Perú registró una superficie sembrada de haba grano seco de 56 882 ha y una superficie cosechada de 53 043 ha, alcanzando una producción nacional de 92 437 toneladas y un rendimiento promedio de 1.74 t ha⁻¹; asimismo, las regiones con mayor superficie sembrada fueron Cusco, Puno, Huancavelica y Ayacucho, en cuanto al haba verde, la producción nacional alcanzó aproximadamente 79,636 toneladas, concentrándose principalmente en regiones de la sierra central y sur del país. A nivel regional, Ayacucho se posiciona entre las principales regiones productoras de haba, registrando alrededor de 8 563 ha de superficie sembrada y 8 214 ha de superficie cosechada, con una producción aproximada de 9 840 toneladas de haba verde y 2 415 toneladas de haba grano seco. El cultivo de haba en la sierra del Perú enfrenta importantes desafíos que limitan su rendimiento y potencial productivo. Uno de los problemas más críticos es la baja fertilidad del suelo, que se ve exacerbada por el uso prolongado de prácticas agrícolas inadecuadas y la dependencia de fertilizantes químicos (Horque, 2004). Los suelos altoandinos de la sierra de Ayacucho se caracterizan por presentar reacción ácida, elevado contenido de materia orgánica y baja disponibilidad de nutrientes como fósforo, calcio, magnesio y potasio, condiciones que limitan la fertilidad del suelo y el rendimiento de los cultivos agrícolas (Cerde, 2019). La agricultura depende del régimen de lluvias y afectada por las condiciones climáticas, que oscilan entre semifrías a frías y de semisecas a lluviosas lo que generan un potencial déficit hídrico o estrés hídrico moderado. (SENAMHI, 2012). El haba es de gran importancia cultivada a nivel mundial, utilizada

tanto en la alimentación humana como en la producción de forraje para animales (Gasim et al., 2015). Es una de las leguminosas de grano más importantes y ampliamente cultivadas en el Perú, desarrollándose principalmente en las zonas altoandinas a altitudes que varían entre los 2 500 y 4 000 m.s.n.m. (INIA, 2021). Posee una gran relevancia nutricional por su elevado contenido proteico y por los compuestos bioactivos que contiene, los cuales han mostrado efectos beneficiosos en la conservación de la salud humana y en la prevención de diversas enfermedades (FAO, 2016). Este tiene elevado contenido de proteínas, que varía entre 20 % y 41 % en base seca, presentan aminoácidos esenciales de lisina, leucina, isoleucina y treonina, importantes para el crecimiento y mantenimiento del organismo, contienen fibra dietética (14-15 %), minerales como hierro, zinc, magnesio y potasio (Martineau-Côté et al., 2022). Asimismo, las habas favorecen el incremento del nitrógeno en el suelo gracias a su capacidad de fijación simbiótica del nitrógeno atmosférico, lo que permite reducir el uso de fertilizantes nitrogenados en los sistemas de producción agrícola y ofrecer un rendimiento elevado de semillas y constituyen un elemento fundamental en la rotación de cultivos (Liu et al., 2019; Egamberdieva et al., 2020).

En los últimos años, el uso de enmiendas orgánicas como el biocarbón (biochar) ha cobrado importancia por sus efectos positivos sobre la fertilidad del suelo y el crecimiento de los cultivos. El biochar surge como una alternativa sostenible para la agricultura al mejorar la fertilidad y estructura del suelo, retener la humedad y favorecer la captura de carbono, contribuyendo así a la rehabilitación de tierras degradadas. Su uso permite aprovechar residuos agrícolas y orgánicos, reduciendo la contaminación y las emisiones de gases de efecto invernadero. Frente al uso intensivo de fertilizantes químicos, el biocarbón ofrece una opción más económica, ecológica y accesible que impulsa una producción agrícola sostenible (Barrow, 2012). Este material, rico en carbono y obtenido mediante el pirólisis de biomasa orgánica en ausencia de oxígeno, destaca por mejorar la estructura y fertilidad del suelo, aumentar la retención de nutrientes y agua, regular el pH y fomentar la actividad microbiana. Su alta porosidad y estabilidad le permiten permanecer en el suelo durante siglos, contribuyendo al secuestro de carbono y a la reducción de la degradación y la escorrentía de nutrientes. Además, su aplicación mediante diversas técnicas lo convierte en una herramienta clave para promover sistemas agrícolas más sostenibles y resilientes (Sela, 2023).

Por otro lado, el biosílíce corresponde al silicio proveniente de la diatomita, una roca sedimentaria de origen orgánico compuesta por restos fósiles de algas unicelulares denominadas “diatomeas” y se caracteriza por presentar una alta superficie específica y una densidad muy baja (Cerdeira, 2021). El silicio cumple un rol esencial en la nutrición de numerosas especies vegetales, tanto monocotiledóneas como dicotiledóneas, contribuyendo de manera directa o indirecta a que las plantas enfrenten el estrés abiótico y/o biótico (Debona et al., 2017). Baglione (2011) manifiesta que el silicio incrementa la productividad y calidad de las cosechas agrícolas, restaura el suelo de la degradación e incrementa su fertilidad, reduce la lixiviación de fósforo, nitrógeno y potasio, neutraliza la toxicidad del aluminio en suelos ácidos y aumenta la resistencia de la planta a plagas, enfermedades y sequías, promoviendo además una mayor tasa de fotosíntesis. En la agricultura el silicio tiene la capacidad de reducir los efectos de la salinidad, la sequía, la deficiencia de nutrientes, la toxicidad por metales, refuerza los tejidos, la activación de sistemas antioxidantes, la inmovilización de metales tóxicos y la regulación de la expresión génica y hormonal, fortaleciendo la resistencia y vitalidad de las plantas (Savvas & Ntatsi, 2015).

En este contexto, la investigación evalúa el efecto del biosílíce y el biochar enriquecido en el rendimiento del cultivo de haba (*Vicia faba* L.) en el distrito de Huamanguilla, Ayacucho. Con la finalidad de determinar las dosis óptimas que mejoren el crecimiento y productividad del cultivo.

Objetivo general

Evaluar las dosis de biosílíce y biochar enriquecido en el rendimiento en vaina verde de haba (*Vicia faba* L.) en Huamanguilla, Ayacucho - 2024.

Objetivos específicos

1. Cuantificar las dosis de biochar enriquecido y biosílíce que influyen en el rendimiento en vaina verde de haba.
2. Evaluar el efecto del biochar enriquecido y biosílíce en la relación beneficio/costo del rendimiento en vaina verde de haba.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1. ANTECEDENTES

1.1.1. *Antecedentes de biochar o biocarbón*

Poormansour & Razzaghi (2018) realizaron un experimento en invernadero en la Universidad de Shiraz, Shiraz, Irán, con el objetivo de evaluar el efecto de diferentes niveles de riego y biochar sobre el crecimiento y rendimiento del haba (*Vicia faba* L.). El estudio se desarrolló bajo un diseño completamente al azar con tres repeticiones, considerando cinco niveles de biochar: 0, 25, 50, 75 y 100 t ha⁻¹, y tres niveles de riego: 100 %, 75 % y 50 % del requerimiento hídrico del cultivo. Los resultados mostraron que la aplicación de 25 t ha⁻¹ de biochar incrementó el número de flores, número de vainas y peso seco de grano en 12 %, 92 % y 94 %, respectivamente, en comparación con el tratamiento sin biochar. Asimismo, el estrés hídrico al 50 % redujo significativamente el número de flores, número de vainas y peso seco de grano en 53 %, 25 % y 43 %, respectivamente, frente al riego completo. Los autores concluyeron que la aplicación moderada de biochar, especialmente a 25 t ha⁻¹, puede contribuir a reducir el consumo de agua y mejorar el rendimiento productivo del cultivo de haba.

Tadesse et al. (2025) evaluaron el efecto del biocarbón de cáscara de café y la inoculación con *Rhizobium* en el rendimiento y la disponibilidad de nutrientes del haba (*Vicia faba* L.). El experimento se realizó en condiciones controladas en la Facultad de Agricultura de la Universidad de Hawassa, Etiopía, utilizando suelos ácidos recolectados de los distritos de Gorche y Hagere Selam. Se evaluaron cuatro variedades de haba. Local, Dosha, Gebelcho y Numan, cuatro niveles de rizobios (control y tres cepas: FB-EAR-15, FB-1035 y EAL-110) y tres dosis de biocarbón: 0, 5 y 10 t ha⁻¹. Los resultados mostraron

que la dosis de 10 t ha⁻¹ de biocarbón mejoró los principales componentes productivos, alcanzando 10.1 vainas por planta, 2.78 semillas por vaina, 97.19 g en peso de 100 semillas, 14.82 g planta⁻¹ de rendimiento de semilla y 24.55 g planta⁻¹ de biomasa. Asimismo, esta dosis mejoró las propiedades del suelo después de la cosecha, incrementando el carbono orgánico a 3.27 %, la materia orgánica a 5.64 %, el nitrógeno total a 0.22 %, el fósforo disponible a 9.52 mg kg⁻¹, la CIC a 32.1 cmol(+) kg⁻¹, el calcio a 11.2 cmol(+) kg⁻¹, el magnesio a 3.7 cmol(+) kg⁻¹ y el potasio a 0.51 cmol(+) kg⁻¹. Además, la cepa EAL-110 favoreció el rendimiento, con 9.43 vainas por planta, 14.65 g planta⁻¹ de semilla y 24.33 g planta⁻¹ de biomasa. Los autores concluyeron que la combinación de 10 t ha⁻¹ de biocarbón con la cepa EAL-110, especialmente en las variedades Dosha y Numan, constituye una alternativa promisorio para mejorar la fertilidad de suelos ácidos y la productividad del cultivo de haba.

Al-Mishyyikh & Jarallah (2024) realizaron un experimento de campo en un suelo desértico de textura franco arenosa, ubicado en Al-Jazeera, distrito de Al-Karma, provincia de Al-Anbar, Irak, con el objetivo de evaluar el efecto del biochar y la bentonita sobre las propiedades químicas del suelo, crecimiento y rendimiento de haba (*Vicia faba* L.). El estudio se desarrolló bajo un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones, aplicando cuatro dosis de biochar: 0, 5, 10 y 15 t ha⁻¹, y cuatro dosis de bentonita (montmorillonita): 0, 10, 20 y 30 t ha⁻¹. Antes de la siembra, el suelo presentó pH de 7.40, conductividad eléctrica de 3.20 dS/m, materia orgánica de 7.60 g/kg, capacidad de intercambio catiónico de 4.11 cmol(+)/kg, fósforo disponible de 4.23 mg/kg y potasio disponible de 116.14 mg/kg. Los resultados mostraron que la aplicación de 15 t ha⁻¹ biochar redujo ligeramente el pH a 7.30 y mejoró la materia orgánica a 51.93 g/kg de suelo y la capacidad de intercambio catiónico a 19.13 cmol(+)/kg. En cuanto al crecimiento y rendimiento, esta dosis alcanzó 56.3 cm de altura de planta, 3028.6 cm²/planta de área foliar, 81.53 g/planta de peso seco y 17.540 t ha⁻¹ de vainas frescas. La mejor respuesta se obtuvo con la combinación de 15 t ha⁻¹ de biochar + 30 t ha⁻¹ de bentonita, alcanzando 62.3 cm de altura, 3301.8 cm²/planta de área foliar, 88.93 g/planta de peso seco y 20.543 t ha⁻¹ de vainas frescas, superando al tratamiento control, que obtuvo 45.6 cm, 2035.1 cm²/planta, 52.58 g/planta y 9.907 t ha⁻¹, respectivamente. Los autores concluyeron que la aplicación combinada de biochar y bentonita mejoró las propiedades químicas del suelo y favoreció el crecimiento y rendimiento de haba.

Van Zwieten et al. (2015) evaluaron el efecto de diferentes enmiendas orgánicas y minerales sobre el rendimiento y la fijación biológica de nitrógeno en haba (*Vicia faba* L.), cultivada en un suelo ácido tipo ferralsol ródico, en el Wollongbar Primary Industries Institute, Nueva Gales del Sur, Australia. El estudio se desarrolló bajo un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones, comparando cinco tratamientos: sin enmienda, cal agrícola, compost, biochar de residuo de papelería y biochar de cama de aves. Los biochars fueron aplicados a razón de 10 t ha⁻¹, el compost a 25 t ha⁻¹ en peso húmedo y la cal agrícola a 3 t ha⁻¹. Los resultados evidenciaron que, en la campaña 2008 y sin fertilización adicional, el tratamiento sin enmienda obtuvo 3.67 t ha⁻¹ de biomasa seca y 1.78 t ha⁻¹ de rendimiento de grano. En comparación, el biochar de residuo de papelería incrementó estos valores a 7.89 t ha⁻¹ de biomasa seca y 4.25 t ha⁻¹ de grano, además de aumentar el nitrógeno fijado de 76 a 185 kg ha⁻¹ y el nitrógeno total de 91 a 232 kg ha⁻¹. Asimismo, mejoró la absorción de fósforo, boro y molibdeno, alcanzando 28.4 kg ha⁻¹, 57.7 g ha⁻¹ y 2.89 g ha⁻¹, respectivamente. Por su parte, el biochar de cama de aves también mostró efectos favorables, con 6.89 t ha⁻¹ de biomasa seca y 3.98 t ha⁻¹ de rendimiento de grano. En cuanto a las propiedades del suelo, el biochar de residuo de papelería elevó el pH de 4.3 a 5.2, aumentó el fósforo Bray de 20.3 a 26.0 mg kg⁻¹, el calcio intercambiable de 3.6 a 8.4 cmol(+) kg⁻¹ y el carbono total de 4.90 a 5.27 %. Además, redujo el aluminio intercambiable de 1.2 a 0.13 cmol(+) kg⁻¹, lo cual fue importante porque disminuyó la toxicidad por aluminio en el suelo ácido. Los autores concluyeron que el biochar mejoró el rendimiento del haba principalmente por favorecer la nutrición con fósforo y boro, elevar el pH del suelo y reducir las limitaciones asociadas a la acidez; aunque la cal agrícola fue más efectiva para incrementar la fijación biológica de nitrógeno.

Mohamed et al. (2017) realizaron un estudio en la Facultad de Agricultura de la Universidad de Benha, Gobernación de Qalyubia, Egipto, con el propósito de evaluar el efecto del biochar elaborado a partir de paja de soya y la aplicación foliar de micronutrientes en el cultivo de haba (*Vicia faba* L. cv. Giza 40). El experimento se desarrolló en macetas bajo condiciones de invernadero, utilizando suelo franco arcilloso y un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones y ocho tratamientos, conformados por dosis de biochar de 0, 20, 40 y 80 g por maceta, aplicadas con y sin micronutrientes foliares; además, las semillas fueron inoculadas con *Rhizobium*

leguminosarum bv. *viciae*. Los resultados evidenciaron que la aplicación de biochar mejoró significativamente el crecimiento, la nutrición vegetal, la nodulación, la actividad microbiana y las propiedades químicas del suelo, siendo el tratamiento de 80 g de biochar por maceta más micronutrientes el que presentó los valores más favorables. En este tratamiento se registró mayor concentración de N, P y K en paja y semillas; asimismo, las semillas alcanzaron 12.06 % de proteína, 46 % de carbohidratos, 2.9 % de grasa y 91.73 g en el peso de 100 semillas. También se obtuvo 72.8 nódulos por planta, 5.76 g de peso fresco de nódulos, 0.05 g de peso seco de nódulos y 89.3 $\mu\text{L C}_2\text{H}_4/\text{g}$ de nódulo seco en actividad nitrogenasa. En el suelo, el mismo tratamiento alcanzó 31.9 mg/kg de nitrógeno disponible, 21.02 mg/kg de fósforo disponible, 214 mg/kg de potasio disponible y 35.6 cmolc/kg de capacidad de intercambio catiónico. En consecuencia, este antecedente demuestra que el biochar, especialmente cuando se combina con micronutrientes, puede actuar como una enmienda eficiente para mejorar el desarrollo agronómico del haba, fortalecer la fijación biológica de nitrógeno y aumentar la fertilidad del suelo.

Chen et al. (2021) realizaron un experimento de campo durante dos campañas agrícolas, 2016 y 2017, en la Estación Experimental de Irrigación y Drenaje de Kunshan, región del lago Taihu, China, con el objetivo de evaluar el efecto del biochar sobre el crecimiento y rendimiento del arroz bajo riego con ahorro de agua. El estudio se desarrolló bajo un diseño de parcelas aleatorizadas con tres repeticiones, considerando cuatro tratamientos: C0, sin biochar bajo riego controlado; C20, 20 t ha⁻¹ de biochar bajo riego controlado; C40, 40 t ha⁻¹ de biochar bajo riego controlado; y F40, 40 t ha⁻¹ de biochar bajo riego por inundación. Las variables evaluadas fueron número de macollos, altura de planta, número de panículas productivas, número de granos por panícula, número de granos llenos, porcentaje de cuajado, peso de 1000 granos, rendimiento real y eficiencia del uso del agua de riego. Los resultados mostraron que el tratamiento C20 alcanzó el mayor número de macollos, con 295.00×10^4 macollos ha⁻¹ en 2016 y 300.21×10^4 macollos ha⁻¹ en 2017, superando al testigo entre 8.85 % y 12.17 %. Asimismo, el tratamiento C40 presentó mayor altura de planta, con 68.98 cm en 2016 y 67.82 cm en 2017, y obtuvo los mayores rendimientos bajo riego controlado, con 8552 kg ha⁻¹ en 2016 y 7325 kg ha⁻¹ en 2017. Además, el biochar incrementó el número de granos llenos entre 15.78 % y 32.96 %, favoreció el número de panículas productivas y mejoró la eficiencia del uso del agua,

alcanzando 1.764 kg m⁻³ en 2016 y 1.237 kg m⁻³ en 2017 con C40. Los autores concluyeron que la aplicación de biochar favoreció el crecimiento vegetativo, los componentes de rendimiento, la productividad y la eficiencia del uso del agua en arroz; por ello, este antecedente puede considerarse indirecto para sustentar el efecto favorable del biochar sobre el macollamiento y desarrollo vegetativo en cultivos agrícolas.

Díaz-Solares et al. (2020) desarrollaron en Cuba una investigación orientada a la obtención y uso de microorganismos nativos mediante el bioproducto IHPLUS®, elaborado a partir de microorganismos procedentes de estratos bajos de bosques poco intervenidos. El estudio señala que estos microorganismos nativos se emplean como bionutrientes, activadores de compostajes y componentes de bioabonos con biochar, contribuyendo al aprovechamiento de residuos orgánicos y al mejoramiento de los suelos. Asimismo, los autores indican que los microorganismos eficientes pueden favorecer procesos agrícolas asociados con la germinación, el crecimiento y el desarrollo de las plantas. Por ello, este antecedente permite sustentar que el uso de bio o microorganismos líquidos, incorporados junto con materia orgánica y biochar, puede mejorar la actividad biológica del suelo y favorecer el desarrollo del cultivo, aunque debe considerarse como antecedente indirecto porque no fue realizado específicamente en haba.

Pentón-Fernández et al. (2021) elaboraron el Manual para la elaboración de biochar y microorganismos eficientes IHPLUS®BF en la Estación Experimental de Pastos y Forrajes Indio Hatuey, Matanzas, Cuba. Los autores describen al biochar como un producto obtenido por pirólisis de biomasa vegetal, utilizado para la recuperación de suelos y la fertilización orgánica. Además, señalan que el biochar puede enriquecerse con nutrientes y microorganismos eficientes IHPLUS®BF para mejorar su aplicación agrícola. En el manual se indica que los microorganismos nativos pueden promover la germinación, la floración, el desarrollo de frutos y la reproducción de las plantas, además de contribuir al mejoramiento de propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Por tanto, este antecedente fundamenta el uso de biochar enriquecido con microorganismos y fuentes orgánicas como una estrategia agroecológica para mejorar la fertilidad del suelo y la productividad de los cultivos.

Escalante et al. (2016) desarrollaron una revisión titulada Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo, publicada en Terra Latinoamericana,

con el objetivo de analizar las características físicas, químicas y funcionales del biocarbón como enmienda para mejorar la calidad del suelo. Los autores señalaron que el biocarbón puede presentar pH desde ácido hasta alcalino, con una media aproximada de 8.1 y un rango entre 6.2 y 13, lo que permite explicar su posible efecto en la corrección parcial de suelos ácidos. Asimismo, indicaron que el biocarbón puede incrementar la capacidad de intercambio catiónico, debido a su elevada área superficial, carga negativa y densidad de carga, favoreciendo la retención de NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} . Además, destacaron que el biocarbón puede actuar como portador de microorganismos, favoreciendo la presencia de hongos micorrízicos y la infección por *Rhizobium*.

Melo-Lozano & Afanasjeva (2023) realizaron una revisión titulada Efecto de la aplicación de biochar en la actividad microbiana en suelos, publicada en la revista Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial. El estudio tuvo como propósito analizar cómo la aplicación de biochar influye en la actividad microbiana del suelo y en los procesos asociados al crecimiento vegetal. Los autores señalaron que el biochar, al ser una enmienda obtenida por pirólisis de biomasa, promueve el incremento de comunidades bacterianas y micorrízicas benéficas, además de aportar carbono recalcitrante y generar cambios fisicoquímicos favorables, como incremento del pH, mayor retención de agua y aumento de la capacidad de intercambio catiónico. Asimismo, resaltaron que todavía son necesarios estudios que expliquen con mayor profundidad cómo el biochar incrementa las comunidades microbianas benéficas.

Kizito et al. (2019) evaluaron el efecto del biochar enriquecido con digestato como enmienda del suelo durante el crecimiento del maíz (*Zea mays* L.), en un experimento en macetas bajo diseño completamente aleatorizado en bloques. Se compararon tratamientos con biochar no enriquecido, biochar enriquecido, biochar combinado con NPK, fertilización NPK y un control. Las variables evaluadas incluyeron materia orgánica, macronutrientes, mineralización de nitrógeno, absorción de nutrientes, altura de planta y biomasa aérea y radicular. Los resultados mostraron que el biochar enriquecido incrementó la materia orgánica del suelo entre 232 % y 514 %, y los macronutrientes entre 110 % y 230 %, además de mejorar la biomasa vegetal frente al control y al biochar no enriquecido.

1.1.2. Antecedentes de biosílice (silicio)

Shoman & Bughdady (2020) evaluaron el efecto de la aplicación foliar de silicio en la productividad del cultivo de haba (*Vicia faba* L.) bajo diferentes fechas de siembra en New Valley, Egipto. El experimento se desarrolló durante dos campañas agrícolas, bajo un diseño strip split plot con tres repeticiones, utilizando cuatro fechas de siembra y cuatro dosis de silicio foliar: 0, 100, 200 y 300 ppm. Las variables evaluadas fueron altura de planta, número de vainas por planta, longitud de vaina, rendimiento de semilla por planta, peso de 100 semillas, índice de cosecha, porcentaje de desgrane, rendimiento de semilla, rendimiento de paja, eficiencia en el uso del agua, proteína y carbohidratos en semilla. Los resultados mostraron que la dosis de 300 ppm de silicio generó los mejores valores en la mayoría de variables, alcanzando hasta 131 cm de altura de planta, 14.2 vainas por planta, 39.5 g de rendimiento de semilla por planta, 71.5 g en peso de 100 semillas, 1823 kg/fed de rendimiento de semilla, 25.8 % de proteína y 49.3 % de carbohidratos. En conclusión, el silicio foliar favoreció el crecimiento, la formación de vainas, el peso de semillas, el rendimiento y la calidad del grano en el cultivo de haba.

Hafez et al. (2021) evaluaron el efecto del silicato de potasio foliar y rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal en haba (*Vicia faba* L.) cultivada en suelo afectado por salinidad, en Kafr El-Sheikh, Egipto. El estudio se realizó durante dos campañas agrícolas, bajo un diseño de parcelas divididas con cuatro repeticiones, comparando agua dulce y agua salina, además de cuatro tratamientos: testigo, rizobacterias, silicato de potasio y la combinación rizobacterias + silicato de potasio. Las variables evaluadas fueron nodulación, longitud de raíz, contenido de K^+ y Na^+ , clorofila, contenido relativo de agua, enzimas antioxidantes, número de vainas por planta, número de semillas por vaina, peso de 100 semillas, rendimiento de semilla y absorción de N, P y K. Los resultados mostraron que la combinación rizobacterias + 200 ppm de silicato de potasio fue la más efectiva, alcanzando con agua dulce hasta 29.7 vainas por planta, 6.8 semillas por vaina, 85.5 g en peso de 100 semillas y 3.9 t ha⁻¹ de rendimiento. Bajo agua salina, el mismo tratamiento también mejoró la producción, con 18.8 vainas por planta, 5.2 semillas por vaina, 59.3 g en peso de 100 semillas y 2.7 t ha⁻¹ de rendimiento. En conclusión, el silicato de potasio, especialmente combinado con rizobacterias, mejoró la nodulación, la absorción de nutrientes, la tolerancia a la salinidad y el rendimiento del cultivo de haba.

Ismail et al. (2022) evaluaron el efecto del silicio y nanosilicio en arveja (*Pisum sativum* L.) bajo estrés salino, en la Universidad de Mansoura, Egipto. El experimento se realizó en macetas durante tres campañas, aplicando silicio y nanosilicio a 3 mM (milimol por litro), junto con niveles de salinidad de 100, 150, 200 y 250 mM de NaCl. Se evaluaron variables de crecimiento y rendimiento, como altura de planta, longitud de brote y raíz, peso fresco y seco, número de hojas, área foliar, número de flores, longitud y peso de vaina, número de vainas por planta, número de semillas por vaina, peso de semillas, rendimiento total de semilla, rendimiento de paja e índice de cosecha. Los resultados mostraron que la salinidad redujo el desarrollo y la producción; sin embargo, el nanosilicio presentó mejor respuesta, alcanzando 45.10 cm de altura, 10.35 cm de longitud de vaina, 9.91 g planta⁻¹ de peso de vaina, 5 vainas por planta, 8 semillas por vaina y 3.95 g planta⁻¹ de rendimiento total de semilla. Asimismo, el silicio aumentó el peso de vaina en 31.97 %, el rendimiento por planta en 13.60 % y el rendimiento total de semilla en 21.66 %, mientras que el nanosilicio incrementó el peso de vaina en 61.66 % y el rendimiento por planta en 44.46 %.

Queiroz et al. (2025) evaluaron el efecto de la aplicación foliar de silicio en caupí (*Vigna unguiculata* L.) bajo déficit hídrico, en la Universidad Estatal de Paraíba, Brasil. El experimento se realizó en campo, bajo un diseño de bloques al azar en parcelas subdivididas, con cuatro repeticiones; se consideraron dos niveles de riego, 50 % y 100 % de la evapotranspiración del cultivo, tres cultivares de caupí y aplicación foliar de silicio en forma de ácido ortosilícico a 10 mg Si L⁻¹. Las variables evaluadas fueron nutrientes foliares, prolina, enzimas antioxidantes, longitud de rama principal, masa seca aérea, eficiencia del uso del agua, número de vainas por planta y rendimiento. Los resultados mostraron que el silicio aumentó el contenido de N en 21 %, P en 38 % y Ca en 17 %; además, incrementó la longitud de rama principal en 55 %, la eficiencia del uso del agua hasta 41 % y el número de vainas por planta hasta 30 %. En rendimiento, el silicio generó incrementos de 25 %, 83 % y 18 %, según el cultivar evaluado. En conclusión, el silicio mejoró el crecimiento, la acumulación de materia seca, la formación de vainas y el rendimiento del caupí, especialmente bajo condiciones de déficit hídrico.

Cerda Gómez (2021) evaluó la biosílice foliar y edáfica en la tolerancia del maíz morado a la salinidad, en condiciones de laboratorio en Ayacucho. La investigación se desarrolló

en suelo ligeramente salino y arcilloso, mediante un diseño completamente al azar con arreglo factorial 3×3 y tres repeticiones, considerando niveles de biosílice foliar de 0, 1 y 2 %, y niveles edáficos de 0, 500 y 1000 kg ha⁻¹. Las variables evaluadas fueron altura de planta, materia seca de la parte aérea, materia seca radicular, relación parte aérea/raíz y conductividad eléctrica del suelo. Los resultados indicaron que las aplicaciones de biosílice no presentaron efectos estadísticamente significativos en todas las variables; sin embargo, mostraron tendencias favorables. La materia seca aérea se incrementó entre 5.8 % y 13.15 % con aplicaciones foliares de 1.5 y 2 %, y hasta 13.73 % con 1.5 % foliar más 1000 kg ha⁻¹ de biosílice edáfica. La materia seca radicular aumentó 21.30 % con 1.5 % foliar y 23.47 % al combinarse con 1000 kg ha⁻¹ de aplicación edáfica. Asimismo, los tratamientos con 2 % foliar, 1000 kg ha⁻¹ edáfico y sus combinaciones favorecieron la altura de planta, mientras que 1000 kg ha⁻¹ de biosílice edáfica tendió a disminuir la conductividad eléctrica del suelo.

En un estudio realizado por Naranjo & Solórzano (2018) en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano - Honduras, se evaluaron los efectos de la aplicación foliar de silicio (SiO₂) en el arroz variedad DICTA Playitas. Se utilizaron seis dosis de SiO₂ (0.00, 0.54, 0.81, 1.08, 1.35 y 1.62 kg/ha) aplicadas en dos etapas fenológicas: macollamiento y diferenciación floral. Los resultados mostraron que la dosis de 1.35 kg/ha generó el mayor rendimiento (5.26 t/ha), mientras que dosis más altas (1.62 kg/ha) redujeron el rendimiento (3.91 t/ha). La biomasa y la altura de la planta también aumentaron significativamente con las dosis de silicio. En un segundo experimento, la aplicación de silicio no indujo tolerancia al estrés hídrico en una semana de evaluación. En conclusión, las aplicaciones foliares de silicio tuvieron un efecto positivo en el macollamiento, biomasa, altura de planta y rendimiento del cultivo de arroz.

Estudios realizados por Cartagena Gamboa (2025) en el Centro Experimental Canaán de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga (UNSCH), ubicado en Ayacucho, Perú (2750 msnm), se evaluaron los efectos del biosílice foliar en tres niveles (0, 0.5 y 1% p/v) y levadura de panificación (*Saccharomyces cerevisiae*) en dos niveles (0, 1% p/v) sobre el rendimiento de cebolla (*Allium cepa* L.). El biosílice foliar al 1% produjo la mayor altura de planta con 71.78 cm, seguida por el 0.5% con 69.48 cm, sin diferencias estadísticas entre ambos; la altura sin aplicación fue de 67.66 cm, representando un

incremento del 6.08% respecto al tratamiento sin biosílice. La combinación de levadura al 1% p/v y biosílice foliar al 1% resultó en el mayor peso del bulbo (236.48 g), con diferencias significativas con otros tratamientos. La mayor dosis de levadura al 1% incrementó la materia seca del bulbo a 10.66%, significativamente mayor que el tratamiento sin aplicación (9.99%), mientras que el biosílice al 1% aumentó la materia seca a 10.57%, sin superar estadísticamente a la dosis intermedia (10.45%). El diámetro del bulbo fue mayor con biosílice al 1% (7.32 cm), sin diferencias con la dosis intermedia (7.06 cm), aumentando 13.31% respecto al testigo; la levadura al 1% también aumentó el diámetro a 7.19 cm, con un incremento significativo de 7.1% respecto al testigo (6.71 cm). Ambos bioestimulantes favorecieron el aumento del diámetro del bulbo, siendo ligeramente superior el efecto del biosílice. La dosis alta de biosílice (1% p/v) alcanzó el mayor crecimiento longitudinal del bulbo (8.81 cm), sin diferencias con la dosis intermedia (8.75 cm). El rendimiento total de bulbos aumentó con la aplicación combinada de biosílice foliar y levadura en el suelo, estimándose un rendimiento promedio de 81,168 kg ha⁻¹, mientras que sin levadura fue de 70,597 kg ha⁻¹, variando según la dosis de silicio aplicada y siendo mayor cuando se usó junto con levadura.

Un estudio realizado por Roca Molina (2024) en Ayacucho, sobre el impacto de diferentes niveles de biosílice, boro y zinc foliar en el rendimiento y calidad del tomate cherry (*Lycopersicum esculentum*) var. cerasiforme en 2022, encontró que la aplicación de altas dosis de boro (0.025% B), zinc (0.025% Zn) y biosílice (0.150% Si) favoreció un aumento significativo en el rendimiento de los frutos. Esta combinación resultó en un mayor número de frutos por planta (104), así como en un incremento en el peso (24.14 g), diámetro ecuatorial (35.51 mm) y diámetro polar (33.45 mm) en comparación con los tratamientos que recibieron dosis más bajas de biosílice (0.025% B, 0.025% Zn y 0.10% Si).

1.1.3. Antecedentes agronómicos comparativos del cultivo de haba (*Vicia faba* L.)

Huamán Tapara et al. (2026) realizaron un estudio en Chinchero, Cusco, con el objetivo de comparar el rendimiento agronómico de siete líneas avanzadas y cuatro variedades locales de haba desarrolladas en la Estación Experimental Andenes del INIA. El estudio se condujo bajo un diseño de bloques completamente al azar, con 11 tratamientos y tres repeticiones; los datos fueron procesados mediante InfoStat y comparación de medias con

la prueba Fisher LSD al 5 %. Las variables evaluadas incluyeron porcentaje de emergencia, prefloración, número de racimos por macollo, número de vainas por macollo, número de óvulos, longitud y ancho de vaina, grosor de vaina, rendimiento en vaina verde, rendimiento en vaina seca, rendimiento en grano seco, altura de planta, número de macollos productivos, peso de 100 granos y calibre de grano. Entre sus resultados, los autores reportaron longitudes de vaina entre 7,80 y 9,13 cm, anchos de vaina entre 2,04 y 2,26 cm, y rendimiento en vaina verde entre 5,56 y 11,67 t ha⁻¹.

Instituto Nacional de Investigación Agraria [INIA] (2007) presentó la variedad Haba INIA 417-Hinán Carmen como una variedad adaptada a la sierra sur del Perú, entre 3390 y 3850 m s. n. m., con presencia en Cusco, Apurímac, Ayacucho, Puno y Huancavelica. Al tratarse de una ficha técnica varietal, no corresponde a un diseño experimental como tal, sino a una descripción morfológica, agronómica y de adaptación agroecológica. Las variables reportadas incluyen altura de planta, días a floración, días a fructificación, macollos productivos por planta, racimos productivos por macollo, vainas por planta, granos por vaina, longitud de vaina, rendimiento y peso de 100 semillas. Entre sus resultados técnicos, la variedad presentó altura de planta de 1,60 a 1,85 m, 4 a 9 macollos productivos por planta, 27 vainas por planta, 2 a 3 granos por vaina, longitud de vaina de 10 a 12 cm, rendimiento promedio en grano seco de 1,9 a 2,2 t y peso de 100 semillas de 150 a 215 g.

Infante Gálvez (2014) evaluó en Acobamba, Huancavelica, el efecto de la aplicación foliar de calcio, boro y hormonas vegetales tipo auxinas sobre la abscisión floral y el cuajado de frutos en haba (*Vicia faba* L.). El estudio fue experimental y se condujo bajo un diseño de bloques completamente al azar, con tres tratamientos, un testigo, cuatro repeticiones y 16 unidades experimentales; para la comparación de medias se utilizó la prueba de Tukey al 5 %. Los tratamientos fueron CaB, ácido indolacético, ácido indolbutírico y testigo, aplicados en diferentes etapas fenológicas: prefloración, plena floración y cuajado de frutos. Las variables evaluadas incluyeron número de flores por planta, número de vainas por planta, número de granos por vaina, porcentaje de cuajado de frutos, porcentaje de abscisión floral y peso de granos por planta. Entre sus resultados, el tratamiento con CaB alcanzó 58,85 flores por planta a los 100 días después de la siembra y 131,92 flores por planta a los 121 días después de la siembra, valores superiores

al testigo.

Cancho Cuba (2021) caracterizó y seleccionó 45 cultivares de haba en Canaán, Ayacucho, a 2762 m s. n. m., con el propósito de evaluar caracteres morfológicos, productivos, de adaptación y selección agronómica. El estudio se desarrolló mediante caracterización morfológica y análisis estadístico descriptivo, empleando medidas de tendencia central, dispersión, pruebas de asociación y correlaciones. Las variables evaluadas incluyeron altura de planta, longitud de vaina, ancho de vaina, número de vainas por planta, peso de 100 semillas, rendimiento, número de semillas por vaina, ancho y longitud de grano, peso de grano seco, número de granos por planta y características de semilla. Entre sus resultados, el grupo de mayor altura alcanzó entre 102,5 y 119,4 cm; el mayor número de vainas por planta estuvo entre 12 y 14 vainas en el 17,8 % de cultivares, mientras que el rango más frecuente fue de 10 a 12 vainas por planta en el 51,1 %. Asimismo, la longitud de vaina varió entre 6,8 y 11,6 cm, y el ancho de vaina entre 1,4 y 2,6 cm.

Ataupillco Jorge (2025) evaluó el rendimiento y la rentabilidad en la producción de semilla de tres cultivares de haba con dos densidades de plantas en Tambo, Ayacucho, a 3650 m s. n. m. El estudio se desarrolló bajo un diseño de bloques completamente al azar y consideró cultivares y densidades de siembra como factores de evaluación. Las variables reportadas en el registro del repositorio incluyen componentes de rendimiento y características de vaina y semilla. Entre sus resultados, se reportaron valores de 16,97 cm de longitud de vaina y 4,78 semillas por vaina.

Tineo Mendoza (2011) evaluó el rendimiento en vaina verde y grano seco de diez variedades de haba en Allpachaka, Ayacucho, a 3500 m s. n. m., entre noviembre de 2010 y junio de 2011. El estudio utilizó un diseño de bloque completo randomizado, con cuatro repeticiones y 40 tratamientos. Las variables evaluadas incluyeron características fenológicas, altura de planta, número de macollos por planta, número de vainas por planta, longitud de vaina, ancho de vaina, número de granos por vaina, rendimiento en vaina verde, rendimiento en grano seco y mérito económico. Entre sus resultados, la altura de planta varió entre 1,28 y 1,60 m; el número de macollos por planta entre 1,48 y 5,25; el número de vainas por planta entre 22 y 47; la longitud de vaina entre 10,04 y 11,91 cm; el ancho de vaina entre 1,72 y 1,92 cm; y el número de granos por vaina entre 1,91 y 2,19. Además, el rendimiento en vaina verde varió entre 9,26 y 24,14 t ha⁻¹, y el rendimiento

en grano seco entre 1,48 y 3,86 t ha⁻¹. Este antecedente es uno de los más importantes para la discusión, porque se desarrolló en Ayacucho y permite comparar varias variables de la presente investigación: altura, macollamiento, número de vainas, longitud y diámetro de vaina, granos por vaina y rendimiento.

Instituto Nacional de Innovación Agraria [INIA] (2012) presentó la variedad Haba INIA 429-Fortaleza como una variedad con características sobresalientes de calidad de grano, sanidad y rendimiento, recomendada para condiciones de la región central del Perú, entre 2800 y 3700 m s. n. m. Al igual que INIA 417, este documento corresponde a una ficha técnica varietal y no a un experimento con diseño estadístico convencional. Las variables descritas incluyen número de macollos, altura de planta, número de flores por inflorescencia, longitud y ancho de vaina, tamaño de semilla, número de granos por vaina, número de vainas por planta, peso de 100 semillas y rendimiento. Entre sus resultados técnicos, la variedad presentó tres macollos promedio por planta, altura promedio de 150 cm, 3 a 5 flores por inflorescencia, longitud de vaina de 10,8 cm, ancho de vaina de 2,25 cm, 2 a 3 granos por vaina, 45 a 50 vainas por planta, peso de 100 semillas de 209,4 g, rendimiento potencial de 4,3 t ha⁻¹ y rendimiento promedio en campo de 2,8 a 3,0 t ha⁻¹.

1.2. EL CULTIVO DE HABA (*Vicia faba* L.)

1.2.1. Origen y distribución

El origen de haba aún no está claro, aunque hay evidencias de su existencia desde el Neolítico temprano en el Cercano Oriente y se sugiere que podría ser originaria de Asia, la cuenca del Mediterráneo o el norte de África, especialmente Egipto. Se cree que su antepasado fue la *Vicia galilea*, lo que ayuda a ubicar su origen en Asia Central, donde se registran cultivos tempranos. Las primeras referencias sobre el haba provienen de China (100 a.C.) y Japón (700 d.C.), pero su origen no se determinó hasta 1313. Aunque no existen descripciones tempranas en la India ni en el Cercano Oriente, hay antiguos nombres de la cosecha en regiones como Cachemira y Punjab. Las primeras variedades de semillas pequeñas surgieron en China en el siglo XVI, seguidas por variedades de semillas más largas que llegaron a Perú, Inglaterra, Francia y España en 1980, lo que dio lugar a dos tipos principales de *Vicia faba*: las de semillas pequeñas y medianas, para semilla seca, y las de semillas largas, destinadas al consumo en grano verde (Horque,

2004)

1.2.2. Introducción de habas en el Perú

Las habas fueron introducidas en el Nuevo Mundo durante la época colonial, llegando a América en 1602. Fueron cultivadas por primera vez en la Costa Atlántica de los Estados Unidos, tanto para la producción de grano seco o semilla como para la obtención de frutos verdes y tiernos. En el Perú, llegaron con los conquistadores españoles, y aunque inicialmente se cultivaron en la costa, no prosperaron allí, adaptándose mejor a la sierra peruana. Durante los primeros años, se cultivaron diversas variedades que fueron seleccionadas de forma natural, descartándose aquellas que no lograron adaptarse al entorno. Como resultado, surgieron nuevas formas de haba, distintas a las originales, las cuales representan una valiosa fuente de genes para futuras selecciones (Horque, 2004).

1.2.3. Taxonomía del cultivo de habas

Según Cronquist (1981), se clasifica taxonómicamente el haba de la siguiente forma:

Reino	: Plantae
Subreino	: Tracheobionta
División	: Magnoliophyta
Subdivisión	: Angiospermae
Clase	: Magnoliopsida
Orden	: Fabales
Familia	: Fabaceae
Genero	: Vicia
Nombre científico	: <i>Vicia faba</i> L.

1.3. DESCRIPCIÓN BOTÁNICA DEL HABA

Cubero y Moreno (1983) describen las características botánicas de la *Vicia faba* L. de la siguiente manera:

Raíz: Tiene una raíz principal pivotante que se ramifica en raíces secundarias y terciarias, desarrollando pelos absorbentes que facilitan la captura de agua y nutrientes del suelo. Estas estructuras también permiten a la planta fijar nitrógeno, mejorando la calidad del suelo.

Tallo: El tallo es robusto, erecto y cilíndrico, con nudos y entrenudos que sostienen las hojas y flores. Su altura varía según las condiciones de cultivo, y su crecimiento puede ser erecto, semipostrado o postrado, dependiendo de la variedad y el ambiente.

Hojas: Las hojas del haba son compuestas, formadas por folíolos alargados o lanceolados con márgenes enteros o ligeramente ondulados. Su tamaño, forma y textura varían según la edad de la planta y la variedad, y son esenciales para la fotosíntesis.

Inflorescencia: La inflorescencia del haba se presenta en racimos, en los que las flores se agrupan de manera ordenada a lo largo de los racimos primarios. Este tipo de organización floral favorece una floración continua durante el ciclo de crecimiento de la planta, permitiendo que se desarrollen nuevas flores a medida que avanzan los racimos.

Flores: Las flores del haba son grandes y poseen una estructura típica de las leguminosas, con un pétalo superior más grande conocido como estandarte, dos alas laterales y una quilla inferior. Los colores de las flores varían, siendo comunes los tonos blancos, rosados y morados. Además, las flores son hermafroditas, lo que facilita la autofertilización o la polinización cruzada mediante insectos.

Fruto: El fruto del haba es una legumbre alargada y cilíndrica que contiene entre 4 y 6 semillas. La vaina que lo rodea es lisa, aunque a veces presenta pelos finos en su superficie, y puede variar de color desde verde hasta marrón conforme las semillas maduran. Este fruto tiene una textura suave y es característico de las leguminosas.

Semilla: Las semillas del haba son grandes y ovaladas, con una superficie lisa. El color de las semillas varía dependiendo de la variedad de la planta, y pueden ser verdes o marrones. Son altamente nutritivas, ricas en proteínas y carbohidratos, lo que las convierte en un alimento valioso tanto para el consumo humano como para el ganado.

Ramas y complejos axilares: Las ramas del haba se desarrollan en los complejos axilares, que son puntos de crecimiento situados en las axilas de las hojas. Estas ramas pueden crecer de manera vertical o en ángulo, dependiendo del tipo de hábito de crecimiento de la planta. Además, los complejos axilares son fundamentales para la formación de nuevas flores y frutos, contribuyendo así al desarrollo general de la planta.

1.4. FASES FENOLÓGICAS

Aguilera (1997) explica el desarrollo de *Vicia faba* L. dividiéndolo en varias fases clave. En la fase de germinación, la semilla absorbe agua, lo que provoca la ruptura de su cáscara y la emergencia de la raíz y el brote. Durante el crecimiento vegetativo, la planta desarrolla sus raíces, tallo y hojas, lo que es fundamental para establecer una base sólida para su posterior desarrollo. La fotosíntesis juega un papel crucial en esta fase, ya que las hojas producen la energía necesaria para el crecimiento. En la fase reproductiva, la planta produce flores que luego se convierten en vainas con semillas, marcando un paso importante en la producción de nuevas semillas para la siguiente generación. Finalmente, el crecimiento vegetativo y reproductivo se integran a medida que la planta distribuye sus recursos entre el mantenimiento de la vegetación y la formación de semillas.

Según Meier (2001, como se citó en Calderón, 2016), la metodología de la BBCH (Basch-Bayer-Ciba-Hoerchst) para las etapas fenológicas del haba clasifica los estadios principales de crecimiento del 0 al 9 de la siguiente manera:

Fase vegetativa del haba

Etapas 0. Germinación desde la semilla seca, el comienzo de la imbibición de la semilla, la radícula fuera de la semilla, brote fuera de la semilla finalizando con la emergencia en la cual el gancho plumular sale hacia la superficie del suelo.

Etapas 1. Desarrollo de las hojas en el tallo principal: Par de hojas escama visibles.

Etapas 2. Formación de brotes laterales: Comienzo del desarrollo de los brotes laterales hasta el fin del desarrollo de los mismos (9 o más brotes).

Etapas 3. Crecimiento longitudinal del tallo principal: Comienzo del crecimiento longitudinal del tallo (p. 9).

Fase Reproductiva del haba

Etapas 5. Aparición del órgano floral en el tallo principal: Botones florales.

Etapas 6. Floración en el tallo principal: Primeras flores abiertas.

Etapas 7. Formación del fruto: Primeras vainas que han alcanzado su tamaño final.

Etapa 8. Maduración de frutos y semillas: Comienzo de la maduración de semillas verdes, relleno de la cavidad de la vaina.

Etapa 9. Senescencia: Cuando los tallos comienzan a oscurecer y el 50% de los tallos marrones o negros (p. 9).

1.5. RENDIMIENTO DE HABAS EN VAINA VERDE

El rendimiento del cultivo de haba en vaina verde ha sido un tema importante en diversas investigaciones en el Perú, y se ha observado que este rendimiento varía significativamente según las condiciones agroclimáticas y las prácticas agrícolas utilizadas. Aquino-Durán (2020) reportó un rendimiento de 13.58 t ha^{-1} , evidenciando la buena productividad en esta zona gracias a suelos adecuados y un manejo agronómico eficiente. Instituto Nacional de Innovación Agraria [INIA] (2000, como se citó en Arrieta y Deudor, 2020), menciona que, con un manejo apropiado, es posible obtener rendimientos de hasta 12 t ha^{-1} de grano verde y 2.4 t ha^{-1} de grano seco. Colorado (2023) reportó un rendimiento de hasta 49.99 t ha^{-1} de vaina verde, alcanzado mediante capacidad de nodulación de líneas de haba resistentes a *Botrytis fabae*. INIA (2013) el rendimiento depende mucho de la variedad y el nivel de tecnología empleado, así tenemos que en verde fluctúa de 12 a 20 t ha^{-1} y en seco de 2 a 4 t ha^{-1} . Finalmente, Ramírez et al., (2013, como se citó en Pineda, 2024) se reportó un rendimiento de 3.59 t ha^{-1} de haba verde.

1.6. REQUERIMIENTOS EDAFOCLIMÁTICOS

1.6.1. Clima y temperatura

El clima tiene un impacto significativo en el crecimiento y desarrollo del cultivo de haba. Dependiendo del lugar de siembra, se observará una variabilidad en las temperaturas y en los rendimientos obtenidos, tal como se señala Intagri (2023) en el siguiente estudio:

El cultivo de haba es tolerante a las heladas en las primeras etapas de su desarrollo, puede soportar temperaturas desde -5°C , pero en la etapa de floración la temperatura mínima es de 10°C para evitar el aborto de frutos. En general prefiere temperaturas uniformes templado-cálidas, mostrando mejor comportamiento en climas templado-húmedo que en climas cálidos-secos. Temperaturas superiores a los 30°C durante el periodo comprendido entre la floración y el cuajado de las

vainas, pueden provocar abortos tanto de flores como de vainas inmaduras, aumentando la fibrosidad de estas (p. 1).

El cultivo de haba presenta bajas exigencias respecto a la temperatura del suelo y muestra una tolerancia moderada a las heladas, aunque puede sufrir daños severos cuando las temperaturas alcanzan alrededor de $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$, siendo la etapa de floración la más vulnerable a este tipo de eventos. La temperatura base mínima de crecimiento es $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y se favorece con temperaturas entre 15 y $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, pudiendo soportar hasta $28\text{ }^{\circ}\text{C}$. Durante la floración requiere temperaturas cercanas a $10\text{--}12\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que para el llenado de grano se favorece con valores próximos a $16\text{ }^{\circ}\text{C}$. En cuanto a la germinación, esta ocurre desde los $7\text{ }^{\circ}\text{C}$, con un intervalo óptimo entre 22 y $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ y un máximo tolerado de $36\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Tapia & Bascur, 1992).

1.6.2. Suelos

El cultivo de haba puede desarrollarse en suelos con pH no menores a 5.0, aunque su crecimiento más favorable se observa cuando este se sitúa entre 5.7 y 6.8, pudiendo llegar a tolerar valores de hasta 8.6. Asimismo, es capaz de soportar niveles de salinidad moderados, con una conductividad eléctrica adecuada alrededor de 2.0 dS/m y un límite superior de tolerancia cercano a 6.8 dS/m (CIREN, 2017).

El cultivo se desarrolla favorablemente en suelos sueltos, con una inclinación hacia los suelos arcillosos o aquellos que combinan sílice y arcilla caliza, que sean profundos y contengan una cantidad adecuada de materia orgánica. No obstante, es vulnerable a condiciones de humedad excesiva y suelos con drenaje deficiente. El rango óptimo de pH para su crecimiento está entre 7.3 y 8.2, y presenta cierta tolerancia a niveles moderados de salinidad (Intagri, 2023).

1.6.3. Precipitación

Frere y Popov (1979, citado en Cancho, 2021), mencionan que el cultivo de *Vicia faba* L., pueden desarrollarse con precipitaciones que oscilan entre los 200 y los 2600 mm. Donde las condiciones más favorables de precipitación para este cultivo se encuentran entre 700 mm y 1000 mm, o bien entre 720 mm y 1600 mm, siempre y cuando la distribución de las lluvias sea uniforme durante todo el ciclo de cultivo.

1.7. MANEJO AGRONÓMICO

1.7.1. *Preparación del suelo*

La correcta preparación del terreno juega un papel esencial en el éxito del cultivo de haba. Es importante llevar a cabo una labranza adecuada que permita mejorar la estructura del suelo, favoreciendo una mejor circulación de aire y un drenaje óptimo. Según Checa (1994) “Generalmente se siembra en rastros de otros cultivos como trigo, cebada, maíz, etc. En estos casos se recomienda una arada, una rastrillada, una surcada con ayuda del tractor o con yunta de bueyes y luego la siembra” (p, 2).

El Servicio Nacional de Sanidad Agraria del Perú [SENASA], (2020) menciona que la preparación del terreno comienza con la eliminación de los restos de cosechas previas. Si se opta por incorporar el rastrojo al suelo, es necesario llevar a cabo esta tarea con suficiente antelación para asegurar que los restos se descompongan completamente. Si el nivel de humedad del suelo es insuficiente, se realiza un riego para humedecerlo adecuadamente antes de proceder con el arado y la nivelación del terreno. Es importante considerar que una roturación excesiva del suelo durante este proceso puede dañar su estructura. Cuando se diseñan los surcos, es importante seguir las curvas de nivel del terreno para prevenir la erosión y la pérdida de suelo durante el riego.

1.7.2. *Fertilización química y orgánica*

Fertilización química

Un plan de fertilización eficaz debe iniciarse con un análisis de suelo, ya que esto proporciona la base para ajustar las recomendaciones nutricionales. Este plan considera las necesidades específicas de nutrientes de la planta de acuerdo con su fenología, los nutrientes disponibles en el suelo según los resultados obtenidos del análisis, y las características de los fertilizantes, como su solubilidad. Además, se deben evaluar las condiciones del terreno, tales como la textura, pendiente y drenaje, así como el clima de la región (SENASA, 2020).

La fertilización química se realiza en dos etapas. La primera consiste en aplicar el fertilizante al momento de la siembra, distribuyéndolo de manera continua en el fondo del surco. El Ministerio de Agricultura [MINAG] (2013, citado en SENASA, 2020)

recomienda la aplicación de una dosis de 20-80-40 de N, P_2O_5 y K_2O para el cultivo de haba en el momento de la siembra. La segunda aplicación tiene lugar cuando las plantas alcanzan una altura de entre 15 y 20 centímetros (Checa, 1994).

Según las recomendaciones orientativas, para una producción de 12000 kg por hectárea de haba verde, se estima la necesidad de 200 kg de nitrógeno (N), 60 kg de fosfato dicálcico (P_2O_5) y 130 kg de óxido de potasio (K_2O) (Domínguez, 1984 como se citó en López, 2011). En suelos con baja fertilidad, se puede aumentar la cantidad de nitrógeno, aunque con precaución, ya que un exceso de este nutriente puede favorecer un desarrollo vegetativo excesivo en las plantas, lo cual reduce la producción de frutos (Tisdale & Nelson, 1991 como se citó en López, 2011).

Fertilización orgánica

SENASA (2020) manifiesta que la aplicación de cualquier estiércol debe ser descompuesto antes de ser utilizado en el campo, y debe aplicarse antes de la siembra. Se desaconseja el uso de lodos residuales o residuos sólidos de origen humano. Al aplicar fertilizantes orgánicos en el terreno, es esencial considerar la pendiente para prevenir la contaminación de los cuerpos de agua cercanos. Además, todas las herramientas empleadas en la preparación de abonos orgánicos deben ser desinfectadas después de su uso.

1.7.3. Siembra

Checa (1994) manifiesta que la cantidad de semilla utilizada por hectárea puede variar entre 60 y 100 kg, dependiendo de factores como el tamaño del grano, la variedad y el espaciamiento de siembra. Las distancias de siembra deben ajustarse a las características de cada variedad y las condiciones locales. En general, se recomienda un espaciamiento de entre 0.90 m y 1.00 m entre surcos, con una distancia de entre 0.50 m y 0.70 m entre plantas. Además, la cantidad de semillas por sitio suele ser de dos a tres por cada hoyo, lo que asegura una adecuada densidad de siembra para un rendimiento óptimo.

Agroecuador (2010, citado en Arrieta y Deudor, 2020) menciona que:

Se debe colocar las semillas al fondo del surco, dejando 2-3 granos por sitio y a una distancia de 50 cm entre plantas; a continuación, se tapa con tierra, labor

desempeñada por el mismo operario que siembra; poner tierra no mayor de 2-3 veces el diámetro de la semilla (1-2 cm de tierra) (p. 11).

Suquilanda (2008, como se citó en Arrieta y Deudor, 2020) explica que:

Cuando el haba se siembra en monocultivo, las distancias de siembra son: entre surcos de 50-60 cm y entre matas o sitios de 30 a 45 cm, depositando 2 a 3 semillas por sitio, para tener una densidad poblacional de 66,600 plantas/ha a 36,600 plantas/ha. Además, en las zonas frías con altitudes mayores a 3200 msnm, la siembra debe realizarse preferiblemente en octubre para que la temperatura no afecte al cultivo. En caso de variedades tardías debe sembrarse desde julio hasta septiembre, esperando que haya pasado el periodo de heladas. En zonas donde se dispone de agua durante todo el tiempo es conveniente sembrar antes de la época seca; en zonas donde hay escasez de agua, la siembra debe realizarse con las primeras lluvias. (pp. 11-12).

1.7.4. Riego

En las regiones andinas, donde la siembra del haba se realiza durante los meses de septiembre y octubre, el riego adicional generalmente no es necesario, ya que se aprovecha el agua proporcionada por las lluvias. No obstante, en situaciones de sequía, se recomienda aplicar riegos suaves para mantener la humedad en el suelo sin causar encharcamientos. Es fundamental prestar atención a las fases críticas del cultivo, como el macollaje, la floración, la formación de vainas y el llenado de grano, ya que en estas etapas no debe faltar agua en el suelo para asegurar un buen desarrollo de la planta y un rendimiento óptimo (Horque, 2004).

Suquilanda (2008, como se citó en Arrieta y Deudor, 2020) menciona que:

El cultivo de haba requiere una cantidad de agua que varía entre 800 y 1000 mm (800 a 1000 m³) durante todo su ciclo vegetativo. En los casos donde se utiliza riego, es importante aplicar un riego previo de 2 a 3 días antes de la siembra, de modo que la semilla se encuentre en un suelo húmedo y fresco. Sin embargo, es crucial tener en cuenta que un exceso de humedad puede ser perjudicial para el desarrollo de las plantas, por lo que se recomienda aplicar riegos ligeros y ajustarlos según las necesidades del cultivo, especialmente durante las etapas

críticas como el macollaje, floración, formación de vainas y llenado de granos (p.14).

1.7.5. Aporque

La actividad de aporque se realiza con el propósito de promover el desarrollo del sistema radicular adventicio, mejorar el anclaje de las plantas y prevenir el vuelco o encamado. Además, ayuda en el control de malezas y mejora la aireación del suelo. Esta práctica se lleva a cabo antes de la floración completa para evitar la caída de flores debido a las acciones mecánicas. El aporque puede realizarse de manera manual, utilizando herramientas como lampas y azadones, o mediante equipos mecanizados. En las regiones de la sierra, es común el uso de arados tirados por yunta de bueyes. Posteriormente, se requiere realizar un arreglo de los surcos, eliminando las malezas que permanecen entre las plantas (Horque, 2004).

1.7.6. Plagas y enfermedades

Según Alanoca (2010, como se citó en Quispe, 2018), el cultivo de haba (*Vicia faba* L.) está expuesto a diversas plagas y enfermedades que pueden afectar tanto su crecimiento como su productividad. Entre las plagas más comunes se incluyen los gusanos de tierra, como *Copitarsia turbata* y *Feltia experta*; las moscas minadoras, tales como *Liriomiza* sp. y *Melamagromiza* sp.; así como los pulgones, especialmente *Aphis fabae*. En cuanto a las enfermedades, las más destacadas son la mancha chocolate, provocada por *Botrytis fabae*, la mancha foliar causada por *Alternaria* sp., la chupadera fungosa producida por *Rhizoctonia solani* y la marchitez ocasionada por *Fusarium* sp.

1.7.7. Cosecha

La cosecha de haba se realiza de diferentes maneras dependiendo de la etapa de maduración. En grano verde, se cosecha entre los 150 y 170 días después de la siembra, cuando las vainas alcanzan un estado semi-pastoso, evitando almacenarlas por largos periodos para prevenir el daño. En grano seco, la cosecha se lleva a cabo cuando las vainas se ponen negras y sueltas, entre los 180 y 210 días, y se puede realizar con tractor o manualmente. También se puede cortar el tallo cuando la semilla ha alcanzado la madurez fisiológica y luego finalizar el proceso de maduración en la era para su trillado y venteado correspondiente (INIA, 2013).

1.8. VARIEDAD DE HABA QUELCAO DE ANTA

Valladolid (2016) menciona sobre la variedad de haba Quelcao de la siguiente manera:

Este tipo de haba se cultiva bajo secano en los valles interandinos de los departamentos de Cusco, Ayacucho y Apurímac. El grano tiene un color verde claro con rayas concéntricas de color verde oscuro a los costados y un hilum muy largo. Su forma es ovalada y aplanada (figura 1.1), con un tamaño mediano, ya que 100 semillas pesan entre 180 y 210 gramos. El calibre varía entre 55 y 58 semillas por 100 gramos, o 49 a 52 semillas por onza (28.5 g). En cuanto a las zonas de producción, se encuentran en la Sierra Sur, especialmente en las áreas productoras de Cusco, Apurímac, Ayacucho, tanto en zonas de bajo secano como en los valles interandinos con riego. En la Sierra Sur, la siembra del haba se realiza entre septiembre y noviembre, y la cosecha tiene lugar entre abril y junio. Tiene habito de crecimiento indeterminado, días de floración 90, días de cosecha 210 (p.59).

Figura 1.1.

Foto de la morfología del haba de la variedad Quelcao



Nota. Obtenido de <https://en.tarbigem.com.tr/urunler/fodder-crops/treated-fava-bean->

1.9. BIOCHAR O BIOCARBÓN

1.9.1. Definición de Biochar

Paco y Alcañiz (2012) indican que el término "biochar", aún no reconocido por la RAE en español (aunque podría traducirse como "biocarbón"), hace referencia a un material fino y poroso similar al carbón vegetal, este producto se obtiene a través de la pirolisis,

un proceso en el que se descompone térmicamente la biomasa con una cantidad limitada de oxígeno, lo que transforma diferentes tipos de materia orgánica en este compuesto.

Soto Muñoz et al. (2023) mencionan que el biocarbón también conocido como biochar en el idioma inglés, es la biomasa carbonizada que se produce en un horno en ausencia de oxígeno, el proceso químico de transformación térmica o carbonización de materiales orgánicos (tales como madera, hojas, paja, excretas, etc.) en ausencia de oxígeno se conoce como pirólisis.

1.9.2. Origen del biochar: “Terra Preta” en la Amazonia

Este producto surgió cuando se redescubrieron las tierras negras en la Amazonía brasileña, conocidas como Terra Preta, descritas por Smith en 1879 y Hartt en 1885. Estos investigadores registraron la presencia de suelos oscuros y fértiles en la región, aunque no lograron determinar su origen (Woods & Glaser, 2004). La Terra Preta se localiza principalmente a lo largo de los ríos, en zonas con una mayor concentración de asentamientos indígenas, y sus áreas pueden variar desde decenas hasta cientos de metros cuadrados (Woods & McCann, 1999 como se citó en Soto Muñoz et al., 2023). Falcao (2012) explica que la Terra Preta o tierra negra, es un tipo de suelo altamente fértil creado por los pueblos indígenas de la Amazonía, formado a partir de la acumulación y quema de materiales orgánicos como restos de plantas y pescado, este proceso mejoró la calidad del suelo, manteniendo su riqueza en nutrientes durante siglos. Glaser et al. (2001) demostraron que las altas concentraciones de carbón pirogénico en los suelos de Terra Preta están vinculadas principalmente a prácticas de quema como el uso del carbón en la cocina y los incendios controlados, confirmando que estos suelos presentan hasta 70 veces más carbono negro que los suelos circundantes. Un alto contenido de nutrientes esenciales como P, Ca y K en estos suelos respalda la hipótesis de su fertilidad, las teorías sobre su origen antropogénico sugieren que la quema, tanto accidental como intencionada, fue una práctica común para despejar áreas de bosque y convertirlas en tierras cultivables, así como para eliminar la maleza (Woods & Glaser, 2004). Actualmente, se reconoce ampliamente que las Terras Pretas no solo fueron utilizadas por las poblaciones locales recientes, sino que también son resultado de la gestión del suelo realizada por las comunidades indígenas, tal como lo sugirió Gourou (1950, como se citó en Escalante, 2016).

1.9.3. Propiedades fisicoquímicas del biochar según su biomasa de origen

El biochar es un material altamente variable cuya composición depende de la materia prima y las condiciones de su producción. Sin embargo, comparte características comunes como un alto contenido de carbono (75-90%), bajo nitrógeno, pH alcalino, baja densidad, alta retención de agua, gran porosidad y capacidad adsorbente. Su degradación es extremadamente lenta, lo que le permite permanecer en el suelo durante cientos a miles de años, aunque una parte puede ser oxidada, modificando algunas de sus propiedades (Schlund, 2025).

Propiedades físicas

Las propiedades físicas del biocarbón, como su alta área superficial y porosidad, son elementos cruciales que facilitan un ambiente adecuado para la colonización de diversos microorganismos. Dado que la porosidad y el área superficial del biocarbón aumentan con la temperatura de pirólisis, este material puede ser modificado para optimizar su interacción con microorganismos específicos y adaptarse a distintas condiciones edáficas. La elevada porosidad del biocarbón potencia su capacidad para adsorber células, además de mejorar la retención de agua y nutrientes, lo que favorece la viabilidad y proliferación microbiana tanto durante el almacenamiento como después de su aplicación en el suelo, contribuyendo así a la protección y expansión de los microorganismos en la rizosfera (figura 1.3) (Gryta et al., 2024)

El biochar es un sólido carbonoso de color negro con una estructura compleja y desordenada (figura 1.2 a), cuyas características estructurales varían según el tipo de materia prima y las condiciones del proceso de pirólisis. Su estructura es amorfa y no cristalina, y está compuesto por partículas de diferentes tamaños que dependen de la fuente y el tamaño de la materia prima utilizada. Una de sus principales características es su alta porosidad, que se compone tanto de macroporos, originados por los espacios naturales de la materia prima, como de microporos, generados durante el pirólisis (figura 1.2 b). Esta porosidad incrementa la superficie del biochar, lo que mejora su capacidad para retener nutrientes y agua. No obstante, con el paso del tiempo, la porosidad y otras propiedades del biochar pueden cambiar, lo que afecta sus características físicas, químicas y biológicas (Lu, 2021).

Propiedades químicas

El biocarbón mejora la fertilidad del suelo y favorece la actividad microbiana gracias a su alto contenido de elementos como C, N, K, Ca, Mg y P, que ayudan en la retención de agua y nutrientes. La temperatura de pirólisis influye en su composición: a temperaturas altas aumenta el contenido mineral y estabilidad, mientras que a bajas temperaturas mejora la disponibilidad de nutrientes solubles. Los grupos funcionales en su superficie favorecen la inmovilización y proliferación de microorganismos, mientras que su pH y capacidad amortiguadora afectan la viabilidad microbiana. Sin embargo, algunos compuestos tóxicos generados durante el pirólisis pueden afectar a ciertos microorganismos, lo que requiere ajustar las condiciones de producción para optimizar sus beneficios en el suelo (Gryta et al., 2024).

El biochar se caracteriza por una mayor concentración de carbono y una menor cantidad de nitrógeno en comparación con el material original de partida. Durante la volatilización de las moléculas orgánicas, el fósforo se conserva en forma de cenizas dentro del biochar, las cuales se solubilizan y se vuelven disponibles para las plantas. Además, los niveles de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) en el biochar son más amplios que en los fertilizantes orgánicos convencionales. En cuanto al pH, el biochar presenta una variabilidad, abarcando un rango que va desde ácido hasta alcalino. Su capacidad de intercambio catiónico (CIC) varía dependiendo de las temperaturas aplicadas durante el proceso de pirólisis, siendo más alta a temperaturas elevadas. Los biochars recién elaborados tienen cargas superficiales positivas, pero a medida que envejecen, desarrollan una mayor cantidad de cargas negativas, lo que incrementa la acidez superficial y reduce la alcalinidad. Los biochars maduros presentan una CIC superior a la de los más jóvenes debido al mayor contacto con el oxígeno y el agua, lo que mejora la retención de nutrientes en el suelo, como NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} . Esta capacidad de retención se debe a su elevada superficie específica, alta carga superficial negativa y densidad de carga, lo que contribuye a una mejora significativa en la calidad del suelo (Lu, 2021).

Figura 1.2.

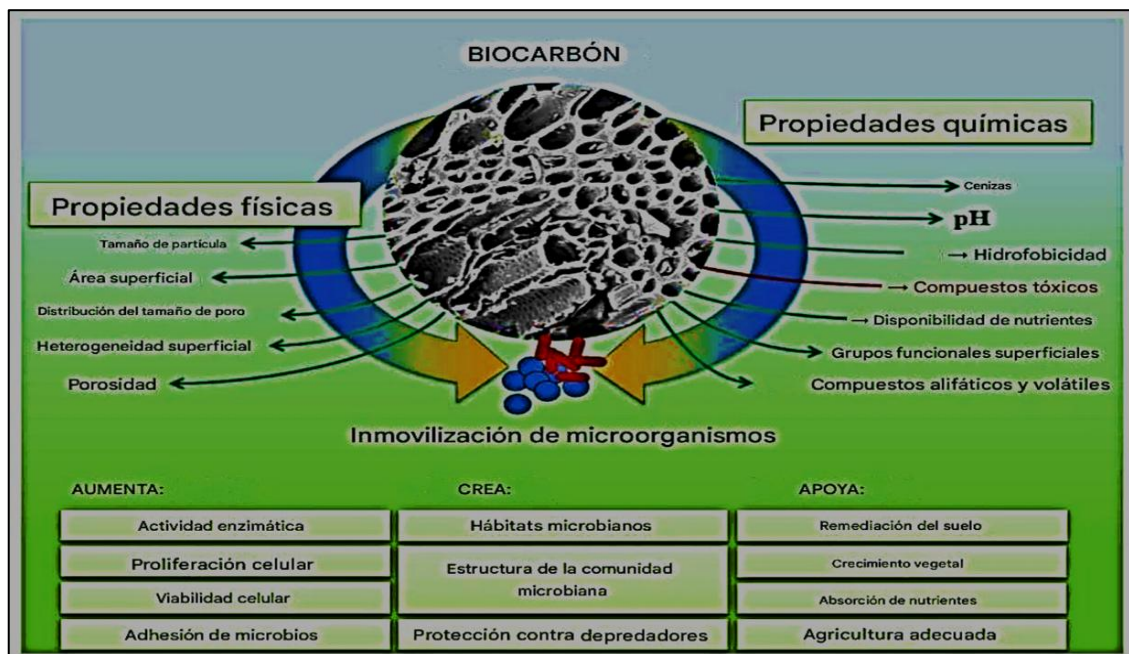
Obtención del biochar después de la pirolisis



Nota: *a.* fotografía propia de biochar de color negro, *b.* biocarbon bajo microscopioBrownsort, Centro de Investigación de Biocarbón del Reino Unido. De: <http://www.nakanoassociates.com/biochar>

Figura 1.3.

Resumen de las propiedades fisicoquímicas del biocarbón que afectan la inmovilización de microorganismos en la matriz del biocarbón.



Nota. *Las propiedades fisicoquímicas del biocarbón y microorganismos (Gryta et al., 2024, p.15).*

1.9.4. Producción del biochar

Materias primas

Los materiales para producir biocarbón son diversos, pero no todos los residuos son adecuados, ya que deben evitar competir con otros usos de mayor valor económico, como los destinados a alimentos o productos ambientales, entre los más comunes se encuentran residuos agrícolas como restos de cosecha, biomasa de árboles, bagazo de caña de azúcar y residuos orgánicos urbanos, además, materiales como estiércol, hojas y lodos residuales también son considerados, ya que su conversión en biocarbón ayuda a eliminar patógenos y a reducir problemas ambientales, las características del biocarbón dependen tanto de la materia prima como de las reacciones químicas durante la pirólisis, lo que resulta en productos con propiedades físicas y químicas variadas (Escalante et al., 2016).

Proceso de producción de biochar por pirólisis y su procesamiento

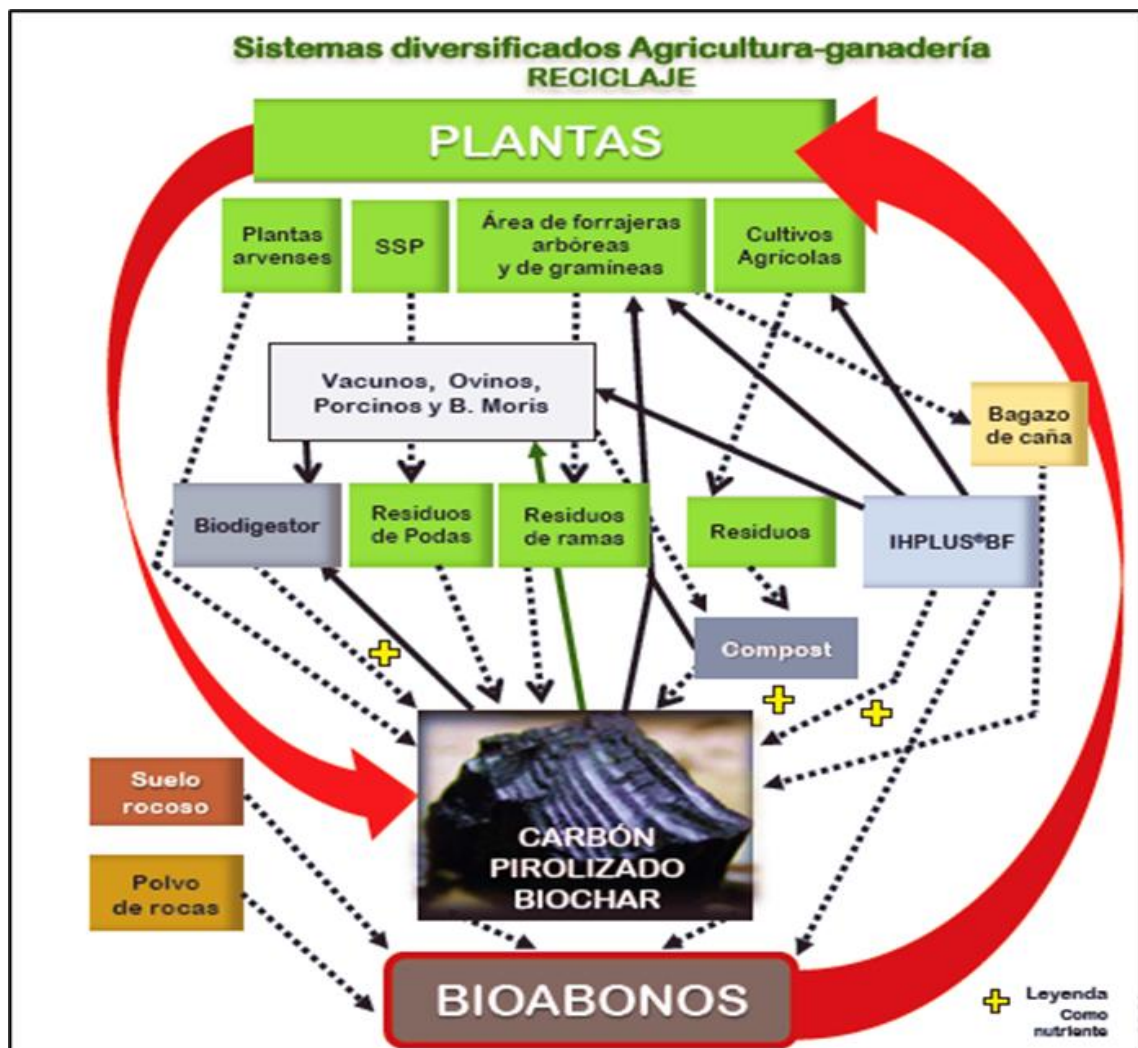
La producción de biochar se puede realizar mediante varios métodos industriales: pirólisis lenta, rápida, ultrarrápida y gasificación. Estos procesos varían según la temperatura, el tiempo de residencia y la presencia de oxígeno. En el pirólisis lento, el calentamiento es lento (0.1 a 2 °C por segundo), con temperaturas de alrededor de 500 °C y largos tiempos de residencia, lo que produce un alto rendimiento de biochar. El pirólisis rápido, a temperaturas superiores a 550 °C y calentamiento rápido, genera más líquidos que carbón. En el pirólisis ultrarrápido, con temperaturas moderadas (400-600 °C) y un calentamiento muy rápido, se produce menos alquitrán y gas. Este proceso de pirólisis, que descompone materiales orgánicos en ausencia parcial de oxígeno, conserva más carbono y emite menos CO₂ que la combustión total (Escalante et al, 2016).

Pentón-Fernández et al. (2021) señalan que en Cuba el biochar utilizado para la recuperación de suelos y la fertilización orgánica se obtiene a través del pirólisis de biomasa leñosa proveniente de residuos vegetales y podas, sin recurrir a la plantación de árboles o arbustos específicamente destinados a este fin, con el objetivo de no perjudicar el ecosistema, y una vez producido, se enriquece con nutrientes antes de ser aplicado (figura 1.4). La imagen ilustra un esquema de un sistema diversificado de agricultura y ganadería basado en reciclaje, en el que varios elementos interactúan para producir

bioabonos. Las plantas juegan un papel clave, ya que están conectadas a diferentes fuentes de residuos como bagazo de caña, residuos de poda, ramas, compost, y el uso de un biodigestor para procesar los residuos orgánicos de animales como vacunos, ovinos, porcinos y B. Moris. Estos materiales se combinan con productos como el IHPLUS®BF y el carbón pirolizado (biochar), que se enriquecen con nutrientes como el suelo rocoso y polvo de rocas. Todos estos componentes trabajan en conjunto para producir bioabonos, un proceso que destaca la integración entre agricultura, ganadería y reciclaje, mejorando la calidad del suelo y favoreciendo un enfoque sostenible y ecológico.

Figura 1.4.

Esquema del reciclaje de residuos y nutrientes en la Estación Experimental de Pastos y Forrajes Indio Hatuey (EPPFIH).



Nota. Sistema diversificados agricultura-ganadería, obtenido de: (Pentón-Fernández et al., 2021, p. 14)

Pentón-Fernández et al. (2021) realizan el siguiente proceso de la elaboración de biochar en tres fases de la siguiente manera:

Fase I. Elaboración

1. Se abre en el suelo un cono con 63° de inclinación; 1.50 m de diámetro y 1 m de altura.
2. Las ramas de la biomasa leñosa deben ser cortadas con un largo de 60-70 cm diámetros no superior a 5-7 cm.
3. Se ubican en el fondo del cono las partes más gruesas y se colocan las pilas unidas y de forma cruzada para que penetre el aire, cuando se tenga $\frac{1}{4}$ del cono con biomasa.
4. Se prende fuego a partir de depositar hierba seca encima de las ramas, cuando esté bien encendido se comienza a alimentarlo hasta una altura de 1.30 m.
5. El proceso está concluido cuando el color de los carbones es blanco-cenizo.

Fase II. Procesamiento

6. 20 min antes de concluir el quemado se comienza a poner agua con una manguera, por un lado.
7. Se deja en agua durante 24 horas, se saca y se pone a la sombra a escurrir.
8. A las 72 horas se tritura y está listo para enriquecerlo con un nutriente.
9. Si el nutriente es líquido (microorganismos, lactofermentos o estiércol de vaca) se embebe durante 24 horas y se aplica de inmediato que se saca de los recipientes. El carboncillo es un vehículo que se puede cargar debido a la gran porosidad que posee (fig. 1.5. Fase II)
10. En el caso de emplearlo con sólidos se mezcla en una proporción de 25-75 % biochar-compost, tierra o abonos.

Fase III. Utilización - aplicación

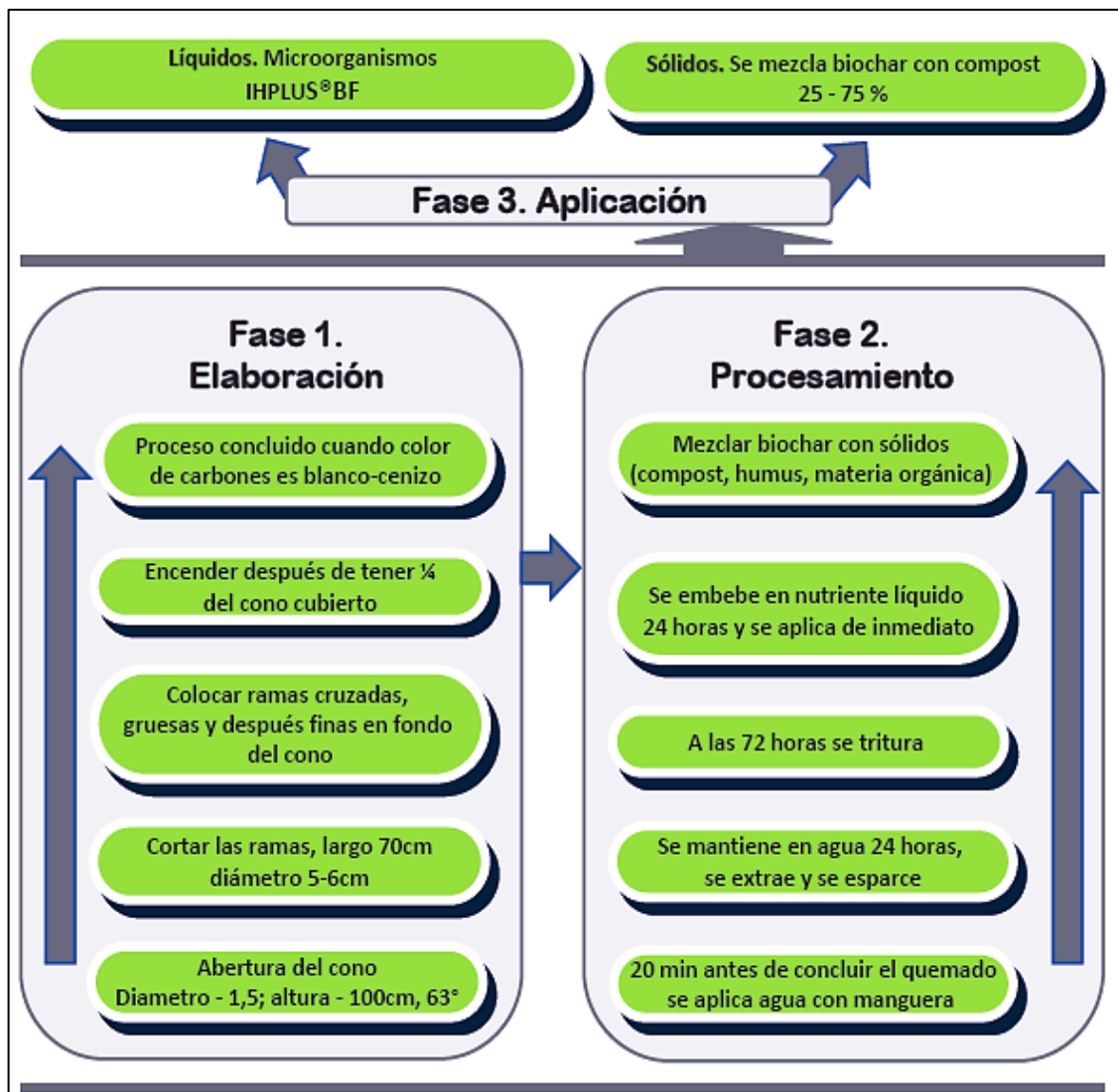
En líquido. En la actualidad los mejores resultados se obtienen con la aplicación inmediata cuando se sumerge el carboncillo en una cantidad de microorganismos

nativos.

En sólido. Se refiere a la mezcla del biochar con sustratos nutritivos orgánicos: compost, humus, excreta animal y fertilizantes, en proporción 25-75%. La aplicación del bioabono obtenido será a razón de 6 a 10 t/ha/año, en dependencia de las características del suelo y exigencias de los cultivos (pp.15-16).

Figura 1.5.

Resumen del proceso de elaboración de biochar



Nota. Resumen de tres fases; Fase 1) Elaboración, Fase 2) Procesamiento Fase 3) Aplicación. obtenido de: (Pentón-Fernández et al., 2021, p. 14).

1.9.5. Efectos del biochar en el suelo

Biochar en las propiedades físicas del suelo

La adición de biocarbón al suelo puede modificar sus propiedades físicas, como la textura, estructura, distribución del tamaño de poros, área superficial total y densidad aparente, lo que influye en la aireación, capacidad de retención de humedad, crecimiento de las plantas y facilidad para labrar el suelo. En algunos casos, las partículas de biocarbón son muy pequeñas pueden obstruir parcial o totalmente los poros del suelo, afectando su estructura y reduciendo la infiltración de agua (Downie et al., 2009, citado en Escalante et al., 2016). Generalmente, el biocarbón aumenta la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo, lo que mejora la retención de NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} , probablemente debido a su alta superficie específica, carga superficial negativa y alta densidad de carga, características que no se abordan con frecuencia en los estudios sobre biochar (Escalante et al., 2016).

El uso de biocarbón en rotación de arroz y colza. Se observó que 15 t ha^{-1} de biocarbón mejoraron el pH, carbono orgánico, y rendimiento de los cultivos, con un aumento del 22% en arroz y 21% en colza. Dosis mayores a 30 t ha^{-1} fueron ineficaces y redujeron la absorción de nutrientes y rendimiento (Khan et al., 2024). La aplicación de biocarbón (3 t/ha) junto con estiércol y vermicompost mejoró la estabilidad de los agregados del suelo, la humedad del suelo y la tasa de infiltración, incrementando la eficiencia en el uso del agua en un 20.8%. Además, se observó un aumento del 30.9% en el rendimiento de rábano y un beneficio económico significativo (Sharma, 2025). El biocarbón al 3% (p/p) redujo el antimonio (Sb) soluble en el suelo y aumentó los elementos potencialmente tóxicos (PTE) residuales. Mejoró la α -diversidad de la comunidad bacteriana del suelo y su actividad. Aumentó la biomasa de los brotes y el número de semillas de las plantas de cáñamo. Promovió la fitoestabilización de cadmio (Cd), plomo (Pb) y zinc (Zn) en las raíces del cáñamo, y estimuló la acumulación de Sb y PTE en los brotes (Garau et al., 2024). El pirólisis de residuos, como las cáscaras de yuca, produce biocarbón con alta porosidad y grupos funcionales hidrófilos que mejoran la retención de agua y nutrientes en el suelo. El biocarbón contiene nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo, potasio y calcio, y está compuesto principalmente de calcita, lo que favorece la fertilidad del suelo. Por lo tanto, este biocarbón es adecuado para aplicaciones agronómicas a gran

escala (Hamissou et al., 2023).

Biochar en las propiedades químicas del suelo

Soto Muñoz et al. (2023) mencionan que el impacto beneficioso del biochar en el suelo se atribuye a su alta porosidad y capacidad de adsorción, su potencial redox (capacidad reductora u oxidativa), su capacidad de encalado, y su influencia en el microbiota y la estructura del suelo, este efecto varía según el tipo de suelo, la clase y dosis de biocarbón, así como el tiempo que permanece en el suelo.

La adición de biocarbón aumentó el pH del suelo entre 0.5 y 1 unidad con una tasa de incorporación del 1% y entre 1 y 2 unidades con una tasa del 3% a los 180 días de incubación, el biocarbón de estiércol porcino mostró el mayor efecto sobre el pH, mientras que el de paja de caña tuvo el menor impacto, los cambios en el pH fueron influenciados principalmente por la alcalinidad del biocarbón y la nitrificación del nitrógeno en los suelos, con efectos variables dependiendo del tipo de suelo y biocarbón utilizado (Dai et al., 2014). El aumento de nutrientes en suelos tratados con biocarbón se debe a tres factores principales: a) los nutrientes que el biocarbón mismo suministra, como fósforo (P), potasio(K) y zinc (Zn); b) su capacidad mejorada para conservar los nutrientes; y c) los cambios en la actividad microbiana del suelo (Lehmann & Rondon, 2006, citado en Soto Muñoz et al., 2023). La aplicación de biocarbón de bambú de 20 t ha⁻¹ en el cultivo de caña de azúcar mejoró las propiedades físicas y químicas del suelo, ya que aumentó la capacidad de campo, el punto de marchitez permanente, la humedad, el pH, la capacidad de intercambio catiónico e incrementa la disponibilidad de nutrimentos lo que beneficia el crecimiento del cultivo (Orozco et al., 2021). La adición de biocarbón de cáscaras de maní y paja de maíz en una proporción 1:3 elevó significativamente el pH y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo, redujo la disponibilidad de cadmio (Cd) en la rizosfera, transfiriéndolo a la fracción residual, esto resultó en una disminución de la concentración de Cd en los tejidos del arroz entre un 30,0% y un 49,4%, mejorando el rendimiento y reduciendo la acumulación de Cd en las plantas (Xu et al., 2024).

Biochar en las propiedades biológicas del suelo

Estudios realizados demuestran que el biochar influye positivamente en el desarrollo de

las plantas al mejorar las propiedades biológicas del suelo y fomentar la relación simbiótica entre los microorganismos de la rizosfera, como las micorrizas y rizobacterias. Actúa como un microhábitat para los microorganismos, promoviendo su diversidad y protección frente a desecación y depredación, además el biochar puede modificar el pH del suelo, mejorar la disponibilidad de compuestos beneficiosos y reducir compuestos tóxicos al adsorber metales pesados y sustancias orgánicas, esto se debe a su alta cantidad de grupos funcionales con carga negativa, que interactúan con contaminantes, y a su alta porosidad, que altera las interacciones entre la biota del suelo y las moléculas de señalización (Melo-Lozano & Afanasjeva, 2023).

El biocarbón de paja de trigo, preparado a 300 °C y en dosis de 0.0, 0.2, 0.5, 1.0 y 2.0 %, junto con la adición de nutrientes, incrementó tanto la cantidad como la actividad de los microorganismos del suelo (Mierzwa-Hersztek et al., 2020). Biocarbón de paja de algodón, en dosis: 0.0, 2.25 o 4.5 t/ha. a aplicación de biocarbón (0.2-2%) aumentó el carbono orgánico del suelo (COS) en las capas de 0-20 cm (10.7%) y 20-40 cm (24.9%); además, redujo la mineralización en todas las profundidades, con una disminución del 30.5% en la capa de 40-60 cm, la actividad microbiana también mejoró, con un aumento en los oligótrofos y una restricción de los copiótrofos, especialmente en las capas superficiales del suelo (Ma et al., 2023). Según algunos estudios, el biocarbón puede servir como un portador para microorganismos, lo que favorece el aumento de la población de hongos micorrícicos y mejora la retención de nitrógeno en el suelo (Amonnette, 2009 citado en Lu, 2021).

1.10. DIATOMITAS O TIERRA DE DIATOMEA

1.10.1. Origen

La tierra de diatomeas es un tipo de depósito geológico formado por los restos fosilizados de diversas especies de organismos unicelulares de estructura silíceo, tanto marinos (agua salada) como de agua dulce, especialmente diatomeas y otras algas. Gran parte de estos sedimentos fosilizados se generaron hace más de 20 millones de años, durante los períodos Eoceno y Mioceno, en antiguos lagos y mares (Korunic, 1998). La tierra de diatomeas es un material en polvo compuesto por los esqueletos fosilizados de diverso fitoplancton, especialmente diatomeas y otras especies de algas, que se acumulan a lo

largo de millones de años. Durante el proceso de sedimentación, las frústulas de las células de diatomeas se disuelven completamente al descender desde la superficie hasta el fondo del océano (Ikusika et al., 2019). Las frústulas están principalmente formadas por dióxido de silicio (SiO_2), que se presenta en formas de cuarzo y opalina, con pequeñas cantidades de óxido de hierro (Fe_2O_3) y óxido de aluminio (Al_2O_3), los cuales constituyen la mayor parte de los silicatos (Saeai et al., (2021, citado en Dhanker et al., 2024). La tierra de diatomeas de alta pureza es generalmente blanca, aunque su color puede variar dependiendo de la naturaleza y la cantidad de impurezas que contenga. Además, los silicatos representan el 25.5 % de la corteza terrestre, acompañados por un 49.4 % de oxígeno. En los organismos, el contenido de silicio varía considerablemente, siendo del 5 % en las diatomeas (peso seco) y de menos del 0.001 % en algunos vertebrados. De los 25 elementos esenciales para diversos organismos, el silicio ha sido especialmente estudiado debido a su posición en la tabla periódica, justo debajo del carbono (Sarai et al., 2021).

1.10.2. Propiedades físicas y químicas

Propiedades físicas

La diatomita se encuentra ampliamente distribuida en diversas regiones del planeta y se destaca por sus propiedades físicas singulares. Entre las características más notables de este material se incluyen su elevada permeabilidad, que varía entre 0.1 y 10 mD, y una considerable porosidad, que oscila entre el 35% y el 65% (Murer et al., 2000). Además, presenta un tamaño de partícula pequeño, baja conductividad térmica y densidad (Hassan et al., 1999), lo que la hace ideal para aplicaciones que requieren materiales livianos con baja transferencia de calor. Por otro lado, su alta área superficial la convierte en un excelente adsorbente en una variedad de procesos industriales (Gao et al., 2005). Las características superficiales de la diatomita, como su hidrofobicidad, solubilidad, carga, acidez, capacidad de intercambio iónico y adsorción, están fuertemente influenciadas por la presencia de agua. Esta agua está parcialmente integrada en la estructura cristalina de la diatomita, lo que da lugar a la formación de grupos hidroxilo activos (Yuan et al., 1997).

De acuerdo con Reka et al., (2021), afirman que diatomita es generalmente una roca sedimentaria de naturaleza silícea, caracterizada por su textura blanda, friable, de grano

fino y débilmente cementada. Es un material poroso y liviano. Entre sus otras propiedades destacadas se incluyen una baja densidad aparente, baja conductividad térmica, reactividad química casi nula con la mayoría de líquidos y gases, y baja solubilidad en agua. Estas cualidades convierten a la diatomita en un material natural muy atractivo, con características notables como alta permeabilidad, elevada porosidad y gran área superficial. Su color puede variar entre blanco, gris amarillento, gris oscuro y gris parduzco, dependiendo de la cantidad de impurezas presentes como se muestra en la figura 1.6.

Figura 1.6.

Característica de la tierra de diatomea de color blanco



Nota. obtenido de <https://www.mindat.org/photo-638347.html>

Propiedades químicas

Según Reka et al. (2021), los estudios sobre la Diatomea indican que esta presenta una composición química de roca ácida, con un alto contenido de SiO_2 (86.03 %), mientras que los niveles de Al_2O_3 (3.01 %) y Fe_2O_3 (2.89 %) son relativamente bajos. Los demás óxidos presentes en el material se encuentran en concentraciones inferiores al 1.0 %. Al analizarse sin la presencia de materia orgánica, muestran un contenido de sílice (SiO_2) que generalmente varía entre el 80 % y el 90 %, aunque se han identificado concentraciones de hasta el 97 %. En cuanto a los demás elementos, como hierro, calcio,

aluminio, titanio, sodio y potasio, se encuentran en menores cantidades, normalmente por debajo del 1 % (Breese, 1994 como se cito en Ediz et al., 2010).

Ramírez (2010) señala que en el Perú, la diatomita proviene de un origen marino en las regiones de Piura e Ica, y de un origen lacustre en Ayacucho (Quicapata y Tambillo), Arequipa y Tacna. En su estudio, también se presenta la composición química de las diatomitas de varios yacimientos peruanos, la cual se detalla en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1.

Composicion quimicas de diatomita en algunos yacimientos del Perú

Yacimiento	Lacustre			Marino	
Región	Arequipa	Ayacucho	Tacna	Piura	Ica
SiO ₂ (%)	84.89	85.78	68.00	65.50	73.80
Al ₂ O ₃ (%)	2.62	2.71	8.15	2.00	9.70
Fe ₂ O ₃ (%)	1.04	1.22	3.00	1.30	3.00
CaO (%)	0.94	0.64	2.00	9.60	2.90
MnO (%)	0.03	0.01	0.56	-	-
MgO (%)	0.50	0.55	2.57	3.30	1.20
TiO ₂ (%)	-	0.14	0.31	-	-
Na ₂ O (%)	0.92	0.26	1.38	1.90	1.80
P ₂ O ₅ (%)	0.01	0.02	0.33	-	-
K ₂ O (%)	0.58	0.39	1.45	0.50	1.30
PXC (%)	7.34	8.29	11.20	14.75	4.66

Nota. PXC: perdida por calcinación, obtenido de Ramírez (2010)

1.9.3. Importancia y aplicaciones de la Tierra de Diatomeas

Amplia gama de aplicaciones industriales de la tierra de diatomeas

La diatomita tiene una amplia gama de aplicaciones, incluyendo su uso en la fabricación de materiales para el control de la humedad, sistemas de filtración, y como materia prima

en la producción de cemento. Además, se utiliza como base para la fabricación de portadores de fármacos de liberación prolongada, y como material para sorción, desorción y absorción en procesos industriales. También se emplea en la producción de cerámicas porosas, en la industria del vidrio, y como soporte para catalizadores. Otros usos incluyen su incorporación como relleno en pinturas y plásticos, en la purificación de aguas industriales, como material puzolánico, portador de pesticidas, y en la mejora de las propiedades físicas y químicas de algunos suelos Reka et al. (2021).

Eficacia en el control de plagas

Zeni et al., (2021) manifiesta que la tierra de diatomea al ser un polvo inerte de origen natural de roca sedimentaria silíceo blanda compuesto por los exoesqueletos fosilizados de algas unicelulares, se han destacado como una opción prometedora para controlar una amplia variedad de plagas de artrópodos. Utilizadas principalmente en el control de plagas de productos almacenados, también han mostrado efectividad contra insectos domésticos como las chinches de cama y algunos insectos agrícolas en ambientes secos. Este enfoque ecológico se está consolidando como una alternativa viable frente a los insecticidas sintéticos, contribuyendo al control de plagas de manera más sostenible.

Beneficios en la agricultura y ganadería

La tierra de diatomeas es un mineral de origen vegetal con múltiples aplicaciones en la agricultura, actuando como fertilizante e insecticida natural. Contiene casi 40 minerales y oligoelementos, destacándose el silicio, que ayuda a las plantas a tolerar estrés ambiental, como temperaturas extremas, sequía o metales pesados, y mejora la calidad del suelo. Como insecticida, su acción es física: sus microcristales de silicio perforan el exoesqueleto de insectos, causando su deshidratación, lo que evita la generación de resistencia en las plagas. La tierra de diatomeas también se usa en ganadería para eliminar plagas sin dejar residuos tóxicos, siendo un suplemento nutricional que mejora la asimilación de alimentos y combate parásitos intestinales. Este recurso natural promete ser una alternativa ecológica a los agroquímicos tradicionales, con aplicaciones emergentes en biotecnología y medicina complementaria (Agrotendencia TV, 2022).

Impacto en la calidad del suelo

La tierra de diatomea ofrece importantes beneficios para el suelo, ya que no solo

proporciona nutrientes esenciales como calcio y silicio, sino que también mejora el intercambio catiónico, lo que facilita la absorción de nutrientes por parte de las plantas. Contribuye a mejorar la aireación, la esponjosidad y la retención de agua del suelo, creando un ambiente más favorable para el desarrollo de las raíces. Aunque los suelos de cultivo ya contienen macronutrientes, la presencia de micronutrientes es crucial para que las plantas puedan asimilarlos adecuadamente. En este sentido, las tierras de diatomeas aportan micronutrientes clave, lo que mejora la asimilación de elementos esenciales como fósforo, nitrógeno y potasio, favoreciendo así el crecimiento saludable de las plantas (EcologíaVerde, 2024).

Eficiencia como Biocida

La tierra de diatomeas actúa como biocida debido a su mecanismo físico de acción, no por envenenamiento químico. Su efecto sobre los insectos se basa en la deshidratación, ya que los bordes afilados de los cristales de sílice de las diatomeas desgastan o perforan la capa externa de los insectos, lo que les impide conservar agua y provoca su desecación y muerte. A diferencia de otros insecticidas que generan resistencia a través de procesos químicos, la tierra de diatomeas no induce tal fenómeno, lo que la convierte en una opción sostenible para el control de plagas. Además, debido a su naturaleza física, la tierra de diatomeas es segura para los seres humanos y mamíferos en las concentraciones empleadas para su eficacia contra los insectos. Este perfil la hace ideal para su aplicación en la agricultura, no solo en la protección de cultivos, sino también en el control de plagas en espacios interiores, exteriores y en granjas, así como en el tratamiento de parásitos en animales domésticos (SEMBRALIA, 2020)

1.10. SILICIO

Castellanos et al. (2015) manifiestan que el silicio (Si) es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre, constituyendo alrededor del 28%, y se encuentra principalmente en formas combinadas, como la sílice y los minerales siliconados. Los silicatos son compuestos en los que el silicio se combina con oxígeno y otros elementos como aluminio, magnesio, calcio, sodio, hierro y potasio, y forman más del 95% de las rocas terrestres, meteoritos, aguas y la atmósfera. En el suelo, el silicio se presenta principalmente como ácido monosilícico (Si(OH)_4), que es fácilmente asimilable por las

plantas, aunque en suelos tropicales, debido a procesos de intemperización y lixiviación, se encuentran formas de silicio no disponibles para las plantas, como el cuarzo y el ópalo.

1.10.1. Importancia de silicio en suelo-planta

Baglione (2011) manifiesta que en condiciones de campo algunos beneficios de la aplicación de silicio son los siguientes:

- Incrementa la productividad y la calidad de las cosechas agrícolas. Restaura el suelo de la degradación e incrementa su nivel de fertilidad para la producción agrícola.
- Incrementa la resistencia del suelo contra la erosión del viento y el agua, y a las sequías.
- Neutraliza la toxicidad del aluminio (Al) en suelos ácidos.
- Tiene acción sinérgica con calcio (Ca) y magnesio (Mg).
- Reduce la lixiviación de fósforo (P), nitrógeno (N) y potasio (K) en las áreas de cultivo agrícola.
- Aumenta la resistencia de la planta a plagas y enfermedades.
- Protege las plantas contra el ataque de enfermedades, hongos e insectos.
- Mejora el empleo de biosólidos.
- Mejora la absorción de fósforo e incrementa la eficiencia de la roca fosfórica.
- Restaura áreas contaminadas por metales pesados e hidrocarburos.
- Fortalece el poder oxidante en las raíces del arroz.
- Promueve una mayor tasa de fotosíntesis (p, 33)

1.10.2. Papel del Silicio en la defensa de plagas y enfermedades en las plantas

Silicio en las interacciones planta-insecto

Vieira et al. (2008) manifiestan que el silicio (Si) desempeña un papel importante en la mejora de la resistencia de las plantas frente al ataque de insectos, lo cual se debe en parte a su acumulación y polimerización en las paredes celulares, formando una barrera mecánica. No obstante, se ha comprobado que el tratamiento de las plantas con Si también induce cambios bioquímicos, como el aumento de compuestos fenólicos, lignina y fitoalexinas. En especies como la calabaza (*Cucurbita sp.*), la avena (*Avena sativa* L.) y

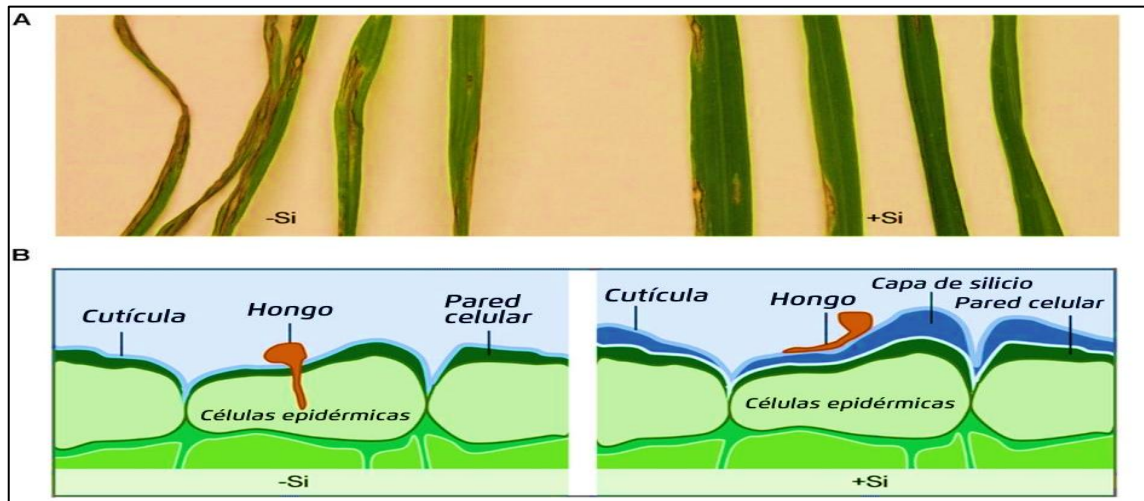
el sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench), se ha observado que la aplicación de silicio (Si) induce un aumento en la actividad de enzimas como peroxidasa, polifenoloxidasas, glucanasa y quitinasa. Estas enzimas están asociadas con un incremento en la producción de quinonas, compuestos con propiedades antibióticas, que favorecen una mayor lignificación de los tejidos, reducen la calidad nutricional y la digestibilidad, lo que a su vez disminuye la preferencia de los insectos por estas plantas (Gomes et al., 2005).

Silicio en las interacciones planta-patógeno

Wang et al.(2017) manifiesta tras revisiones científicas que el silicio (Si) incrementa la resistencia de las plantas al reforzar las células epidérmicas, lo que se traduce en una mayor densidad de células silicificadas, una capa más gruesa de sílice bajo la cutícula, una doble capa cuticular, un engrosamiento de la membrana Si-celulosa, y la formación de papilas, el silicio se acumula en las células vegetales y se deposita debajo de la cutícula, donde forma una capa adicional que actúa como una barrera protectora contra los patógenos, reduciendo así la incidencia de enfermedades. Esta acumulación de Si en las paredes celulares, principalmente asociada a la hemicelulosa, mejora las propiedades mecánicas de las células y favorece su regeneración. Además, el Si contribuye a la rigidez y elasticidad de la pared celular, especialmente durante el crecimiento, al interactuar con componentes como pectinas y polifenoles. En cultivos como el arroz figura (1.7), la presencia de Si en las paredes celulares ayuda a reducir la gravedad de enfermedades como el blasto, al reforzar la estructura epidérmica y dificultar la penetración de los patógenos. La aplicación de Si ha demostrado restringir la invasión de patógenos en plantas como el trigo y el arroz, donde reduce la colonización fúngica y la formación de lesiones en las hojas, lo que sugiere que el Si favorece la prevención y el retraso de la penetración de los patógenos.

Figura 1.7.

Mecanismos de resistencia en la interacción silicio-patogeno



Nota. (A) Síntomas de añublo foliar en arroz tras la inoculación con *Magnaporthe grisea* durante 10 días (Sun et al., 2010). Las plantas de arroz se trataron continuamente con (+Si) o sin silicio (-Si). (B) La capa de sílice se formó en la pared celular de las plantas tratadas con Si, lo que mejoró su resistencia a la infección por hongos mediante barreras físicas.

El silicio desempeña un papel crucial en la resistencia de las plantas contra enfermedades al actuar en múltiples niveles. Esta revisión por Wang et al. (2017) resume los mecanismos físicos, bioquímicos y moleculares figuras (1.8) implicados en las respuestas de defensa mediadas por silicio de la siguiente manera:

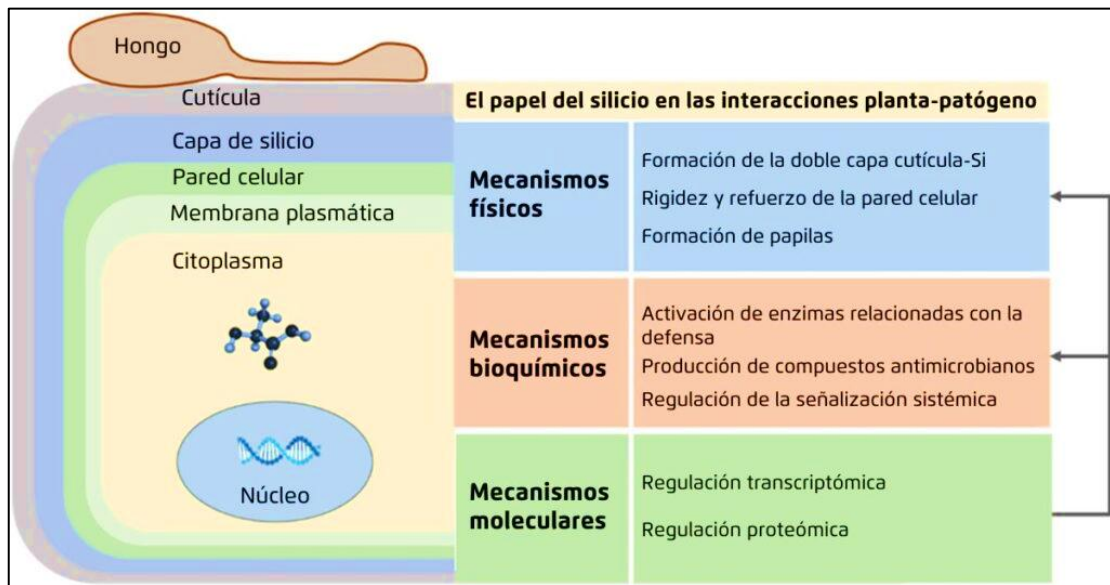
Mecanismos físicos: El silicio (Si) forma barreras de defensa en la planta, como la cera, la cutícula y la pared celular, las cuales actúan como protección antes y después de la infección por patógenos.

Mecanismos bioquímicos: El Si activa enzimas defensivas y estimula la producción de compuestos antimicrobianos, fortaleciendo la respuesta de la planta frente a infecciones.

Mecanismos moleculares: A nivel molecular, el Si regula la expresión de genes involucrados en las respuestas de defensa, contribuyendo a la resistencia de la planta.

Figura 1.8.

El papel del silicio en las interacciones planta-patógeno



Nota. Las respuestas de defensa de las plantas mediadas por el Si se clasificaron como mecanismos físicos, bioquímicos y moleculares (Wang et al., 2017)

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

2.1. UBICACIÓN DEL ESTUDIO

2.1.1. Ubicación política

Departamento : Ayacucho
Provincia : Huanta
Distrito : Huamanguilla
Centro Poblado : Anexo de Tayancayocc

2.1.2. Ubicación geográfica

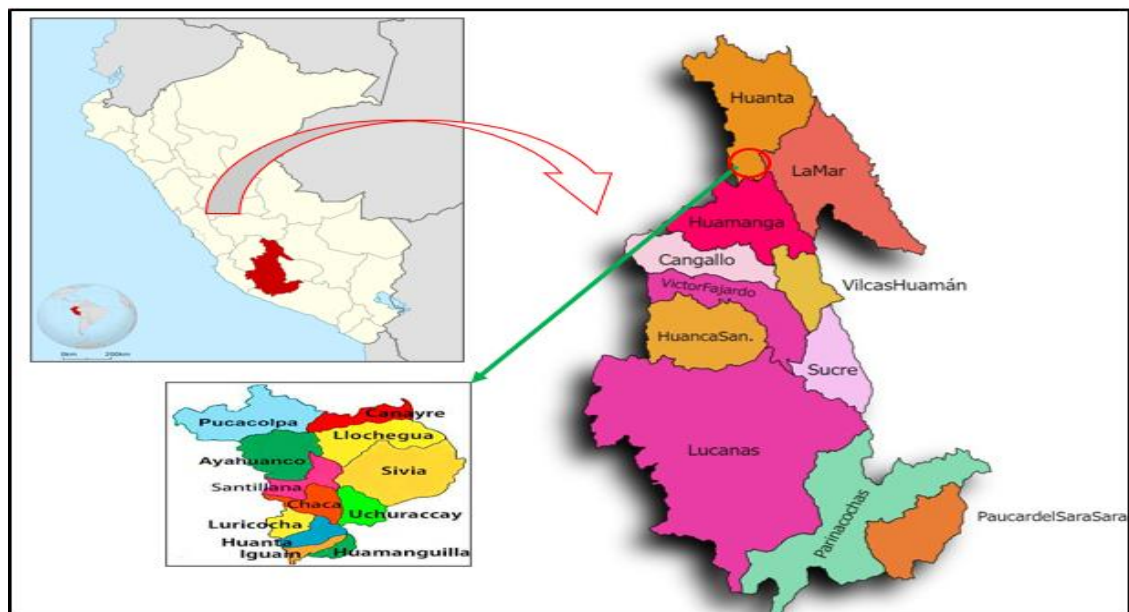
Latitud Sur : 12°59'29.97"S
Longitud Oeste : 74° 9'55.60"O
Altitud : 3458 m.s.n.m.
Zona de vida : Bosque húmedo montano bajo tropical (bh-MBT)

2.1.3. Ubicación ecológica

Según la clasificación bioclimática de zonas de vida propuesta por Holdridge el distrito de Huamanguilla, específicamente en el anexo de Tayancayocc, se encuentra dentro de la zona de vida correspondiente al bosque húmedo montano bajo tropical (bh-MBT).

Figura 2.1.

Mapa de ubicación geográfica del experimento



Nota. obtenido de: <https://www.familysearch.org/es/wiki/Ayacucho, Per%C3%BA - Genealog%C3%AD>

Figura 2.2.

Mapa de ubicación de la parcela experimental ubicado en el anexo de Tayancayocc, Huamanguilla- Huanta, Ayacucho.



Nota. Información obtenida en Google maps.

2.2. ANTECEDENTES DEL TERRENO

En la campaña anterior la parcela experimental estuvo sembrada con cultivo de papa

2.3. CONDICIONES CLIMÁTICAS

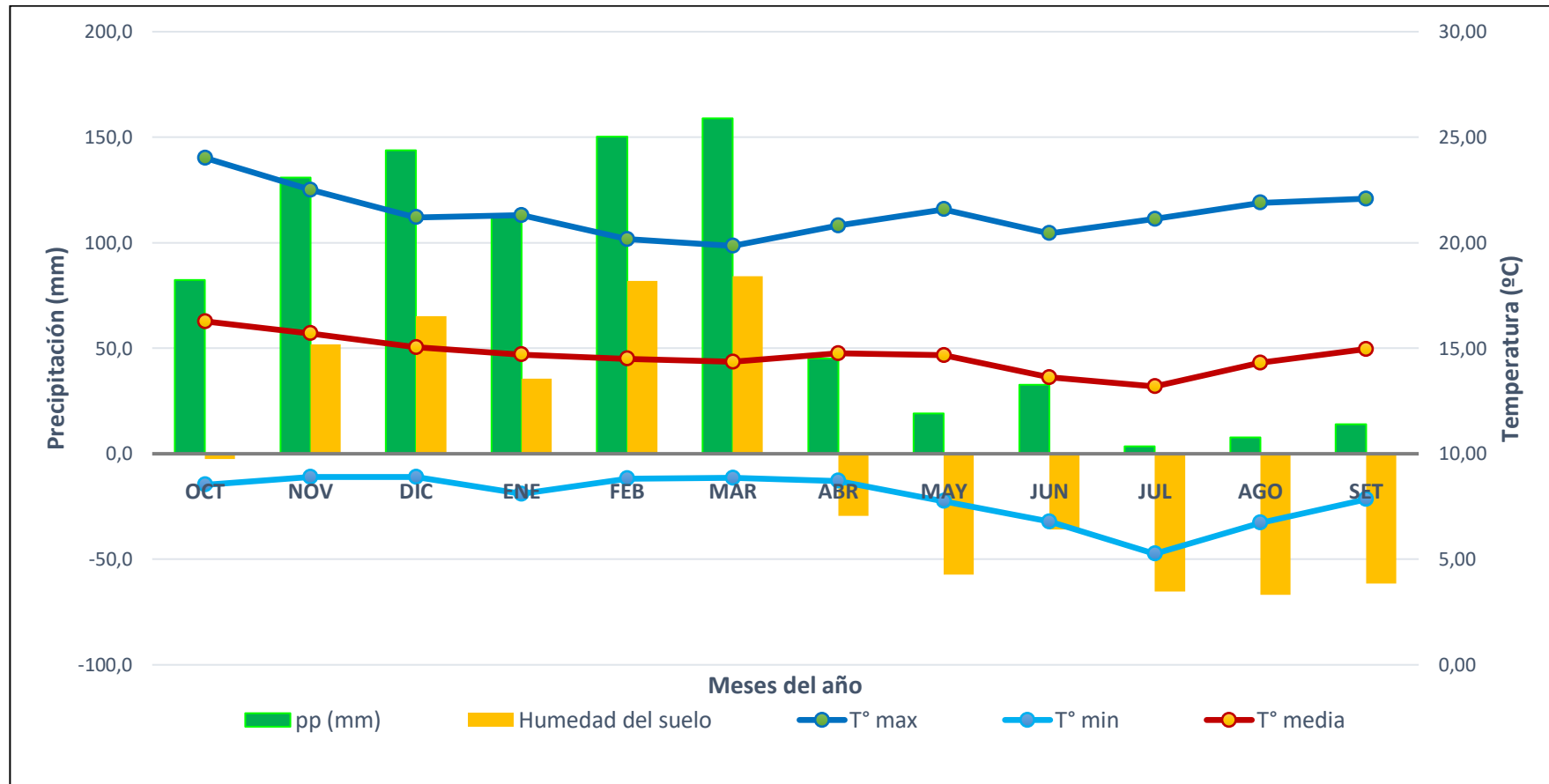
Tabla 2.1.

Promedio de variables climáticas – Estación San Pedro de Cachi (2024–2025)

ESTACIÓN : SAN PEDRO DE CACHI		DISTRITO : SANTIAGO DE PISCHA		ALTITUD : 3247 msnm		PROVINCIA : HUAMANGA		LATITUD : 13° 5' 14.72" S		DEPARTAMENTO : AYACUCHO		LONGITUD : 74° 23' 26.4" W	
DESCRIPCIÓN	UNID	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET
Días		31	30	31	31	28	31	30	31	30	31	31	30
T° máx. Media mensual	°C	24.02	22.50	21.20	21.30	20.17	19.85	20.81	21.58	20.45	21.12	21.89	22.08
T° min. Media mensual	°C	8.53	8.90	8.90	8.10	8.82	8.86	8.71	7.75	6.79	5.26	6.73	7.84
T° media mensual	°C	16.28	15.70	15.05	14.70	14.50	14.36	14.76	14.67	13.62	13.19	14.31	14.96
Factor de multiplicación		4.96	4.80	4.96	4.96	4.48	4.96	4.80	4.96	4.80	4.96	4.96	4.80
ETP	mm	80.72	75.36	74.65	72.91	64.94	71.20	70.85	72.74	65.38	65.42	70.98	71.81
Precipitación	mm	82.3	131.0	143.7	112.3	150.2	159.0	45.1	19.1	32.8	3.5	7.7	14.0
ETP ajustado	mm	84.84	79.21	78.46	76.63	68.25	74.84	74.46	76.45	68.71	68.76	74.60	75.47
Humedad del suelo	mm	-2.54	51.79	65.24	35.67	81.95	84.16	-29.36	-57.35	-35.91	-65.26	-66.90	-61.47
Exceso	mm	-2.54	51.79	65.24									-61.47
Déficit	mm				35.67	81.95	84.16	-29.36	-57.35	-35.91	-65.26	-66.90	

Figura 2.2.

Climograma de referencia para Huamanguilla (anexo Tayancayocc) con la estación San Pedro de Cachi (2024–2025)



En la tabla 2.1. se muestra el análisis de la información climática de la Estación San Pedro de Cachi. El cultivo de haba en vaina verde se condujo desde octubre de 2024 hasta abril del 2025, periodo que coincide con la estación de lluvias en la región altoandina de Ayacucho. En relación con la temperatura, las máximas medias mensuales fluctuaron entre 19.85 °C (marzo) y 24.02 °C (octubre), mientras que las mínimas variaron entre 7.75 °C (abril) y 8.90 °C (noviembre y diciembre). La temperatura media mensual se mantuvo entre 14.36 °C (marzo) y 16.28 °C (octubre); este rango térmico se encuentra dentro de los valores óptimos reportados para *Vicia faba* L., cuyo desarrollo es favorable con temperaturas medias entre 10 y 20 °C. Asimismo, no se registraron temperaturas mínimas críticas (< 4 °C), lo que indica la ausencia de heladas durante el ciclo, especialmente importante durante la floración (enero-febrero). Respecto a la disponibilidad hídrica, se registraron precipitaciones elevadas entre octubre y marzo, con valores que oscilaron entre 82.3 mm (octubre) y 159.0 mm (marzo). En abril, la precipitación descendió a 45.1 mm, lo cual coincide con la etapa final del cultivo. Este patrón de lluvias satisface los requerimientos hídricos del cultivo, especialmente durante el crecimiento vegetativo (noviembre-enero) y la floración-formación de vainas (enero-marzo). La evapotranspiración potencial (ETP) entre octubre y abril varió entre 64.94 y 80.72 mm, manteniéndose por debajo de la precipitación de octubre a marzo, lo que generó excedentes de humedad del suelo (51.79-65.24 mm). Estas condiciones favorecieron procesos fisiológicos claves, como la expansión foliar y el llenado de vainas.

2.4. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO

Se recolectaron muestras de suelo a una profundidad de 20 cm en distintos puntos de la parcela experimental, siguiendo los protocolos establecidos para el muestreo. Las submuestras obtenidas fueron mezcladas cuidadosamente y luego divididas en cuatro partes iguales, con el propósito de conformar una muestra representativa de 1 kilogramo. Esta muestra fue enviada al laboratorio MULTISERVICIOS AGROLAB-AYACUCHO para su análisis de caracterización, cuyos resultados e interpretación se presentan en la tabla 2.2.

Tabla 2.2.*Análisis de caracterización e interpretación de los resultados del suelo*

Parámetro	Unidad	Resultado	Interpretación
Arena	%	36	
Limo	%	27	Franco arcilloso
Arcilla	%	37	
Materia orgánica	%	4.11	Alto
pH (1:1)	Unidades de pH	5.15	Fuertemente ácido
C.E.	dS m ⁻¹	0.17	No salino
Carbonatos CaCO ₃	%	0	Muy bajo
Nitrógeno total (Nt)	%	0.21	Alto
Fosforo disponible (P)	ppm	38	Muy alto
Potasio disponible (K)	ppm	85	Medio
C.I.C.	Cmol (+).kg ⁻¹	15.21	Medio
Ca ⁺⁺	Cmol (+).kg ⁻¹	6.21	medio
Mg ⁺⁺	Cmol (+).kg ⁻¹	1.30	medio
K ⁺	Cmol (+).kg ⁻¹	0.24	bajo
Na ⁺	Cmol (+).kg ⁻¹	0.34	bajo
Al ⁺³ + H ⁺	Cmol (+).kg ⁻¹	0.84	Muy alto,
Sat. Bases	%	53	Medio
Ca ⁺² /K ⁺	-	26.33	Desequilibrio
Ca ⁺² /Mg ⁺²	-	4.78	Desequilibrio
Mg ⁺² /K ⁺	-	5.51	Desequilibrio

Nota: Reporte de caracterización de análisis de suelo, por el laboratorio Multiservicios Agrolab - Ayacucho**2.4.1. Interpretación del análisis del suelo**

El suelo destinado al cultivo de haba presentó una textura franco arcillosa, determinada por 36 % de arena, 27 % de limo y 37 % de arcilla, condición que favorece la retención de humedad y nutrientes, aunque requiere un manejo adecuado para evitar compactación o problemas de aireación, como se muestra en la tabla 2.2. Desde el punto de vista de la fertilidad, el contenido de materia orgánica fue alto con 4.11 %, al igual que el nitrógeno total con 0.21 % y el fósforo disponible con 38 ppm, lo que indica una buena disponibilidad inicial de nutrientes para el crecimiento vegetativo del cultivo; sin embargo, el potasio disponible se ubicó en un nivel medio con 85 ppm, por lo que podría

convertirse en un nutriente limitante durante la formación y llenado de vainas. La conductividad eléctrica fue baja, con 0.17 dS/m, lo que permite clasificar al suelo como no salino, condición favorable para el desarrollo normal de la planta. No obstante, el pH de 5.15 evidencia una reacción fuertemente ácida, considerada la principal limitación química del suelo, ya que puede afectar la disponibilidad equilibrada de nutrientes, la actividad de microorganismos benéficos y la nodulación propia de las leguminosas. Asimismo, la capacidad de intercambio catiónico fue media con 15.21 cmol(+)/kg y la saturación de bases alcanzó 53 %, lo que refleja una fertilidad moderada; sin embargo, las relaciones Ca/K, Ca/Mg y Mg/K muestran desequilibrio entre cationes, situación que puede interferir en la absorción balanceada de calcio, magnesio y potasio. En conjunto, el suelo presenta condiciones favorables para el cultivo de haba por su buen contenido de materia orgánica, nitrógeno, fósforo y ausencia de salinidad, pero también evidencia restricciones asociadas a la acidez, bajo contenido de carbonatos y desequilibrio catiónico.

2.5. MATERIALES

2.5.1. *Material genético*

El material genético utilizado correspondió a la variedad de habas denominada Quelcao o Quelcao de Anta. Este material fue sembrado y evaluado en una parcela experimental que abarcó una superficie total de 592 m², donde se llevaron a cabo las actividades de cultivo y monitoreo para el desarrollo del estudio.

2.6. FACTORES DE ESTUDIO

Factor 1: Dosis de biochar enriquecido

a₀: 0.0 t ha⁻¹

a₁: 1.0 t ha⁻¹

a₂: 2.0 t ha⁻¹

Factor 2: Dosis de biosílice

b₀: 0.0%

b₁: 0.5 % (50g)

b₂: 1.0% (100g)

b₃: 1.5% (150g)

2.7. TRATAMIENTOS

Se establecieron un total de 36 tratamientos, los cuales incluyeron la aplicación de 4 niveles diferentes de biosílice, 3 niveles de biochar enriquecido y con 3 repeticiones tal como se detalla en la tabla 2.3.

Tabla 2.3.

Codificación y descripción de los tratamientos

Tratamiento	Código	Descripción
T1	a_0*b_0	Sin biochar y sin biosílice
T2	a_0*b_1	Sin biochar, 0.5% biosílice
T3	a_0*b_2	Sin biochar, 1% biosílice
T4	a_0*b_3	Sin biochar, 1.5% biosílice
T5	a_1*b_0	1 t ha ⁻¹ de biochar, sin biosílice
T6	a_1*b_1	1 t ha ⁻¹ de biochar, 0.5% biosílice
T7	a_1*b_2	1 t ha ⁻¹ de biochar, 1% biosílice
T8	a_1*b_3	1 t ha ⁻¹ de biochar, 1.5% biosílice
T9	a_2*b_0	2 t ha ⁻¹ de biochar, sin biosílice
T10	a_2*b_1	2 t ha ⁻¹ de biochar, 0.5% biosílice
T11	a_2*b_2	2 t ha ⁻¹ de biochar, 1% biosílice
T12	a_2*b_3	2t ha ⁻¹ de biochar, 1.5% biosílice

2.8. Diseño experimental

Los tratamientos del estudio se organizaron bajo un arreglo factorial que combinó 4 niveles de biosílice, 3 niveles de biochar con 3 repeticiones, lo que resultó en un total de 36 unidades experimentales. Estas unidades se distribuyeron en el Diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA). Para el análisis de los datos, se calculó el análisis de varianza y, las diferencias significativas entre las medias de los tratamientos, se evaluaron mediante la prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$).

El modelo aditivo lineal es la siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \delta_k + \varepsilon_{ijk}$$

donde:

Y_{ijk} : Observación

μ : Media general del experimento

α_i : Efecto del i -ésimo nivel de biosilicio.

β_j : Efecto del j -ésimo nivel de biochar.

$(\alpha\beta)_{ij}$: Efecto de la interacción de biosilicio y biochar.

δ_k : Efecto del k -ésimo bloque o repetición.

ε_{ijk} : Error experimental

2.9. Descripción de la parcela experimental

Las medidas de los bloques, el área experimental, la parcela y la densidad de siembra se presentan detalladamente en la tabla 2.4.

Tabla 2.4.

Descripción y unidad de medida de la parcela experimental del anexo Tayancayoc

Descripción	Unidad	Medida
Medidas de bloques		
Repetición	unidades	3
Ancho	m	8
Largo	m	24
Área total	m ²	192
Campo experimental		
Largo	m	74
Ancho	m	8
Área total	m ²	592
Ancho entre calles	m	1
Parcela		
N° de parcelas/bloque	unidades	12
Largo de cada tratamiento	m	8
Ancho de unidad experimental	m	2
Densidad de siembra de habas		
Distancia entre surcos	m	0.50
Distancia entre golpes	m	0.30

Número de surcos por tratamiento	unidades	5
Número de surcos por bloque	unidades	60
Número de semillas por golpe	unidades	2
Número total de surcos por bloques	unidades	180

Figura 2.3.
Representación gráfica de la unidad experimental

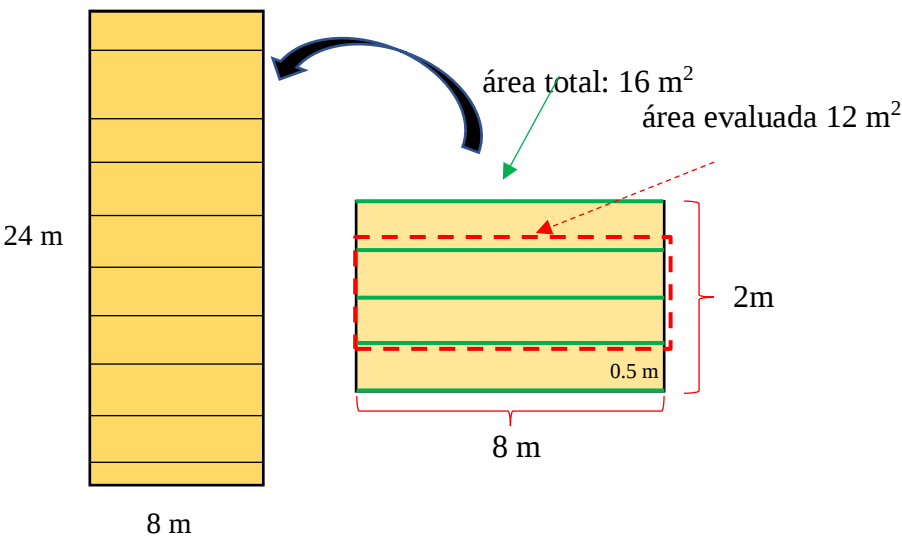


Figura 2.4.
Disposición de los bloques en el experimento

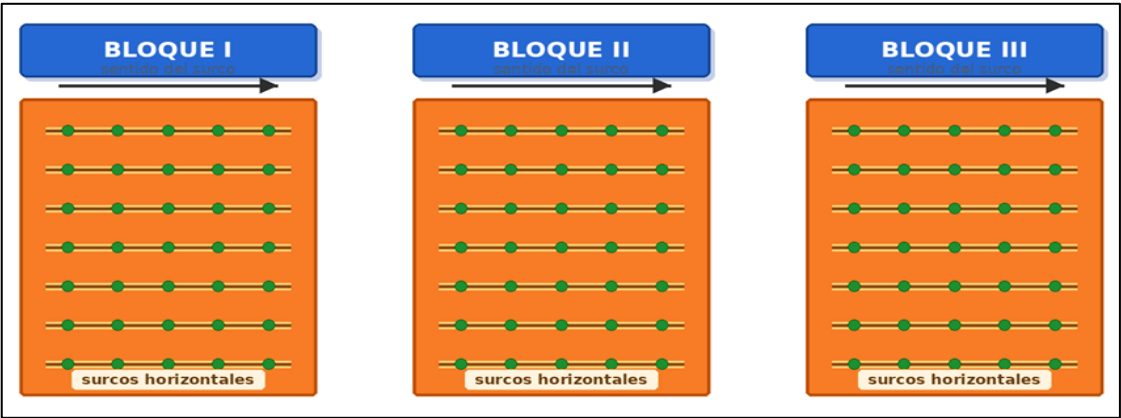


Figura 2.5.

Distribución de tratamientos en cada bloque

Bloque I

T5 a_1*b_0	T10 a_2*b_1	T7 a_1*b_2	T4 a_0*b_3	T9 a_2*b_0	T2 a_0*b_1	T12 a_2*b_3	T6 a_1*b_1	T11 a_2*b_2	T1 a_0*b_0	T8 a_1*b_3	T3 a_0*b_2
------------------------	-------------------------	------------------------	------------------------	------------------------	------------------------	-------------------------	------------------------	-------------------------	------------------------	------------------------	------------------------

Bloque II

T2 a_0*b_1	T6 a_1*b_1	T1 a_0*b_0	T9 a_2*b_0	T4 a_0*b_3	T12 a_2*b_3	T3 a_0*b_2	T11 a_2*b_2	T5 a_1*b_0	T7 a_1*b_2	T10 a_2*b_1	T8 a_1*b_3
------------------------	------------------------	------------------------	------------------------	------------------------	-------------------------	------------------------	-------------------------	------------------------	------------------------	-------------------------	------------------------

Bloque III

T9 a_2*b_0	T12 a_2*b_3	T8 a_1*b_3	T1 a_0*b_0	T3 a_0*b_2	T10 a_2*b_1	T4 a_0*b_3	T6 a_1*b_1	T2 a_0*b_1	T7 a_1*b_2	T5 a_1*b_0	T11 a_2*b_2
------------------------	-------------------------	------------------------	------------------------	------------------------	-------------------------	------------------------	------------------------	------------------------	------------------------	------------------------	-------------------------

2.10. Instalación y conducción del campo experimental

El trabajo experimental se desarrolló entre octubre de 2024 a abril de 2025, periodo durante el cual se realizaron las actividades de instalación, ejecución y recopilación de datos, asegurando el cumplimiento de los objetivos planteados en la investigación.

2.10.1. Labores de preparación del suelo y apertura de surcos

La preparación del terreno se llevó a cabo el 6 de octubre de 2024, utilizando un tractor equipado con un arado de disco, el cual trabajó a una profundidad aproximada de 40 cm, posteriormente, se procedió a realizar labores manuales de nivelación y desterroneo, empleando para ello el esfuerzo de dos trabajadores que utilizaron picos (herramientas con mango largo y una punta metálica afilada), con el fin de romper los terrones y dejar una superficie uniforme y lista para las siguientes etapas. Durante los días 7 y 8 de octubre, se efectuó la apertura de los surcos, los cuales fueron señalizados cuidadosamente con yeso para garantizar precisión en el trazado. La distancia entre cada surco se estableció en 0.5 metros, mientras que la longitud lineal de cada uno fue 8 m.

2.10.2. Replanteo y demarcación del campo experimental

El 10 de octubre, siguiendo el esquema del diseño del campo experimental previamente

establecido, se procedió a delimitar los bloques y sus correspondientes calles. Para ello, se utilizó una cinta métrica de 100 metros que permitió realizar mediciones precisas en el terreno. A continuación, se instalaron 36 estacas para identificar los diferentes tratamientos, las cuales fueron señalizadas con Tecnopor para facilitar su reconocimiento durante el desarrollo del experimento. Además, en cada uno de los tres bloques, se colocaron tallos de plantas cada cinco surcos, con el fin de servir como puntos de referencia visual y mejorar la organización espacial del estudio. Esta metodología garantizó un control adecuado y una correcta diferenciación de los tratamientos a lo largo de la investigación.

2.10.3. Aplicación de la fertilización química

A partir del análisis del suelo de la parcela experimental, se calcularon las cantidades necesarias de nutrientes expresadas en kg ha^{-1} , resultando la dosis 50 - 80 -70 de N, P_2O_5 y K_2O , respectivamente. Estas dosis se dividieron en dos aplicaciones principales: una durante la siembra y otra en el primer aporque. Para ambas aplicaciones se determinaron cantidades específicas de fertilizantes químicos, correspondientes a 75.75 kg de Nitrato de Amonio/hectárea, 173.9 kg de Superfosfato Triple de Calcio /ha y 116.6 kg de Cloruro de Potasio/ha. Considerando el área de 16 m^2 asignada a cada tratamiento, las dosis por surco fueron de 24.2 g de N.A., 55.6 g de S.T. y 37.2 g KCl y posteriormente, el 13 de octubre de 2024, se aplicaron en los 180 surcos durante la siembra la mitad de la dosis de N y todo el P y K al momento de la siembra y, la otra mitad del N, durante el primer aporque.

2.10.4. Aplicación de biochar enriquecido

El biochar empleado en el presente estudio fue obtenido mediante un proceso de pirólisis y adquirido en el Mercado Nery García Zárate, Ayacucho, con un peso inicial de 80 kg y posteriormente fue tamizado obteniéndose 58 kg de material con granulometría uniforme y adecuada para su aplicación en campo. Para su enriquecimiento, se utilizó 58 kg de guano de ovino previamente tamizado, el cual fue incorporado al biochar en una proporción 1:1. Luego, la combinación fue pesada y embolsada de acuerdo con las dosis establecidas para cada surco y tratamiento. La aplicación se realizó el 13 de octubre de 2023 en el fondo de los surcos correspondientes a los tres bloques de la parcela

experimental, cuya área total fue de 592 m². En los tratamientos T5, T6, T7 y T8 se aplicó una dosis de 1 t ha⁻¹ de biochar, equivalente a 320 g por cada 8 m lineales de surco; mientras que en los tratamientos T9, T10, T11 y T12 se aplicó una dosis de 2 t ha⁻¹, equivalente a 640 g por cada 8 m lineales de surco. Finalmente, en un bidón de 50 L se preparó una solución de biol compuesta por 10 L de biol y 35 L de agua. Posteriormente, los surcos tratados fueron embebidos con dicha solución mediante una mochila pulverizadora de 15 L de capacidad, distribuyéndose homogéneamente un volumen total de 45 L, conforme a los tratamientos establecidos.

2.10.5. Desinfección previa de las semillas

El 12 de octubre previo a la siembra, se desinfectaron 22 kg de semillas de haba con fungicida agrícola VITAVAX® 300 WP. Según la ficha técnica, la dosis recomendada es de 50 g por cada 100 kg de semillas; por lo tanto, se aplicaron 11 g de VITAVAX® para los 22 kg de semillas, disueltos en 5 litros de agua y luego fueron secadas bajo sombra para su posterior siembra.

2.10.6. Siembra

La siembra de habas se llevó a cabo el 13 de octubre de 2024, con la colaboración de compañeros de estudio, el responsable del proyecto y el asesor. Inicialmente, se aplicaron fertilizantes químicos en cada surco, utilizando dosis de 24.2 g de nitrato amónico, 27.8 g de superfosfato triple y 18.6 g de cloruro de potasio. A continuación, se incorporó biochar de 320 g y 640 g correspondientes a 1 t ha⁻¹ y 2 t ha⁻¹ respectivamente, luego se enriqueció en los surcos con biol. Finalmente se sembraron 22 kg de semillas en un área de 592 m², con 2 semillas por golpe y se cubrieron manualmente con herramienta manual con el personal involucrado.

2.10.7. Labores culturales

- a) **Riego:** El primer riego se efectuó mediante aspersión el 15 de octubre de 2024. Posteriormente, se programó con una frecuencia semanal, ajustándose según la disponibilidad hídrica y las condiciones de humedad del suelo. Cabe destacar que, en las semanas siguientes, las precipitaciones contribuyeron significativamente al suministro de agua, complementando el manejo hídrico del cultivo.

- b) Deshierbo:** El primero se llevó a cabo el 10 de noviembre de 2024, con el objetivo de eliminar las malezas que compiten con el cultivo en sus primeras etapas de crecimiento. Posteriormente, se realizó un segundo el 25 de enero de 2025, garantizando un control continuo de las plantas no deseadas durante el desarrollo del cultivo. Finalmente, se efectuó un tercer deshierbo después del periodo de floración, con la finalidad de minimizar la competencia en nutrientes y así obtener resultados más claros y confiables en la investigación.
- c) Raleo:** El raleo se realizó el 15 de noviembre, con el objetivo principal de reducir la competencia por nutrientes y evitar el sombreado entre plantas, condiciones que podrían afectar negativamente el desarrollo individual; asimismo, garantizar la uniformidad y evitar posibles sesgos en las evaluaciones posteriores del experimento, se dejó únicamente una planta por sitio de siembra.
- d) Aporque:** El primer aporque se llevó a cabo el 16 de noviembre previo a una segunda dosis de fertilización química en todos los tratamientos experimentales que se explica en la siembra. Posteriormente el segundo aporque se efectuó el 3 de diciembre, con el objetivo principal de proporcionar un soporte adecuado a las plantas, favoreciendo su crecimiento y desarrollo y el control de la proliferación de malezas.
- e) Control fitosanitario:** Los días 5 y 20 de noviembre se realizó la aplicación de 40 g del fungicida VITAVAX® 300 WP, utilizando una mochila fumigadora con capacidad de 15 litros, debido a la detección de ataques por *Fusarium sp.* y *Rhizoctonia sp.* Además, se aplicó el insecticida Albatross® 200 SC a una dosis de 15 ml, que actúa por contacto e ingestión, para el control del gusano cortador negro (*Agrotis ipsilon*). Se aplicó 30 g/15 L Ridomil®, contra tizón tardío (*Phytophthora infestans*) por las constates lluvias.
- f) Cosecha en vaina verde.** Se realizaron dos cosechas: la primera el 5 de abril y la segunda el 21 de abril de 2025, abarcando todos los tratamientos conforme al grado de madurez comercial, ambas se efectuaron de manera precisa y rigurosa, a fin de garantizar la fiabilidad de los resultados obtenidos en la investigación.

2.10.8. Aplicación de biosílice (tierra de diatomea)

Se utilizó 1 kg de tierra de diatomea adquirida de la empresa Hidroponika (Lima, Perú), la cual fue disuelta en agua ajustado a un pH de 4.5 para la preparación de una solución que fue aplicada mediante una mochila pulverizadora con capacidad de 15 L. Dicha solución se administró al cultivo de habas (*Vicia faba* L.) en tres etapas fenológicas: formación de tallos, elongación de tallos y desarrollo floral, empleando concentraciones foliares de biosílice de 0.5%, 1% y 1.5% en cada una de ellas.

Para todas las aplicaciones que involucraron biosílice, se corrigió el pH del agua, reduciéndolo de 6.5 a 4.5. Se añadió 1 ml de INTERCOR pH por cada 10 litros de agua, con el fin de obtener un medio ácido adecuado para su aplicación el cual fue verificado mediante papel tornasol con indicación visual de la reacción.

- a) **Cálculo de dosis de biosílice:** Para calcular las dosis adecuadas de biosílice de 0.5, 1.0 y 1.5 g, se realizó un cálculo proporcional basado en una concentración inicial de 100 ml de agua. Por ejemplo, partiendo de 0.5 gramos de biosílice en 100 ml, se aplicó una regla de tres para determinar la cantidad requerida en 10,000 ml (10 litros), resultando en 50, 100 y 150 g.

$$\frac{0.5 \text{ g}}{100 \text{ ml}} = \frac{X \text{ g}}{10,000 \text{ ml}} = 50 \text{ g de biosílice/10 litros de agua}$$

$$\frac{1.0 \text{ g}}{100 \text{ ml}} = \frac{X \text{ g}}{10,000 \text{ ml}} = 100 \text{ g de biosílice/10 litros de agua}$$

$$\frac{1.5 \text{ g}}{100 \text{ ml}} = \frac{X \text{ g}}{10,000 \text{ ml}} = 150 \text{ g de biosílice/10 litros de agua}$$

- b) **Primera aplicación:** Se realizó el 2 de diciembre de 2024 con mochila de fumigar, utilizando un total de 30 litros de biosílice distribuidos en dosis de 50 g, 100 g y 150 g. Estas dosis se aplicaron durante la etapa vegetativa de formación de tallos, cuando las plantas de haba tenían una altura comprendida entre 20 y 25 cm, abarcando todos los tratamientos correspondientes.
- c) **Segunda aplicación:** Se realizó el 27 de diciembre en la etapa vegetativa de elongación de tallos con la misma dosis de la primera aplicación.

- d) Tercera aplicación:** se realizó el 24 de enero de 2025 en la etapa reproductiva de desarrollo floral con las mismas dosis de primera y segunda aplicación.

2.11. Variables y criterios de evaluación

2.11.1. Del rendimiento de habas

a) Altura de planta (cm)

Se seleccionaron aleatoriamente 10 plantas de los surcos centrales a los 60 días y 90 días y en la madurez fisiológica, evitando el efecto borde. Las mediciones se realizaron con un flexómetro para cada tratamiento y sus repeticiones. Luego, se calculó el promedio de las alturas registradas para obtener un valor representativo.

b) Número de macollos por planta (unidades)

Con el fin de evaluar esta variable, se procedió a seleccionar al azar 10 plantas por cada tratamiento contabilizando el 100% del número de macollos en cada planta. Esta medición se realizó de los surcos centrales durante la recolección de las vainas verdes para posteriormente calcular el promedio correspondiente.

c) Número de flores por planta (unidades)

Durante la fase reproductiva de floración, se seleccionaron aleatoriamente 10 plantas por tratamiento, provenientes de los surcos centrales, con la finalidad de evitar el efecto de borde. En cada planta se registró el número total de flores presentes en las inflorescencias de los racimos axilares. Posteriormente, se calculó el promedio de flores por planta para cada tratamiento, valor que fue utilizado en el análisis estadístico correspondiente.

d) Número de vainas por planta (unidades)

Se contó en número de vainas totales tomadas en 10 plantas de los surcos centrales durante la cosecha de manera al azar en cada tratamiento y se calculó el promedio.

e) Longitud y diámetro de vainas (cm)

La longitud y diámetro de vainas, se tomó 10 plantas de los surcos centrales al azar durante la cosecha, se midió la longitud y el diámetro con el flexómetro en los tratamientos y se calculó el promedio.

f) Número de granos verdes por vaina (unidades)

Para evaluar esta variable, se llevó a cabo el conteo de granos verdes en 10 vainas, que se seleccionaron al azar durante la cosecha por tratamiento y finalmente se calculó el promedio de granos por vaina y se registraron los resultados obtenidos.

g) Peso de 100 semillas verdes (g)

Se tomaron tres muestras de 100 semillas para cada tratamiento y sus tres repeticiones, las cuales fueron pesadas individualmente en una balanza analítica y se calculó de forma proporcional el peso correspondiente a mil semillas.

h) Porcentaje de materia seca del grano (%)

Para determinar el porcentaje de materia seca de los granos, durante la cosecha se seleccionaron al azar diez vainas por planta en cada tratamiento. De estas vainas, se extrajeron aleatoriamente diez semillas verdes, las cuales fueron pesadas para obtener su peso fresco. Posteriormente, las muestras se trasladaron al laboratorio y se secaron en una estufa a 60 °C durante 72 horas. Una vez secas, las semillas se pesaron en una balanza analítica para registrar su peso seco. Finalmente, el porcentaje de materia seca (%MS) se calculó utilizando la fórmula: $\%MS = (\text{peso seco} / \text{peso fresco}) * 100$.

i) Rendimiento en vaina verde (kg ha⁻¹)

Se recolectaron manualmente las vainas verdes de cada tratamiento en los tres surcos centrales, evitando el efecto borde, posteriormente, se seleccionaron las vainas comerciales, las cuales fueron pesadas en kilogramos utilizando una balanza, considerando las repeticiones correspondientes, se calculó el promedio de peso y se extrapoló el rendimiento a una escala por hectárea, una vez realizadas las 2 cosechas.

2.11.1. Rentabilidad económica

a) Relación beneficio costo (B/C) (s/. soles)

Se realizó un análisis económico considerando los costos directos e indirectos de cada tratamiento aplicado al cultivo de haba, adaptando el estudio a las particularidades de cada caso. Con esta información se calcularon los costos de producción y la rentabilidad, permitiendo establecer una relación beneficio/costo que evalúa la viabilidad económica.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Altura de la planta

En la tabla 3.1 se muestra el análisis de varianza de la altura promedio de las plantas de haba evaluados a los 60, 90 días y en madurez fisiológica del cultivo. Se resume los cuadrados medios (CM) de cada uno de ellos con su respectiva significancia. Se agrupó en una sola tabla porque pertenece a una sola variable y, además, con la finalidad de contrastar los resultados entre ellos. Cabe aclarar que los datos de la altura a los 60 días se le aplicó transformación cuadrática (Y^2), debido a que no cumplió con la prueba de supuestos (normalidad y homogeneidad de varianzas).

La Tabla 3.1 de ANVA muestra que la altura de planta del haba presentó respuesta significativa frente a la aplicación de biochar y biosílce, principalmente hasta los 90 días después de la siembra. Los tratamientos mostraron diferencias estadísticas en las tres etapas evaluadas, lo que indica que las combinaciones aplicadas influyeron en el crecimiento de la planta. El biochar, en dosis de 0.0, 1.0 y 2.0 t ha⁻¹, presentó efecto significativo en todas las evaluaciones, evidenciando una influencia constante sobre la altura.

En cambio, la biosílce tuvo efecto significativo a los 60 y 90 días, pero no en la madurez fisiológica, lo que sugiere que su acción fue más evidente durante las etapas iniciales e intermedias del cultivo. La interacción biochar × biosílce fue significativa únicamente a los 90 días, indicando que en esta etapa la altura dependió de la combinación de ambos factores. Asimismo, en el análisis de regresión predominó el ajuste lineal para los niveles de biochar 0.0, 1.0 y 2.0 t ha⁻¹, especialmente a los 60 y 90 días; además, se observó ajuste cuadrático con 1.0 t ha⁻¹ y ajuste cúbico con 2.0 t ha⁻¹ a los 90 días.

Finalmente, los coeficientes de variación (CV) fueron bajos a los 60 y 90 días, con 3.54 % y 3.60 %, respectivamente, lo que evidencia buena precisión experimental; mientras que en la madurez fisiológica el CV fue de 20.35 %, reflejando mayor variabilidad en la altura final de las plantas.

Tabla 3.1.

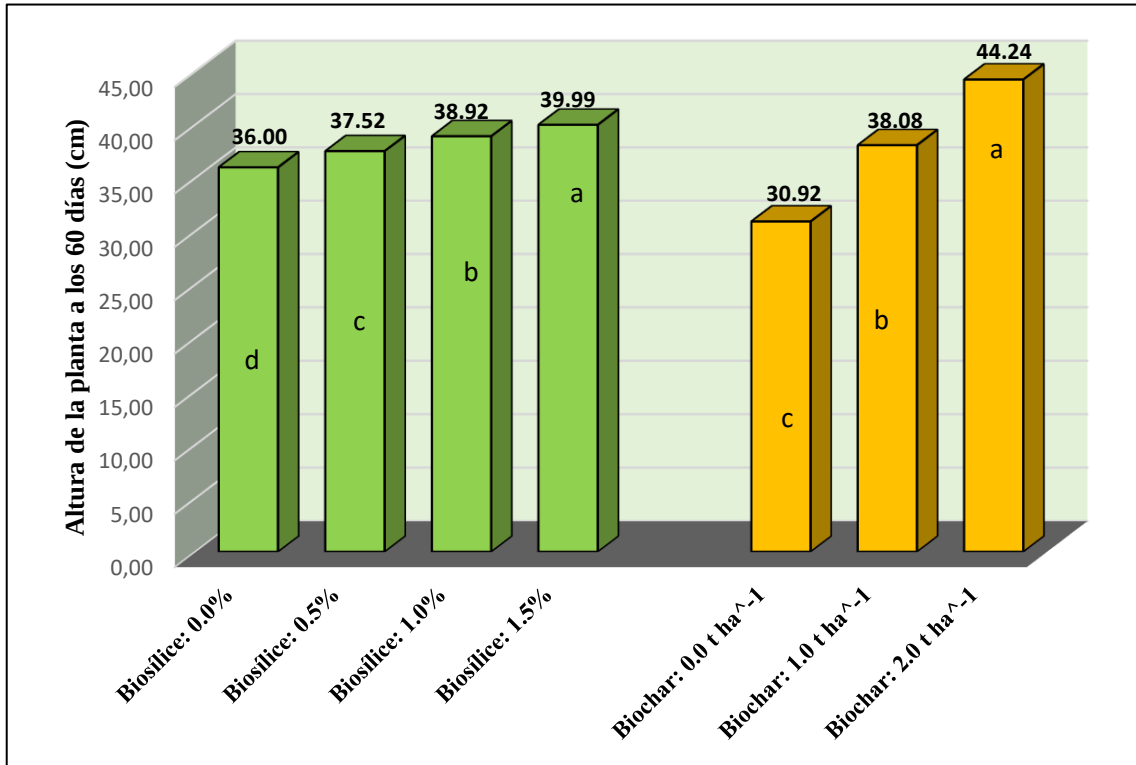
Análisis de varianza de altura de la planta a los 60 días, 90 días y madurez fisiológica de haba, bajo el efecto de las dosis de biochar y biosílíce.

Fuentes de variación	G. L	Altura a los 60 días	Altura a los 90 días	Altura en madurez fisiológica
		Cuadrados Medios (CM)		
Bloque	2	9.39 ns	363.98**	2864.43ns
Tratamientos	11	592854.47**	5269.33**	2403.95*
Dosis biochar (B)	2	3005111.82**	25141.90**	10468.47**
Dosis biosílíce (b)	3	155732.78**	2289.42**	1357.82ns
Interacción (B*b)	6	7329.52 ns	135.10**	238.84ns
Biosílíce en biochar 0.0 t ha⁻¹				
R. lineal	1	277822.40**	795.94**	196.92ns
R. cuadrática	1	4027.47ns	6.06ns	191.82ns
R. cúbica	1	6008.40ns	4.20ns	40.32ns
Biosílíce en biochar 1.0 t ha⁻¹				
R. lineal	1	108990.42**	3733.21**	3410.56ns
R. cuadrática	1	1422.02ns	238.05**	304.20ns
R. cúbica	1	624.75ns	22.09ns	7.84ns
Biosílíce en biochar 2.0 t ha⁻¹				
R. lineal	1	99219.35**	29.16.11**	1487.81ns
R. cuadrático	1	2003.38ns	3.06 ns	126.56ns
R. cúbico	1	1057.31ns	78.01*	2.81ns
Error	22	2653.820	16.060	904.96
Total	35			
CV (%):		3.54	3.6	20.35

Nota. No significativo (ns), significativo (*), altamente significativo (**), variable transformada (t)= Y².

Figura 3.1.

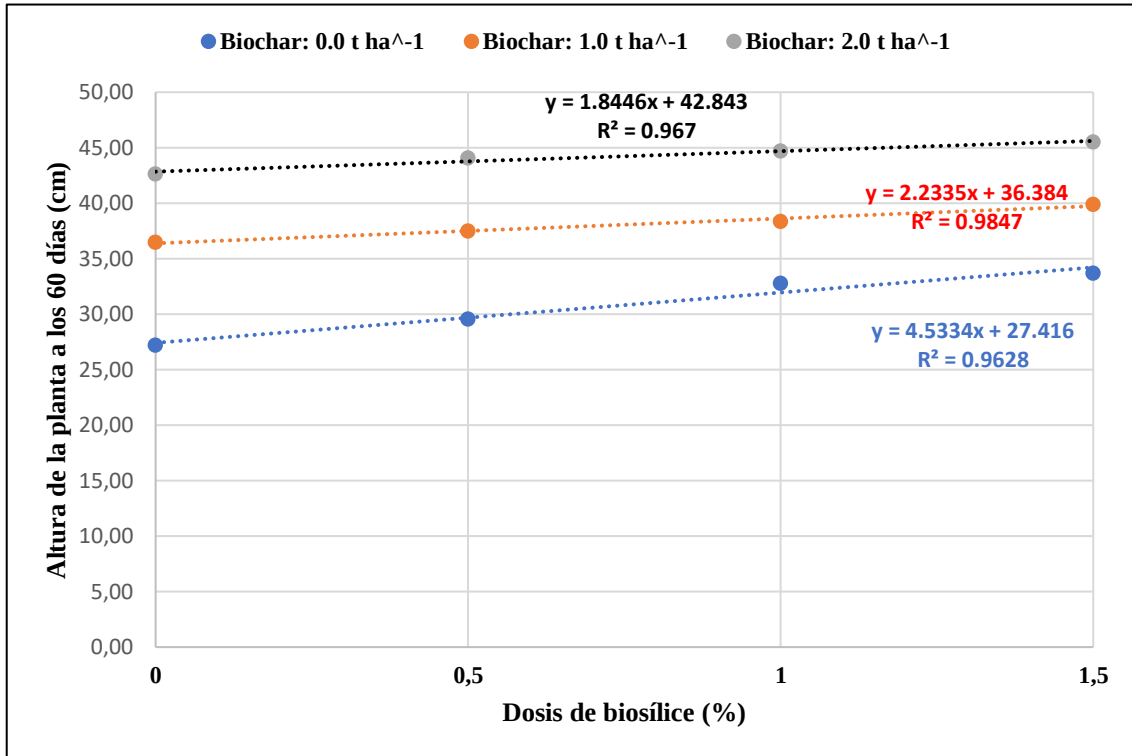
Prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$) de los efectos principales de las dosis de biochar y biosílíce en la altura de la planta de haba a los 60 días.



La figura 3.1 muestra la prueba de Duncan para los efectos principales de las dosis de biochar y la biosílíce sobre la altura de planta de haba a los 60 días. En el factor biosílíce se observó un incremento progresivo de la altura conforme aumentó la dosis aplicada, pasando de 36.00 cm con 0.0 % a 39.99 cm con 1.5 %, con diferencias estadísticas entre los niveles evaluados. Esto indica que la biosílíce favoreció el crecimiento inicial de la planta. En cuanto al biochar, la respuesta fue más marcada, ya que la altura aumentó de 30.92 cm sin aplicación de biochar a 38.08 cm con 1.0 t ha⁻¹ y alcanzó el mayor valor con 2.0 t ha⁻¹, con 44.24 cm. Las letras diferentes entre barras evidencian diferencias significativas entre tratamientos, destacando que la dosis de 2.0 t ha⁻¹ de biochar presentó el mayor efecto sobre la altura de planta a los 60 días.

Figura 3.2.

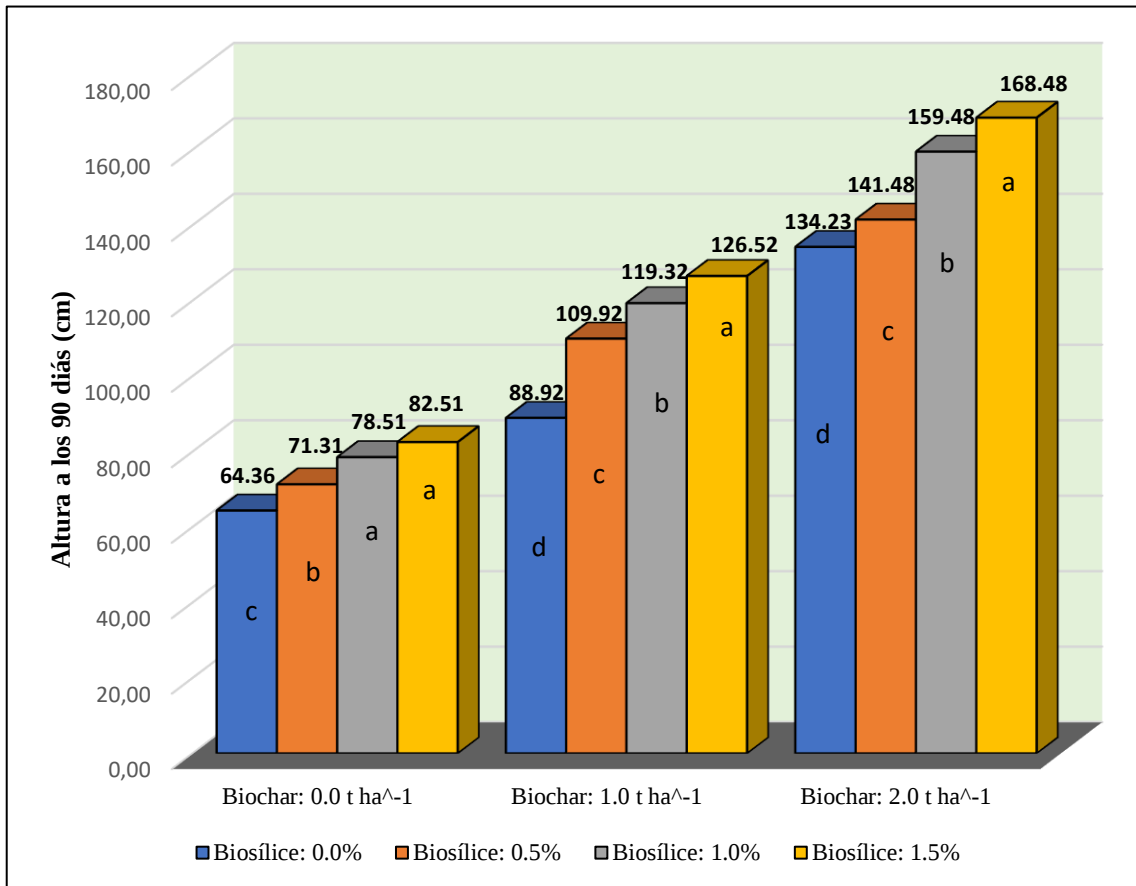
Modelos de regresión del comportamiento de la altura de la planta a los 60 días por efecto de las dosis de biosílice en cada dosis de biochar.



La figura 3.2 muestra que la altura de planta de haba a los 60 días presentó una tendencia lineal positiva frente al incremento de biosílice de 0.0 %, 0.5 %, 1.0 % y 1.5 %, en los tres niveles de biochar evaluados. Sin aplicación de biochar, la ecuación fue $y = 4.5334x + 27.416$, con $r^2 = 0.9628$, equivalente a 96.28 % de ajuste, y una pendiente de 4.5334, lo que indica que por cada incremento porcentual de biosílice la altura aumentó aproximadamente 4.53 cm. Con 1.0 t ha⁻¹ de biochar, la ecuación fue $y = 2.235x + 36.384$, con $r^2 = 0.9847$ (98.47 %) y pendiente de 2.235, indicando un aumento aproximado de 2.24 cm por cada 1 % de biosílice. Con 2.0 t ha⁻¹ de biochar, el modelo fue $y = 1.8446x + 42.843$, con $r^2 = 0.9670$ (96.70 %) y pendiente de 1.8446, lo que representa un incremento aproximado de 1.84 cm por cada porcentual de biosílice. En general, los tres modelos presentaron buen ajuste lineal; sin embargo, las mayores alturas se obtuvieron con 2.0 t ha⁻¹ de biochar, lo que demuestra que este factor elevó la altura inicial de la planta, mientras que la biosílice contribuyó al incremento progresivo del crecimiento.

Figura 3.3.

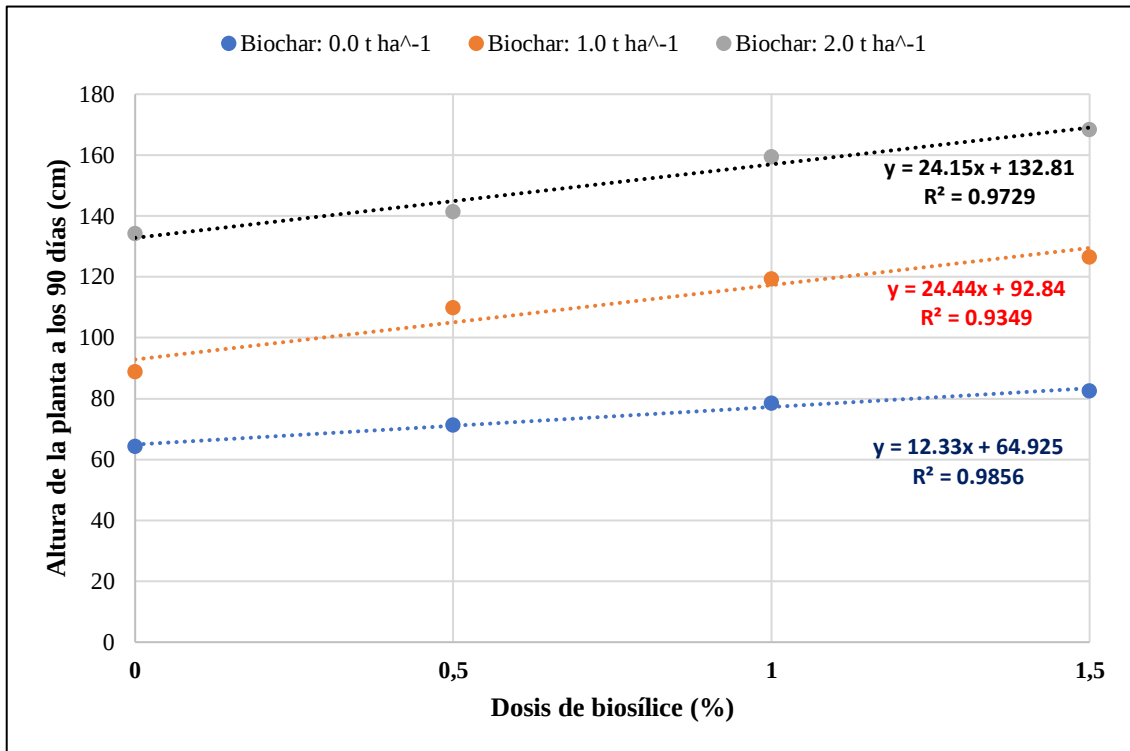
Prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$) de los efectos simples de las dosis de biosíllice en cada dosis de biochar en la altura a los 90 días de haba.



La figura 3.3 muestra la prueba de Duncan para los efectos simples de las dosis biosíllice en cada dosis de biochar sobre la altura de planta de haba a los 90 días. Se observa que, dentro de cada nivel de biochar, la altura aumentó progresivamente conforme se incrementó la dosis de biosíllice. Sin aplicación de biochar, la altura pasó de 64.36 cm con 0.0 % de biosíllice a 82.51 cm con 1.5 %. Con 1.0 t ha⁻¹ de biochar, la altura se incrementó de 88.92 cm a 126.52 cm; mientras que con 2.0 t ha⁻¹ de biochar se registraron los mayores valores, aumentando de 134.23 cm con 0.0 % de biosíllice hasta 168.48 cm con 1.5 %. Las letras diferentes entre barras indican diferencias estadísticas entre los tratamientos, evidenciando que la combinación de 2.0 t ha⁻¹ de biochar con 1.5 % de biosíllice presentó la mayor altura de 168.48 cm de planta a los 90 días.

Figura 3.4.

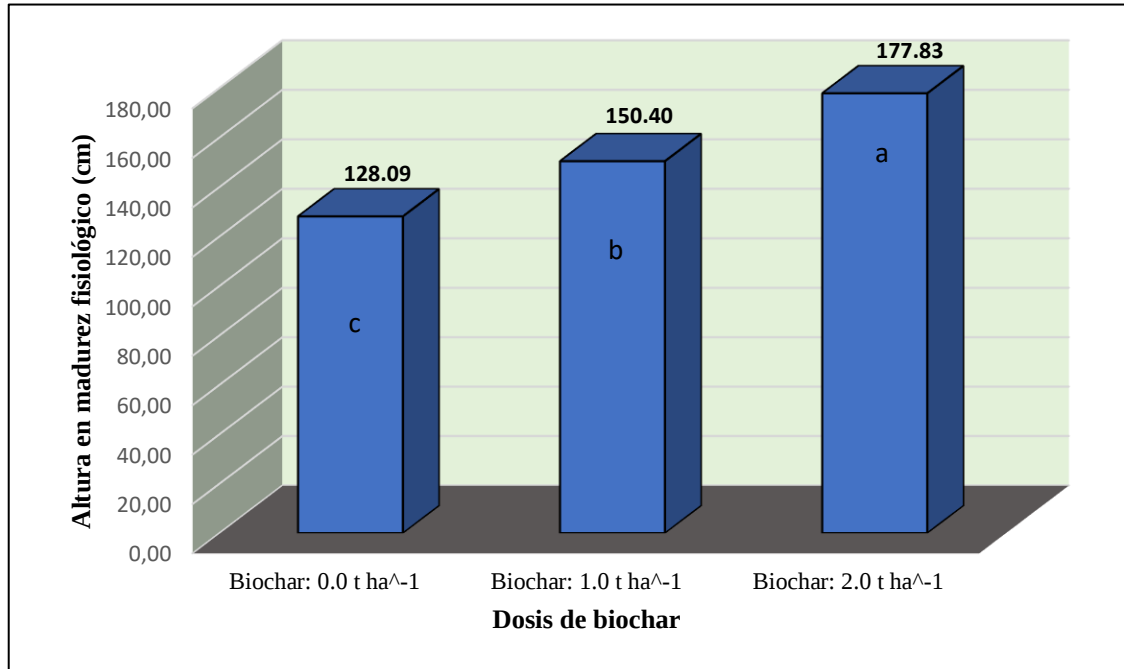
Modelos de regresión del comportamiento de altura de la planta de haba a los 90 días, bajo el efecto de las dosis de biosílíce en cada dosis de biochar.



La figura 3.4 muestra que la altura de planta de haba a los 90 días presentó una tendencia lineal positiva frente al incremento de biosílíce de 0.0 %, 0.5 %, 1.0 % y 1.5 %, en los tres niveles de biochar. Sin aplicación de biochar, el modelo fue $y = 12.33x + 64.925$, con $r^2 = 0.9856$, equivalente a 98.56 % de ajuste, y una pendiente de 12.33, lo que indica que por cada incremento porcentual de biosílíce la altura de planta aumentó aproximadamente 12.33 cm. Con 1.0 t ha⁻¹ de biochar, la ecuación fue $y = 24.44x + 92.4$, con $r^2 = 0.9349$ (93.49 %) y pendiente de 24.44, evidenciando una mayor respuesta de la planta al incremento de biosílíce. Con 2.0 t ha⁻¹ de biochar, el modelo fue $y = 24.15x + 132.81$, con $r^2 = 0.9729$ (97.29 %) y pendiente de 24.15. En general, los tres modelos presentaron buen ajuste lineal; sin embargo, las mayores alturas se registraron con 2.0 t ha⁻¹ de biochar, lo que demuestra que este nivel elevó la altura base de la planta, mientras que la biosílíce incrementó progresivamente el crecimiento a los 90 días.

Figura 3.5.

Prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$) del efecto principal de las dosis de biochar en la altura de la planta de haba evaluado en la madurez fisiológica



La figura 3.5 muestra la prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$) del efecto principal de las dosis de biochar sobre la altura de planta de haba en la etapa de madurez fisiológica. Se observa una respuesta creciente conforme aumentó la dosis de biochar, ya que la altura pasó de 128.09 cm sin aplicación de biochar a 150.40 cm con 1.0 t ha⁻¹ y alcanzó el mayor valor con 2.0 t ha⁻¹, con 177.83 cm. Las letras diferentes entre tratamientos indican diferencias estadísticas significativas, evidenciando que cada dosis de biochar produjo una respuesta distinta en la altura final de la planta. Estos resultados demuestran que el biochar tuvo un efecto positivo y sostenido hasta la madurez fisiológica, destacando la dosis de 2.0 t ha⁻¹ como la más favorable para incrementar la altura de planta de haba.

Discusión

En las figuras 3.1, 3.3 y 3.5 de la prueba de Duncan, los resultados coinciden con Poormansour & Razzaghi (2018), quienes reportaron que el biochar a 25 t ha⁻¹ mejoró variables productivas del haba, como el número de flores, vainas y peso seco de grano. Por tanto, el biochar favoreció el crecimiento del cultivo, probablemente por mejorar la disponibilidad de agua y nutrientes en el suelo; asimismo, Al-Mishyyikh & Jarallah

(2024) evidenciaron que el biochar favoreció la altura de planta del haba, ya que el tratamiento control alcanzó 45.6 cm, mientras que la aplicación de 15 t ha⁻¹ de biochar incrementó la altura a 56.3 cm. Asimismo, la combinación de 15 t ha⁻¹ de biochar con 30 t ha⁻¹ de bentonita logró el mayor valor, con 62.3 cm, demostrando una mejora superior respecto al tratamiento sin aplicación, tal como sostienen Escalante et al. (2016) y Melo-Lozano y Afanasjeva (2023). Respecto a la biosílice, la respuesta positiva observada hasta los 90 días guarda relación con Shoman y Bughdady (2020) y Hafez et al. (2021), quienes indicaron que el silicio favorece el crecimiento, la absorción de nutrientes y la productividad del haba. En conjunto, se puede afirmar que la aplicación de biochar tuvo un efecto más constante sobre la altura de planta, mientras que la biosílice contribuyó principalmente en las etapas iniciales e intermedias del crecimiento.

3.2. Número de macollos por planta

La información de esta variable ha sido transformada mediante raíz cuadrada, debido a que no cumplía con las pruebas de supuestos (normalidad y homogeneidad de varianzas) requisito indispensable para análisis.

Tabla 3.2.

Análisis de varianza de número de macollos por planta de haba, bajo el efecto de las dosis de biochar y biosílice.

Fuentes de variación	G.L.	S.C.	C.M.	Fc	P - Valor
Bloque	2	0.030	0.015	1.000	0.3985 ns
Tratamientos	11	6.350	0.577	38.485	< 0.0001**
Dosis biochar (B)	2	5.360	2.680	178.667	< 0.0001**
Dosis biosílice (b)	3	0.930	0.310	20.667	< 0.0001**
Interacción (B*b)	6	0.060	0.010	0.667	0.6379 ns
Biosílice en biochar 0.0 t ha⁻¹					
R. lineal	1	0.162	0.162	10.800	0.0032**
R. cuadrática	1	0.003	0.003	0.200	0.6740 ns
R. cúbica	1	0.001	0.001	0.067	0.8017 ns
Biosílice en biochar 1.0 t ha⁻¹					
R. lineal	1	0.374	0.374	24.933	0.0001**
R. cuadrática	1	0.034	0.034	2.267	0.1438 ns
R. cúbica	1	0.016	0.016	1.067	0.3105 ns
Biosílice en biochar 2.0 t ha⁻¹					
R. lineal	1	0.394	0.394	26.267	<0.0001**
R. cuadrática	1	0.004	0.004	0.267	0.6075 ns
R. cúbica	1	0.005	0.005	0.333	0.5873 ns
Error	22	0.330	0.015		
Total	35	6.71			
CV (%):	4.73				

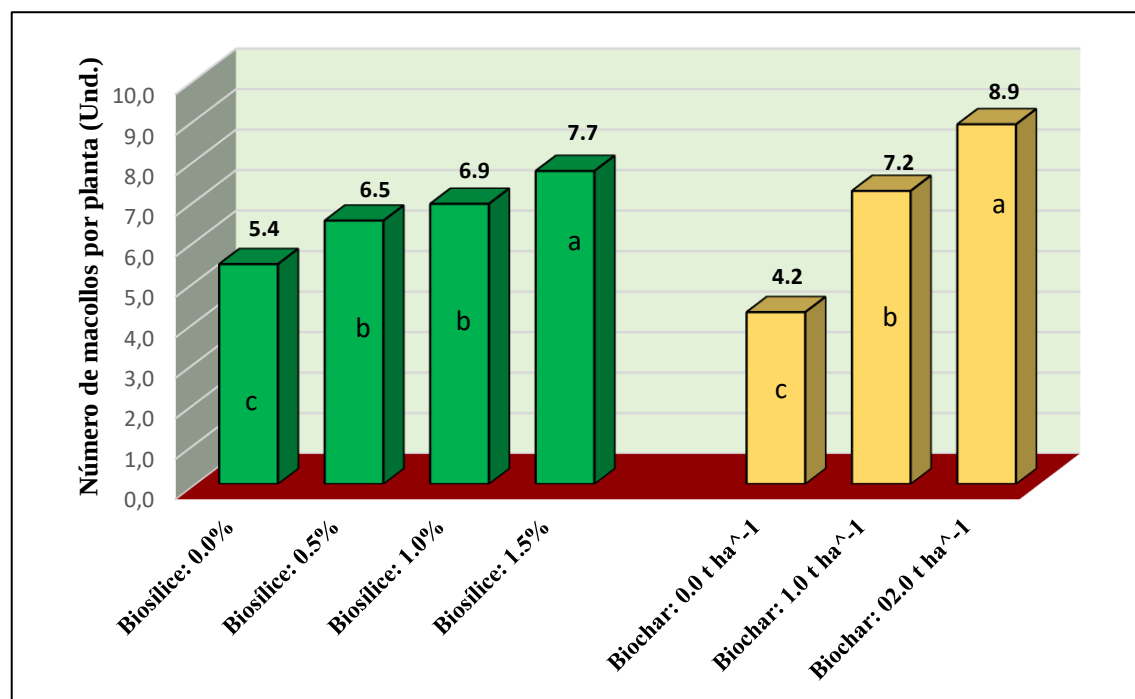
Nota. No significativo (ns), significativo (*), altamente significativo (**), variable transformada ($\sqrt{Y}$)

La tabla 3.2 del ANVA muestra que los tratamientos, la dosis de biochar y la dosis de biosílíce resultaron altamente significativos, mientras que la interacción entre ambos factores no fue significativa. Esto indica que el número de macollos por planta estuvo influenciado por los efectos principales de cada factor; por tanto, la interpretación debe realizarse de manera independiente para biochar y biosílíce, sin atribuir el efecto a la combinación específica de ambos factores. Asimismo, el coeficiente de variabilidad de 4.73 % evidencia buena precisión experimental y confiabilidad en los resultados obtenidos.

El análisis de varianza también presenta los contrastes polinomiales de la biosílíce dentro de cada nivel de biochar: 0.0, 1.0 y 2.0 t ha⁻¹. En los tres niveles de biochar, el componente lineal de la biosílíce fue o altamente significativo, mientras que los componentes cuadrático y cúbico no fueron significativos. Esto permite inferir que el número de macollos por planta respondió principalmente de forma lineal al incremento de las dosis de biosílíce, es decir, conforme aumentó la dosis de biosílíce, el número de macollos tendió a incrementarse progresivamente.

Figura 3.6.

Prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$) de los efectos principales de las dosis de biochar y biosílíce en número de macollos por planta.



La figura 3.6 muestra la prueba de Duncan sobre el número de macollos por planta, evidenciando que la dosis de biosílíce al 1.5 % alcanzó el mayor promedio, con 7.7 macollos por planta, superando al testigo sin biosílíce, que registró 5.4 macollos. Esto representa un incremento de 42.59 %, lo que evidencia una respuesta favorable del cultivo al aumento de la dosis de biosílíce.

Este resultado se sustenta en Shoman & Bughdady (2020), quienes reportaron que el silicio foliar mejoró el crecimiento y la productividad del haba; asimismo, Hafez et al. (2021) señalaron que el silicato de potasio + *Rhizobium* favoreció la nodulación, absorción de nutrientes y productividad del cultivo de habas. Aunque estos estudios no evaluaron directamente el número de macollos, respaldan el efecto favorable de las fuentes síliceas sobre el desarrollo vegetativo de *Vicia faba* L. Según Naranjo & Solórzano (2018), la aplicación foliar de silicio mejora el macollamiento, la biomasa y la altura de la planta, incrementando el rendimiento en arroz.

Por su parte, en la dosis de biochar con 2.0 t ha⁻¹ existe diferencias estadísticas entre los tratamientos y se presentó el mayor promedio, con 8.9 macollos por planta, frente al testigo sin biochar, que obtuvo 4.2 macollos, lo que representa un incremento de 111.90 %. En conjunto, los resultados evidencian que tanto la biosílíce como el biochar favorecieron el macollamiento del cultivo de haba, destacando las dosis más altas de ambos factores.

Este comportamiento coincide con Van Zwieten et al. (2015), quienes indicaron que el biochar mejoró el rendimiento y la fijación biológica de nitrógeno en haba cultivada en suelo ácido; de igual manera, Mohamed et al. (2017) reportaron mejoras en crecimiento, nutrición vegetal, nodulación, actividad microbiana y propiedades químicas del suelo. Chen et al. (2021), quienes reportaron que la aplicación de biochar en arroz mejoró el número de macollos, altura de planta, panículas productivas, rendimiento y eficiencia del uso del agua. Aunque el antecedente corresponde a arroz, permite sustentar que el biochar puede favorecer el crecimiento vegetativo y los componentes productivos de los cultivos, lo cual se relaciona con el incremento de macollos observado en haba con la dosis de 2.0 t ha⁻¹.

El incremento del número de macollos puede atribuirse a la acción del biochar y la

biosílice, favorecida por condiciones edafoclimáticas adecuadas para el cultivo. Según la Tabla 2.2, el suelo presentó textura franco arcillosa y altos contenidos de materia orgánica, nitrógeno y fósforo, aunque el pH fuertemente ácido (5.15) y el desequilibrio de cationes (Ca^{++} , Mg^{++} y K^{+}) pudieron limitar la absorción de nutrientes. En este contexto, el biochar habría mejorado las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo y la biosílice el vigor fisiológico de las plantas. Asimismo, las condiciones climáticas reportadas en la Tabla 2.1, con temperaturas adecuadas y suficiente disponibilidad hídrica, favorecieron el desarrollo del haba. Por ello, las mayores respuestas en macollamiento se observaron con 2.0 t ha^{-1} de biochar y 1.5 % de biosílice, aunque sus efectos actuaron de manera independiente al no presentar interacción significativa.

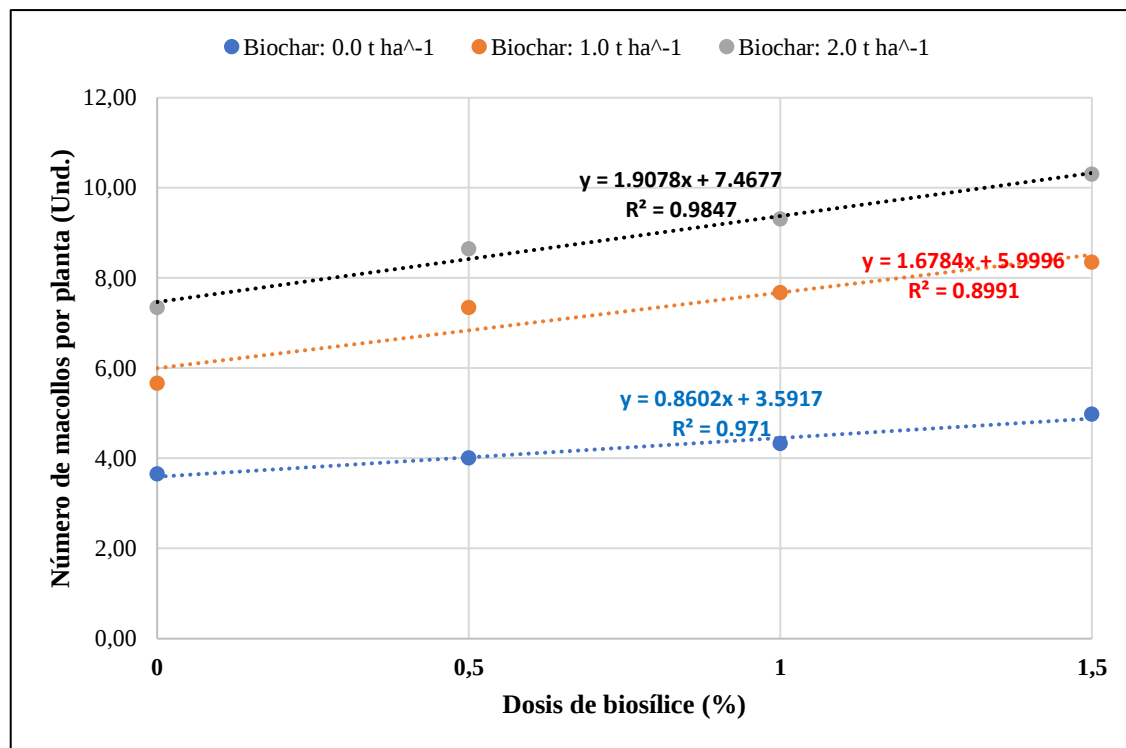
Al comparar estos resultados con antecedentes agronómicos del cultivo de haba, como referencia externa y no directa se observa que INIA (2027) con la variedad de habas INIA 417-Hinán Carmen reporta entre 4 y 9 macollos productivos por planta; por ello, los valores obtenidos con biosílice al 1.5 % (7.7 macollos) y biochar a 2.0 t ha^{-1} (8.9 macollos) se ubican dentro del rango superior esperado para el cultivo. Asimismo, Huamán et al. (2026) reportaron entre 4.33 y 7.00 macollos por golpe en líneas avanzadas y variedades locales de haba evaluadas en Cusco, por lo que los resultados del presente estudio fueron similares o superiores a dichos referentes.

La Figura 3.7 evidencia una tendencia lineal positiva entre la dosis de biosílice y el número de macollos por planta de haba en los tres niveles de biochar evaluados, lo que indica que el incremento de la biosílice favoreció el macollamiento del cultivo dentro del rango experimental estudiado. En ausencia de biochar, el modelo de regresión fue $y = 0.8602x + 3.5917$, con un coeficiente de determinación de $r^2 = 0.971$, lo cual señala que el 97.10 % de la variación observada en el número de macollos fue explicada por la dosis de biosílice. Con la aplicación de 1.0 t ha^{-1} de biochar, el modelo $y = 1.6784x + 5.9996$ presentó un $r^2 = 0.8991$, explicando el 89.91 % de la variación. Finalmente, con 2.0 t ha^{-1} de biochar, el modelo $y = 1.9078x + 7.4677$ alcanzó el mayor ajuste, con un $r^2 = 0.9847$, explicando el 98.47 % de la variación observada. Este último tratamiento presenta valores más altos de macollamiento y la mayor pendiente del modelo, equivalente a 1.9078, lo que indica que por cada incremento porcentual de biosílice el número de macollos

aumentó aproximadamente en 1.91 unidades.

Figura 3.7.

Modelos de regresión del comportamiento de número de macollos por planta de haba, bajo el efecto de las dosis de biosílíce en cada dosis de biochar.



3.3. Número de flores por planta

La tabla 3.3 de ANVA evidencia que los tratamientos, dosis de biochar, dosis de biosílíce y la interacción biochar $\times$ biosílíce fueron altamente significativos, lo que indica que el número de flores por planta respondió al efecto combinado de ambos factores. Por ello, la interpretación debe considerar las combinaciones de biochar y biosílíce, ya que la respuesta de la biosílíce varió según la dosis de biochar aplicada. El coeficiente de variabilidad fue de 6.57 %, valor bajo que refleja precisión experimental y confiabilidad de los resultados. Además, el análisis de tendencia mostró significancia lineal en los niveles de 0.0 y 1.0 t ha⁻¹ de biochar; mientras que con 2.0 t ha⁻¹ se observaron respuestas lineales y cúbicas significativas, evidenciando una mayor variación del número de flores conforme aumentaron las dosis de biosílíce.

Tabla 3.3.

Análisis de varianza de número de flores por planta de haba, bajo el efecto de las dosis de biochar y biosílíce

Fuentes de variación	G.L.	S.C.	C.M.	Fc	P - Valor
Bloque	2	212.720	106.360	0.741	0.4882 ns
Tratamientos	11	333466.310	30315.119	211.148	< 0.0001**
Dosis biochar (B)	2	238559.060	119279.530	830.793	< 0.0001**
Dosis biosílíce (b)	3	61929.190	20643.063	143.781	< 0.0001**
Interacción (B*b)	6	32978.060	5496.343	38.283	< 0.0001**
Biochar 0.0 t ha⁻¹ en biosílíce					
R. lineal	1	1325.400	1325.400	9.232	0.0060 **
R. cuadrática	1	147.000	147.000	1.024	0.3226 ns
R. cúbica	1	32.270	32.270	0.225	0.6401ns
Biochar 1.0 t ha⁻¹ en biosílíce					
R. lineal	1	11316.270	11316.270	78.819	<0.0001**
R. cuadrática	1	243.000	243.000	1.693	0.2067 ns
R. cúbica	1	38.400	38.400	0.267	0.6102 ns
Biochar 2.0 t ha⁻¹ en biosílíce					
R. lineal	1	78988.820	78988.820	550.164	<0.0001**
R. cuadrática	1	546.750	546.750	3.808	0.0639 ns
R. cúbica	1	2269.350	2269.350	15.806	0.006**
Error	22	3158.610	143.573		
Total	35	336837.64			
CV (%):	6.57				

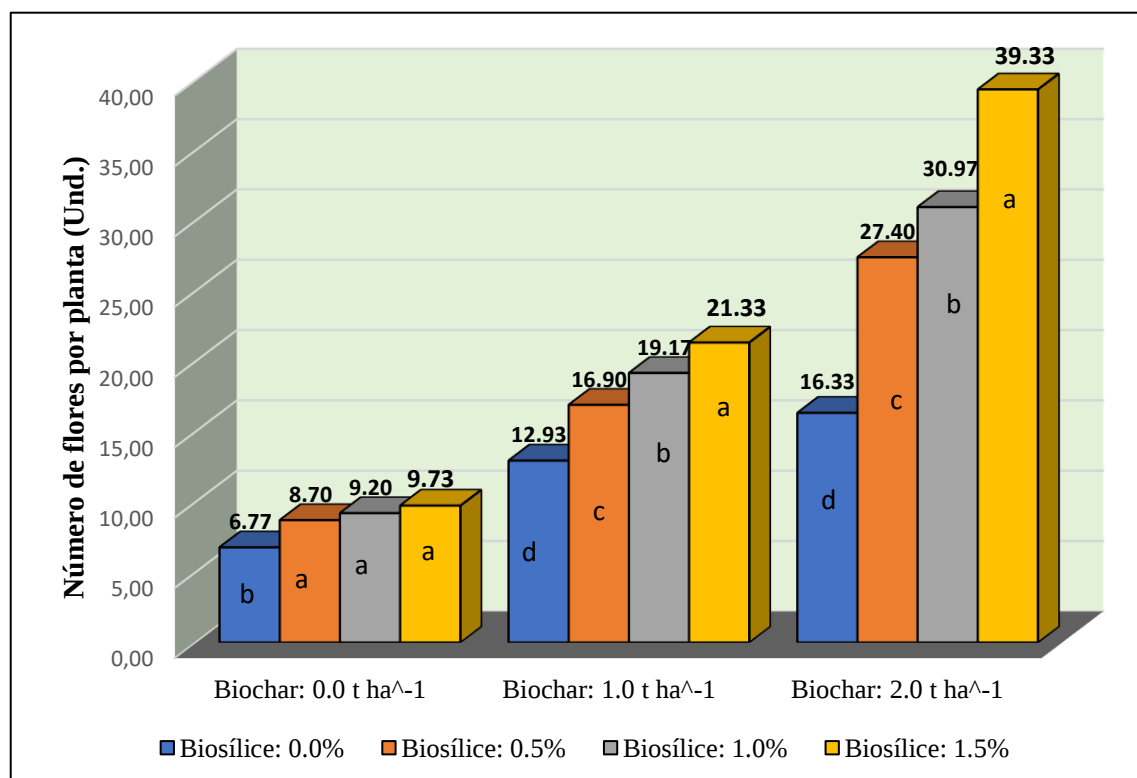
Nota. No significativo (ns), significativo (*), altamente significativo (**)

La figura 3.8 de la prueba de Duncan muestra los efectos simples de las dosis de biochar y biosílíce sobre el número de flores por planta de haba. En ausencia de biochar, la aplicación de biosílíce incrementó el número de flores respecto al testigo; sin embargo, las dosis de 0.5 %, 1.0 % y 1.5 % fueron estadísticamente similares entre sí, al ubicarse en el grupo “a”, con valores de 8.70; 9.20 y 9.73 flores por planta, respectivamente. En cambio, el tratamiento sin biosílíce presentó el menor valor, con 6.77 flores por planta, ubicándose en el grupo “b”. Con 1.0 t ha⁻¹ de biochar, el número de flores aumentó progresivamente conforme se incrementó la dosis de biosílíce, desde 12.93 flores sin biosílíce hasta 21.33 flores con 1.5 %, mostrando diferencias estadísticas entre todos los tratamientos. De manera similar, con 2.0 t ha⁻¹ de biochar se observó la mayor respuesta floral, alcanzando 39.33 flores por planta con 1.5 % de biosílíce, mostrando diferencias estadísticas entre todos los tratamientos, valor que se ubicó en el grupo “a” y superó a las

demás dosis. En conjunto, estos resultados evidencian que el número de flores por planta fue mayor cuando se aplicaron las dosis más altas de biochar y biosílice, destacando la combinación de 2.0 t ha⁻¹ de biochar con 1.5 % de biosílice bajo las condiciones edafoclimáticas de Huamanguilla.

Figura 3.8.

Prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$) de los efectos simples de las dosis de biosílice en cada dosis de biochar en el número de flores por planta.



Este comportamiento coincide con Poormansour & Razzaghi (2018), quienes reportaron que la aplicación de 25 t ha⁻¹ de biochar incrementó el número de flores en 12 % y el número de vainas en 92 % respecto al tratamiento sin biochar. Asimismo, Shoman & Bughdady (2020) señalaron que la aplicación foliar de silicio favoreció el crecimiento, la formación de vainas, el rendimiento y la calidad del grano en haba. De igual manera, Hafez et al. (2021) indicaron que el silicato de potasio, especialmente combinado con rizobacterias, mejoró la nodulación, absorción de nutrientes, tolerancia a la salinidad y rendimiento del cultivo. Por tanto, el mayor número de flores registrado en Huamanguilla puede explicarse por el efecto del biochar sobre la mejora del suelo y por el aporte fisiológico del silicio en la etapa reproductiva del cultivo.

Los resultados obtenidos pueden atribuirse al efecto del biochar enriquecido con materia orgánica de origen ovino y biol el cual habría mejorado el ambiente edáfico mediante mayor retención de nutrientes, estímulo de la actividad microbiana y posible amortiguación de la acidez del suelo. Aunque el suelo presentó alto contenido de materia orgánica y fósforo disponible, su pH fuertemente ácido pudo limitar la absorción equilibrada de nutrientes; se sustenta con Escalante et al. (2016), Melo-Lozano y Afanasjeva (2023) y Kizito et al. (2019), quienes señalan que el biochar mejora la fertilidad, la CIC, la actividad microbiana y la disponibilidad de nutrientes. Esta explicación se complementa con Díaz-Solares et al. (2020) y Pentón-Fernández et al. (2021), quienes sustentan el uso de microorganismos nativos y biochar enriquecido como alternativas agroecológicas para mejorar la fertilidad y productividad de los cultivos.

El silicio desempeña un papel crucial en la resistencia de las plantas al formar barreras físicas (cera, cutícula y pared celular), activar enzimas defensivas y regular la expresión de genes relacionados con las respuestas de defensa (Wang et al., 2017). El silicio incrementa la productividad y calidad de los cultivos, mejora la fertilidad (N-P-K), neutraliza la toxicidad del aluminio, reduce la lixiviación de nutrientes, fortalece la resistencia de las plantas frente a plagas y enfermedades, mejora la absorción de fósforo, restaura suelos contaminados y promueve una mayor fotosíntesis (Baglione, 2011).

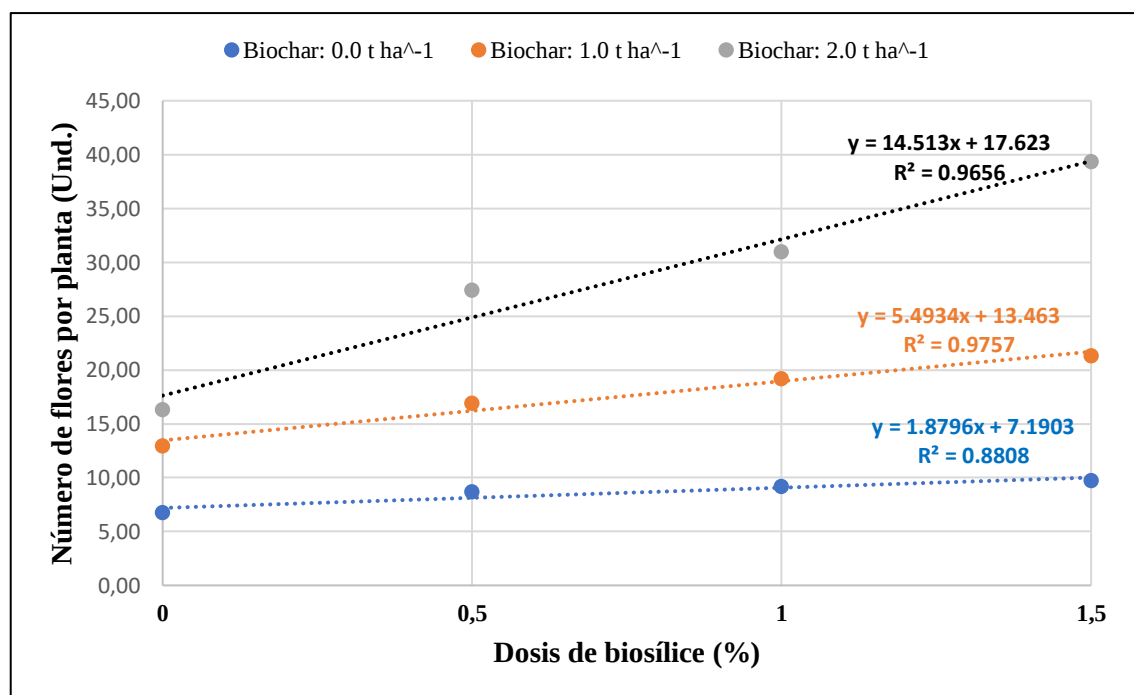
Al comparar el número de flores por planta con antecedentes agronómicos del cultivo de haba, el estudio de Infante Gálvez (2014) se asumió solo como referente externo de magnitud floral, no como comparación directa de tratamientos. Dicho autor reportó 58,85 flores por planta a los 100 días y 131.92 flores por planta a los 121 días después de la siembra; frente a ello, los valores obtenidos en la presente investigación, entre 6.77 y 39.33 flores por planta, fueron inferiores a dicho referente.

La figura 3.9 evidencia una tendencia lineal positiva entre la dosis de biosílice y el número de flores por planta de haba en los tres niveles de biochar evaluados, lo que indica que el incremento de la biosílice favoreció la floración del cultivo dentro del rango experimental estudiado. En ausencia de biochar, el modelo de regresión fue $y = 1,8796x + 7,1903$, con un coeficiente de determinación de $r^2 = 0.8808$, lo cual señala que el 88.08 % de la variación observada en el número de flores fue explicada por la dosis de biosílice. Con la aplicación de 1.0 t ha^{-1} de biochar, el modelo $y = 5.4934x + 13.463$ presentó un $r^2 =$

0.9757, explicando el 97.57 % de la variación. Finalmente, con 2.0 t ha⁻¹ de biochar, el modelo $y = 14.513x + 17.623$ alcanzó un alto ajuste, con un $r^2 = 0.9656$, explicando el 96.56 % de la variación observada. Este último tratamiento presentó los valores más altos de floración y la mayor pendiente del modelo, equivalente a 14.513, lo que indica que por cada incremento porcentual de biosílíce el número de flores por planta aumentó aproximadamente en 14.51 unidades.

Figura 3.9.

Modelos de regresión lineal del comportamiento de número de flores de haba, bajo el efecto de las dosis de biosílíce en cada dosis de biochar.



3.4. Número de vainas por planta

En la tabla 3.4 del ANVA se observa que los tratamientos, las dosis de biochar, las dosis de biosílíce y la interacción biochar × biosílíce presentaron alta significancia estadística. Esto indica que el número de vainas por planta de haba respondió significativamente a los factores evaluados y que el efecto de la biosílíce dependió del nivel de biochar aplicado. Por ello, en esta variable corresponde interpretar no solo los efectos principales, sino también las combinaciones entre ambos factores, debido a que la interacción fue altamente significativa bajo las condiciones edafoclimáticas de Huamanguilla. Asimismo, el coeficiente de variabilidad fue de 5.25 %, valor bajo que indica buena

precisión experimental y confiabilidad en los resultados obtenidos.

Respecto al análisis de regresión, en ausencia de biochar se observó una respuesta lineal significativa de la biosílice sobre el número de vainas por planta, mientras que los componentes cuadrático y cúbico no fueron significativos. Con la aplicación de 1.0 t ha⁻¹ de biochar, se presentaron respuestas lineal y cuadrática significativas, lo que indica una variación más marcada del número de vainas conforme aumentaron las dosis de biosílice. Finalmente, con 2.0 t ha⁻¹ de biochar, los componentes lineal, cuadrático y cúbico fueron significativos, evidenciando una respuesta más compleja del cultivo frente a las dosis de biosílice en el nivel más alto de biochar.

Tabla 3.4.

Análisis de varianza de número de vainas por planta de haba, bajo el efecto de las dosis de biochar y biosílice

Fuentes de variación	G.L.	S.C.	C.M.	Fc	P - Valor
Bloque	2	282.580	141.290	1.705	0.0505 ns
Tratamientos	11	348708.750	31700.795	382.602	< 0.0001**
Dosis biochar (B)	2	252600.000	126300.000	1524.333	< 0.0001**
Dosis biosílice (b)	3	65427.860	21809.287	263.219	< 0.0001**
Interacción (B*b)	6	30680.890	5113.482	61.715	< 0.0001**
Biosílice en biochar 0.0 t ha⁻¹					
R. lineal	1	1915.350	1915.350	23.117	0.0001**
R. cuadrática	1	90.750	90.750	1.095	0.3054 ns
R. cúbica	1	0.150	0.150	0.002	0.9664 ns
Biosílice en biochar 1.0 t ha⁻¹					
R. lineal	1	13410.150	13410.150	161.849	<0.0001**
R. cuadrática	1	690.080	690.080	8.329	0.0084**
R. cúbica	1	28.020	28.020	0.338	0.5658ns
Biosílice en biochar 2.0 t ha⁻¹					
R. lineal	1	76826.820	76826.820	927.234	<0.0001**
R. cuadrática	1	494.080	494.080	5.963	0.0228*
R. cúbica	1	26553.350	26553.350	320.476	<0.0001**
Error	22	1822.830	82.856		
Total	35	350814.16			
CV (%):	5.25				

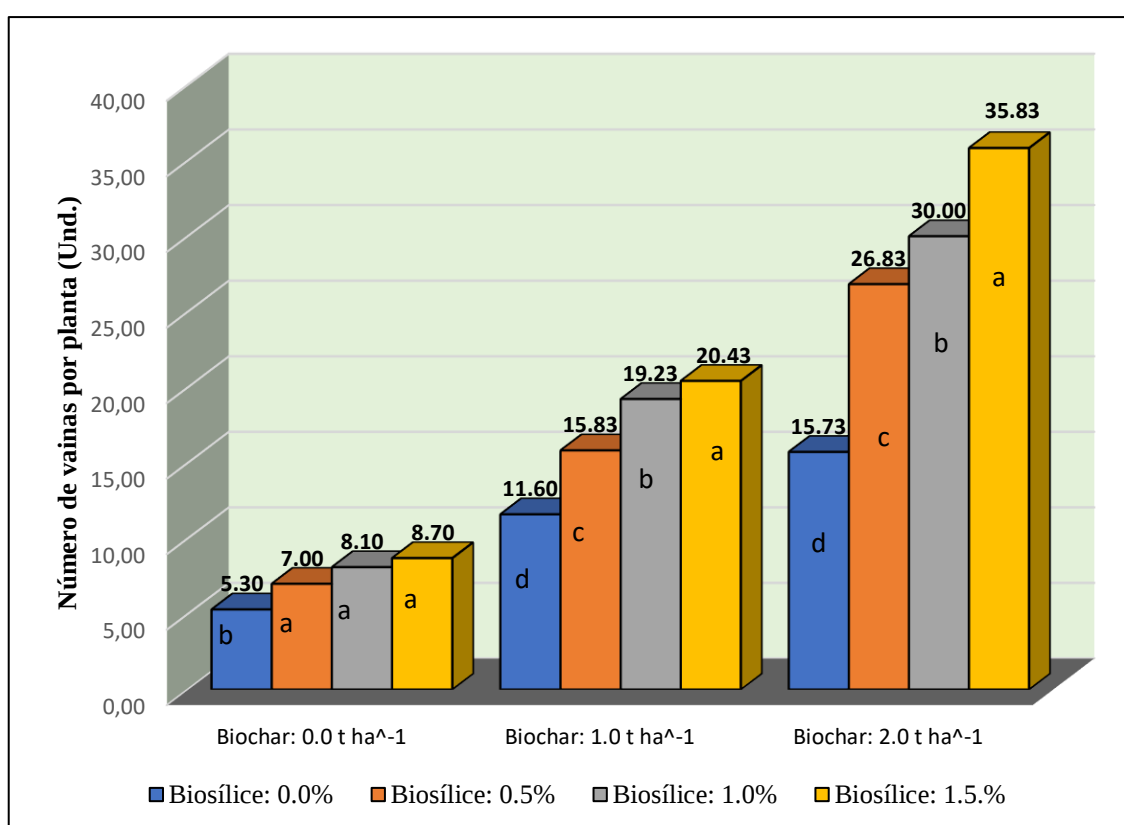
Nota. No significativo (ns), significativo (*), altamente significativo (**)

La figura 3.10 en la prueba de Duncan evidencia que el número de vainas por planta de haba presentó una respuesta creciente frente al incremento de las dosis de biosílice en cada nivel de biochar evaluado. En ausencia de biochar, las dosis de 0.5 %, 1.0 % y 1.5

% de biosílíce registraron 7.00, 8.10 y 8.70 vainas por planta, respectivamente, valores estadísticamente similares entre sí, pero superiores al testigo, que alcanzó 5.30 vainas por planta. Con 1.0 t ha⁻¹ de biochar, se observó un incremento progresivo y diferenciado, desde 11.60 vainas sin biosílíce hasta 20.43 vainas con 1.5 % de biosílíce. La mayor respuesta se obtuvo con 2.0 t ha⁻¹ de biochar, donde la aplicación de 1.5 % de biosílíce alcanzó 35.83 vainas por planta, superando estadísticamente a las demás dosis.

Figura 3.10.

Prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$) de los efectos simples de las dosis biosílíce en cada dosis de biochar en el número de vainas por planta.



Esta respuesta se relaciona con Poormansour & Razzaghi (2018), quienes reportaron que la aplicación de 25 t ha⁻¹ de biochar en haba incrementó el número de vainas en 92 % respecto al tratamiento sin biochar, lo que respalda el efecto favorable de esta enmienda sobre los componentes productivos del cultivo. Asimismo, Tadesse et al. (2025) obtuvieron 10.1 vainas por planta con 10 t ha⁻¹ de biocarbón, mientras que Shoman & Bughdady (2020) reportaron 14.2 vainas por planta con 300 ppm de silicio foliar, y Hafez et al. (2021) alcanzaron 29.7 vainas por planta con silicato de potasio combinado con

rizobacterias bajo agua dulce. En comparación con estos antecedentes, el valor máximo obtenido en Huamanguilla fue superior; sin embargo, esta diferencia debe interpretarse con prudencia, debido a variaciones en dosis, fuente de enmienda, manejo agronómico, condiciones edafoclimáticas y metodología de evaluación. En ese sentido, la adición de biochar enriquecido con guano de ovino y biol habría mejorado las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, favoreciendo el desarrollo integral del cultivo; de manera complementaria, la biosílice pudo contribuir a mejorar la formación y calidad de las vainas, así como la resistencia frente a factores adversos. Esta explicación se sustenta en Escalante et al. (2016) y Melo-Lozano & Afanasjeva (2023), quienes indican que el biochar mejora la retención de nutrientes, la actividad microbiana y la fertilidad del suelo; además, Pentón-Fernández et al. (2021) señalan que el biochar enriquecido con microorganismos eficientes puede favorecer la floración, el desarrollo de frutos y la reproducción de las plantas.

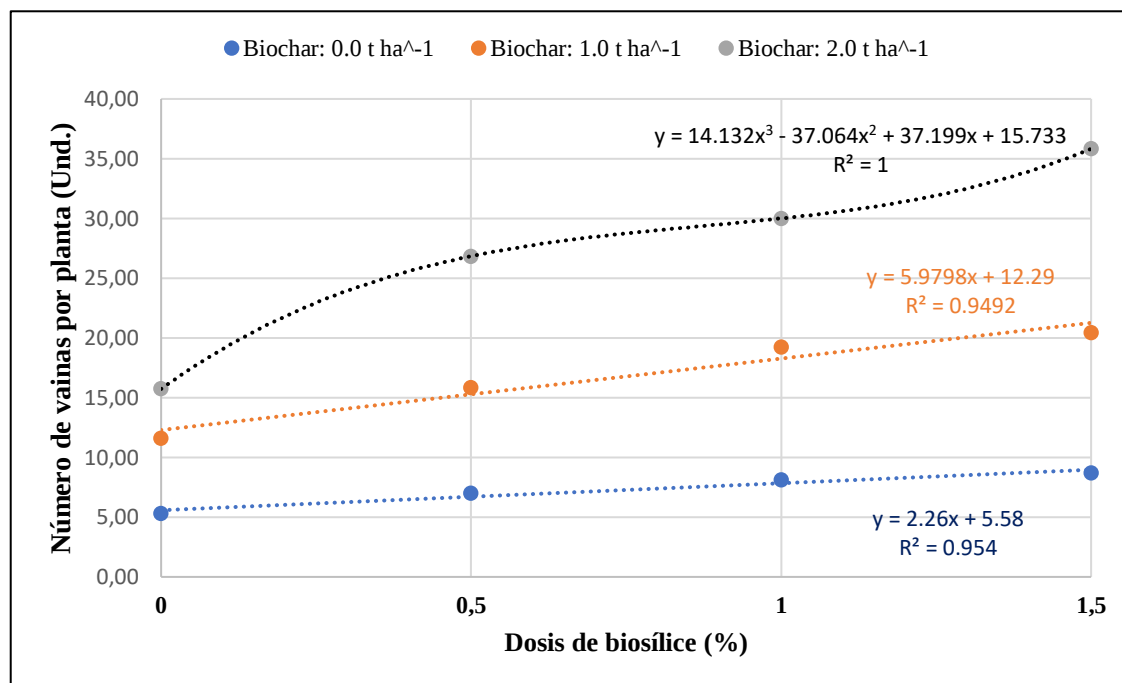
Al comparar el número de vainas por planta con antecedentes agronómicos del cultivo de haba, los estudios se asumieron solo como referentes externos de magnitud productiva, no como comparación directa de tratamientos. Cancho Cuba (2021) reportó en Canaán, Ayacucho rangos frecuentes de 8 a 12 vainas por planta, mientras que INIA (2007) en la variedad 417-Hinán Carmen registra 27 vainas por planta. Frente a estos referentes, los valores obtenidos en la presente investigación, entre 5.30 y 35.83 vainas por planta, fueron inferiores en los tratamientos de menor respuesta y superiores en el valor máximo registrado, lo que evidencia una respuesta productiva favorable bajo las condiciones edafoclimáticas de Huamanguilla.

La figura 3.11 evidencia una tendencia lineal y cúbica positiva entre la dosis de biosílice y el número de vainas por planta de haba en los niveles de biochar evaluados, lo que indica que el incremento de la biosílice favoreció la formación de vainas dentro del rango experimental estudiado. En ausencia de biochar, el modelo de regresión fue $y = 2.26x + 5.58$, con un coeficiente de determinación de $r^2 = 0.9547$, lo cual señala que el 95.47 % de la variación observada en el número de vainas fue explicada por la dosis de biosílice. Con la aplicación de 1.0 t ha^{-1} de biochar, el modelo $y = 5.9798x + 12.29$ presentó un $r^2 = 0.9492$, explicando el 94.92 % de la variación observada, se presentó los valores más altos de número de vainas y la mayor pendiente del modelo, equivalente a 5.9798, lo que

indica que por cada incremento porcentual de biosílíce el número de vainas por planta aumentó aproximadamente en 5.98 unidades.

Figura 3.11.

Modelos de regresión del comportamiento de número de vainas por planta de haba, bajo el efecto de las dosis de biosílíce en cada dosis de biochar.



Con 2.0 t ha⁻¹ de biochar, el número de vainas por planta de haba presentó un comportamiento curvilíneo descrito por un modelo de regresión cúbico, cuya ecuación fue $y = 14.132x^3 - 37.064x^2 + 37.199x + 15.733$, donde x representa la dosis de biosílíce, y el número estimado de vainas por planta. El coeficiente de determinación fue $r^2 = 1.00$, lo que indica que el modelo se ajustó el 100% completamente a los puntos evaluados dentro del rango experimental estudiado. Según la ecuación, el número estimado de vainas fue de 15.73 sin biosílíce, 26.83 con 0.5 %, 30.00 con 1.0 % y 35.83 con 1.5 % de biosílíce. Aunque la respuesta general fue creciente, el incremento no fue uniforme, ya que entre 0.5 % y 1.0 % la curva mostró una menor tasa de aumento, mientras que entre 1.0 % y 1.5 % volvió a incrementarse con mayor intensidad. Por ello, este modelo cúbico permite describir mejor la respuesta del cultivo frente a la biosílíce cuando se aplicó 2.0 t ha⁻¹ de biochar; sin embargo, su interpretación debe limitarse a las dosis evaluadas, sin extrapolar a niveles mayores.

3.5. Longitud de vaina (cm)

En la tabla 3.5 se observa significación para los tratamientos, efectos principales de las dosis de biochar y biosílice, así como para la interacción. Adquiere mayor importancia el efecto combinado de los factores e implica que las dosis de ambos no actúan de forma independiente, sino de manera dependiente y genera mejores efectos sobre el número de vainas en condiciones edafoclimáticas de Huamanguilla.

Tabla 3.5.

Análisis de varianza de longitud de vainas de haba, bajo el efecto de las dosis de biochar y biosílice

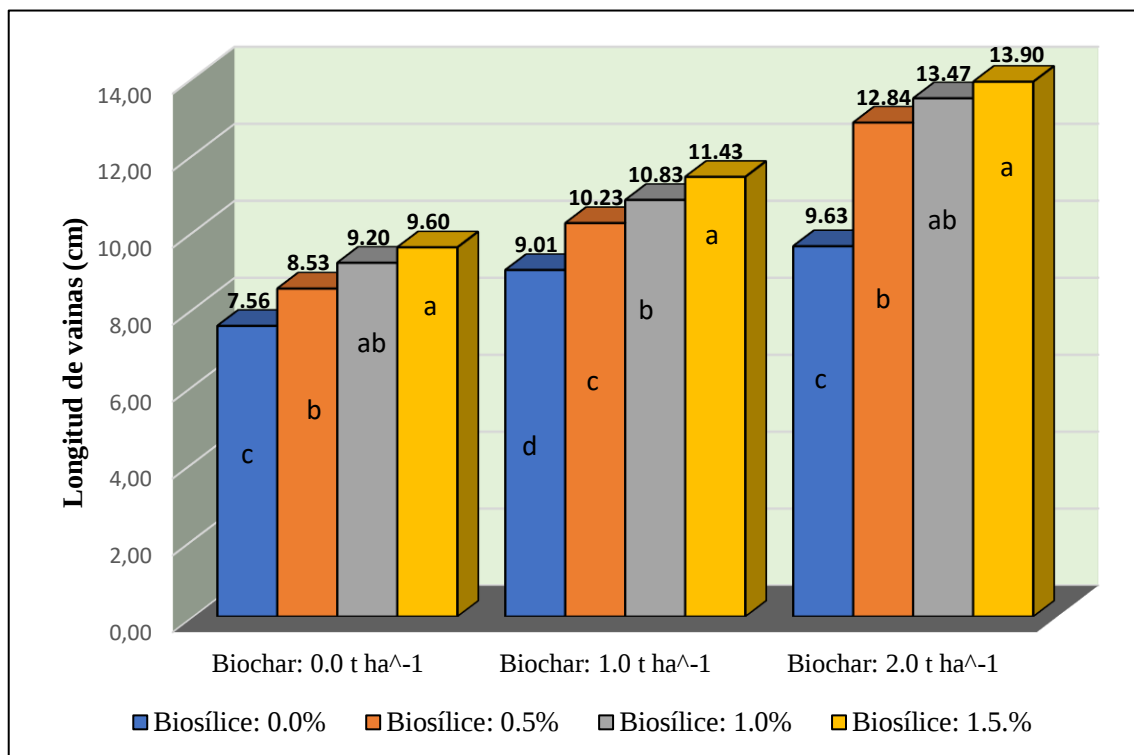
Fuentes de variación	G.L.	S.C.	C.M.	Fc	P - Valor
Bloque	2	0.320	0.160	1.498	0.2448 ns
Tratamientos	11	134.590	12.235	114.545	< 0.0001**
Dosis biochar (B)	2	84.110	42.055	393.706	< 0.0001**
Dosis biosílice (b)	3	43.870	14.623	136.899	< 0.0001**
Interacción (B*b)	6	6.610	1.102	10.313	< 0.0001**
Biosílice en biochar 0.0 t ha⁻¹					
R. lineal	1	6.909	6.909	64.680	<0.0001**
R. cuadrática	1	0.247	0.247	2.312	0.1426ns
R. cúbica	1	0.0001	0.0001	0.002	0.9626ns
Biosílice en biochar 1.0 t ha⁻¹					
R. lineal	1	9.314	9.314	87.195	<0.0001**
R. cuadrática	1	0.295	0.295	2.762	0.1107ns
R. cúbica	1	0.059	0.059	0.552	0.4652ns
Biosílice en Biochar 2.0 t ha⁻¹					
R. lineal	1	27.055	27.055	253.281	<0.0001**
R. cuadrática	1	5.755	5.755	53.877	<0.0001**
R. cúbica	1	0.847	0.847	7.929	0.0100*
Error	22	2.350	0.107		
Total	35	137.26			
CV (%):	3.1				

Nota. No significativo (ns), significativo (*), altamente significativo (**)

El coeficiente de variabilidad es de 3.1%, lo que indica alta precisión y confiabilidad de los resultados. Esta tabla también muestra los modelos de regresión, en la que se verifica que sin la aplicación de biochar (0.0 t ha⁻¹) y con una dosis 1.0 t ha⁻¹, existe significación para el modelo lineal y con la aplicación de 2.0 t ha⁻¹, fueron significativas los modelos de tipo lineal, cuadrático y cubico para el número de vainas por planta de haba.

Figura 3.12.

Prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$) de los efectos simples de las dosis biosílice en cada dosis de biochar en la longitud de vainas de haba



La figura 3.12 en la prueba de Duncan muestra que la longitud de vainas de haba aumentó conforme se incrementaron las dosis de biosílice en cada nivel de biochar evaluado. En ausencia de biochar, la longitud de vainas pasó de 7.56 cm sin biosílice a 9.60 cm con 1.5 % de biosílice, siendo esta última la mayor respuesta dentro de dicho nivel. Con 1.0 t ha⁻¹ de biochar, se observó un incremento progresivo y estadísticamente diferenciado entre dosis, desde 9.01 cm sin biosílice hasta 11.43 cm con 1.5 % de biosílice. La mayor longitud de vainas se obtuvo con 2.0 t ha⁻¹ de biochar, donde la dosis de 1.5 % de biosílice alcanzó 13.90 cm, valor que se ubicó en el grupo estadístico superior. En conjunto, los resultados evidencian que la combinación de 2.0 t ha⁻¹ de biochar y 1.5 % de biosílice favoreció la mayor expresión de longitud de vainas en el cultivo de haba bajo las condiciones edafoclimáticas de Huamanguilla.

Estos resultados coinciden con Poormansour & Razzaghi (2018), Tadesse et al. (2025) y Mohamed et al. (2017), quienes reportaron que el biochar mejora el número de vainas, el rendimiento, la nodulación, la disponibilidad de nutrientes y la fertilidad del suelo en

haba. Asimismo, se relacionan con Al-Mishyyikh & Jarallah (2024), quienes encontraron que el biochar incrementó el crecimiento y rendimiento del haba al mejorar la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico del suelo. Por tanto, el incremento observado en la longitud de vainas puede explicarse por una mejor nutrición y mayor eficiencia del sistema radicular bajo aplicación de biochar.

Cartagena Gamboa (2025) que reporta que a dosis alta de biosílíce foliar (1.0%), obtuvo el mayor crecimiento longitudinal de bulbo de cebolla en 8.81 cm sin diferencias con la dosis intermedia (0.5%) en 8.75 cm. Respecto a la biosílíce, los resultados guardan relación con Shoman y Bughdady (2020) y Hafez et al. (2021), quienes señalaron que el silicio favorece el crecimiento, la formación de vainas, la absorción de nutrientes y el rendimiento del haba. De igual manera, antecedentes en otras leguminosas, como los de Ismail et al. (2022) y Queiroz et al. (2025), confirman que el silicio mejora el peso de vaina, la eficiencia fisiológica y el rendimiento bajo condiciones de estrés.

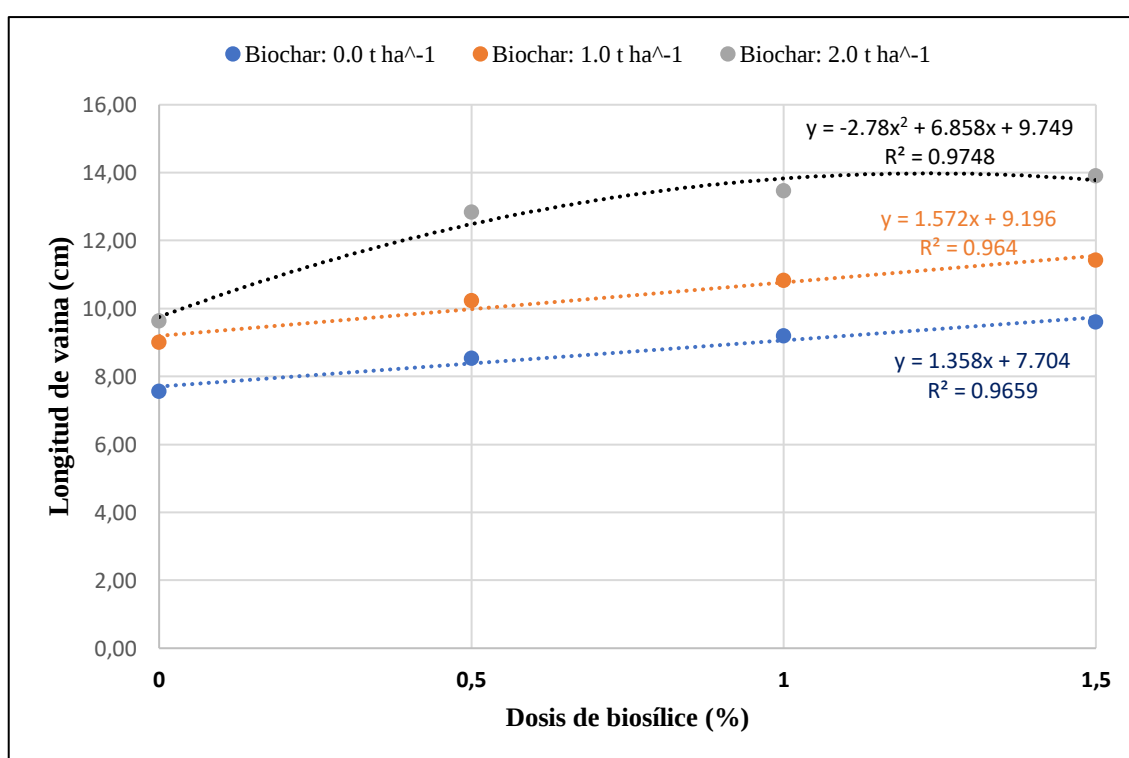
Al comparar la longitud de vainas con antecedentes agronómicos del cultivo de haba, estos estudios se asumieron como referentes externos de magnitud productiva, no como comparación directa de tratamientos, debido a que no evaluaron biochar ni biosílíce, sino cultivares, variedades y densidades de plantación. Cancho Cuba (2021) reportó longitudes de 6.8 a 11.6 cm en 45 cultivares de haba evaluados en Canaán, mientras que Tineo Mendoza (2011) registró valores de 10.04 a 11.91 cm en diez variedades evaluadas en Allpachaka y Ataupillco Jorge (2025), obtuvo 16.97 cm de longitud de vaina en la colección boliviana evaluada en Tambo, Ayacucho. Frente a estos referentes, los valores obtenidos en la presente investigación, entre 7.56 y 13.90 cm, superaron los rangos frecuentes reportados por Cancho Cuba y Tineo Mendoza, aunque fueron inferiores al valor máximo de Ataupillco Jorge.

La figura 3.13 evidencia una tendencia lineal positiva entre la dosis de biosílíce y la longitud promedio de vainas de haba en los dos niveles de biochar evaluados, lo que indica que el incremento de la biosílíce se asoció con un mayor desarrollo longitudinal de las vainas dentro del rango experimental estudiado. En ausencia de biochar, el modelo de regresión fue $y = 1.358x + 7.704$, con un coeficiente de determinación de $r^2 = 0.9659$, lo cual señala que el 96.59 % de la variación observada en la longitud de vaina fue explicada por la dosis de biosílíce. Por su parte, con la aplicación de 1.0 t ha^{-1} de biochar, el modelo

$y = 1.572x + 9.196$ presentó un $r^2 = 0.9640$, explicando el 96.40 % de la variación observada. Asimismo, este tratamiento registró los valores más altos de longitud promedio de vaina y la mayor pendiente del modelo, equivalente a 1.572, lo que indica que por cada incremento de un porcentual de biosílíce la longitud de vaina aumentó aproximadamente en 1.57 cm, mientras que sin biochar el incremento estimado fue de 1.36 cm.

Figura 3.13.

Modelo de regresión del comportamiento de longitud promedio de vainas de haba, bajo el efecto de las dosis de biosílíce en cada dosis de biochar.



Bajo la aplicación de 2.0 t ha⁻¹ de biochar, la longitud promedio de vainas de haba presentó un comportamiento curvilíneo descrito por un modelo de regresión cuadrático, cuya ecuación fue $y = -2.78x^2 + 6.858x + 9.749$. El coeficiente de determinación fue $r^2 = 0.9748$, lo que indica que el modelo explicó el 97.48 % de la variación observada en la longitud de vaina dentro del rango experimental evaluado. Según la ecuación, la longitud estimada fue de 9.75 cm sin biosílíce, 12.48 cm con 0.5 %, 13.83 cm con 1.0 % y 13.78 cm con 1.5 % de biosílíce. Aunque la respuesta general fue favorable con el incremento de biosílíce, el aumento no fue constante, debido a que la curva mostró una tendencia

creciente hasta aproximadamente 1.23 % de biosíllice, punto en el cual se alcanzó una longitud máxima estimada cercana a 13.98 cm; posteriormente, la respuesta tendió a estabilizarse o disminuir ligeramente.

3.6. Diámetro de vaina (cm)

La información sobre esta variable fue sometido a transformación cuadrática (Y^2) con la finalidad de ajustar su normalidad y homogeneidad de varianzas, requisito indispensable para el análisis paramétrico de los datos.

La tabla 3.6 del ANVA, reporta que las fuentes de variación resultaron altamente significativas, lo que implica que al menos una de las dosis tuvo efecto diferenciado en el diámetro de las vainas de haba. No obstante, no hubo respuesta estadística en la interacción lo que sugiere un efecto independiente de las dosis de biochar y biosíllice.

Tabla 3.6.

Análisis de varianza del diámetro promedio de vainas de haba, bajo el efecto de las dosis de biochar y biosíllice

Fuentes de variación	G.L.	S.C.	C.M.	Fc	P - Valor
Bloque	2	5.340	2.670	1.422	0.2625 ns
Tratamientos	11	269.450	24.495	13.048	< 0.0001**
Dosis biochar (B)	2	181.910	90.955	48.451	< 0.0001**
Dosis biosíllice (b)	3	79.990	26.663	14.203	< 0.0001**
Interacción (B*b)	6	7.550	1.258	0.670	0.6743 ns
Biosíllice en biochar 0.0 t ha⁻¹					
R. lineal	1	6.909	6.909	3.680	0.0049**
R. cuadrática	1	0.247	0.247	0.132	0.5138 ns
R. cúbica	1	0.000	0.000	0.000	0.5422 ns
Biosíllice en biochar 1.0 t ha⁻¹					
R. lineal	1	9.314	9.314	4.961	0.0022**
R. cuadrática	1	0.295	0.295	0.157	0.003**
R. cúbica	1	0.059	0.059	0.031	0.4463 ns
Biosíllice en biochar 2.0 t ha⁻¹					
R. lineal	1	27.055	27.055	14.412	0.0037**
R. cuadrática	1	5.755	5.755	3.066	0.2135 ns
R. cúbica	1	0.847	0.847	0.451	0.6622 ns
Error	22	41.300	1.877		
Total	35	316.09			
CV (%):	17.61				

Nota. No significativo (ns), significativo (*), altamente significativo (**), variable transformada ($\sqrt{Y}$)

El coeficiente de variabilidad es de 17.61%, lo que indica una relativa variación de los datos, pero, aun así, es aceptable a nivel de campo. El análisis estadístico de los modelos de regresión, reporta que sin la aplicación de biochar 0.0 t ha^{-1} , se encontró respuesta a la tendencia lineal; mientras, que con la aplicación de 1.0 t ha^{-1} de biochar, fueron significativas las tendencias lineal y cuadrática. Finalmente, a una dosis de 2.0 t ha^{-1} , el modelo que más se ajusta es la tendencia lineal en el diámetro de vainas del cultivo del haba.

La figura 3.14 muestra la prueba de comparación de promedios de Duncan para el diámetro promedio de vainas de haba. En la aplicación de biosílice, el testigo registró el menor diámetro con 2.29 cm, ubicándose en el grupo estadístico “b”; mientras que las dosis de 0.5 %, 1.0 % y 1.5 % alcanzaron valores de 2.87; 2.95 y 2.99 cm, respectivamente, todas ubicadas en el grupo “a”, lo que indica que fueron estadísticamente similares entre sí, pero superiores al testigo. Por otro lado, en biochar, el testigo presentó el menor valor con 2.30 cm, seguido por la dosis de 1.0 t ha^{-1} con 2.70 cm, y la dosis de 2.0 t ha^{-1} con 3.28 cm, mostrando una respuesta creciente y estadísticamente diferenciada. En conjunto, los resultados sugieren que ambos insumos favorecieron el incremento del diámetro de las vainas; sin embargo, el biochar mostró una tendencia más progresiva, destacando la dosis de 2.0 t ha^{-1} como el tratamiento con mayor efecto sobre esta variable.

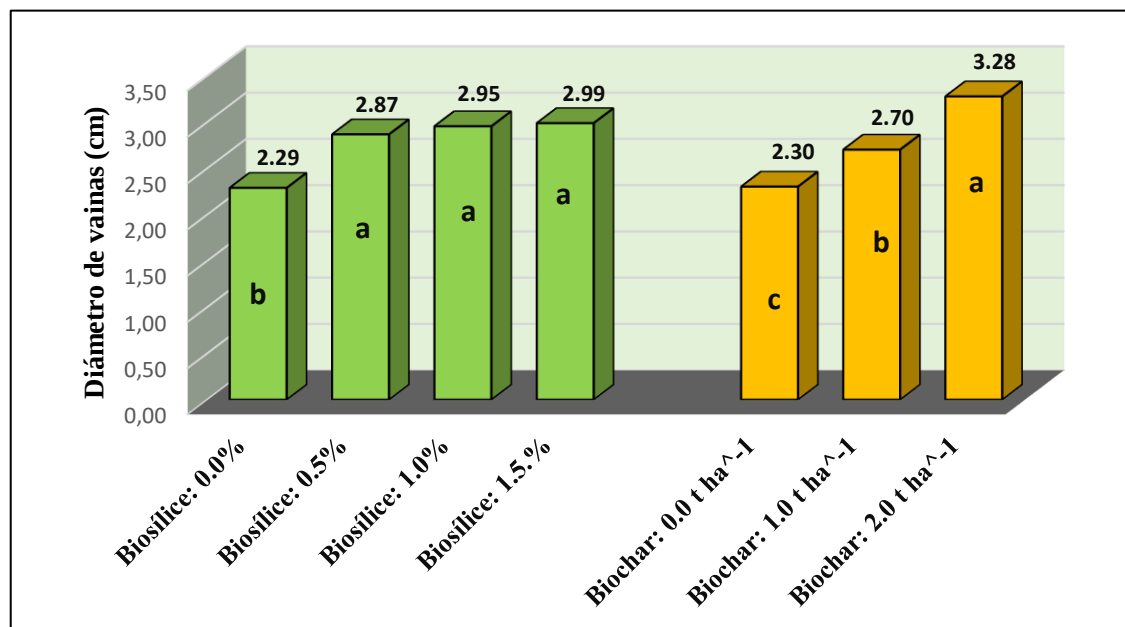
Los resultados con dosis de biosilice coincide con Shoman & Bughdady (2020), quienes reportaron que el silicio foliar mejoró el crecimiento, la formación de vainas, el peso de semillas y el rendimiento en haba; asimismo, Roca Molina (2024) en Ayacucho, encontró que la aplicación de altas dosis de biosílice (0.150% Si), boro (0.025% B) y zinc (0.025% Zn) favoreció un incremento en el diámetro ecuatorial (35.51 mm) y el diámetro polar (33.45 mm) del tomate cherry (*Lycopersicum esculentum*) var. cerasiforme, en comparación con los tratamientos que recibieron dosis más bajas de biosilice. Hafez et al. (2021) señalaron que el silicato de potasio, especialmente combinado con rizobacterias, favoreció la nodulación, absorción de nutrientes y productividad del cultivo de haba. Por otro lado, con dosis de biochar concuerda con Poormansour & Razzaghi (2018), Tadesse et al. (2025) y Al-Mishyyikh & Jarallah (2024), quienes evidenciaron que el biochar

mejora componentes productivos del haba, como número de vainas, biomasa, rendimiento y fertilidad del suelo.

Al comparar el diámetro de vainas con referentes agronómicos del cultivo de haba, los antecedentes se asumieron como referencias externas y no como comparación directa. Tineo Mendoza (2011), en Allpachaka, Ayacucho, reportó valores de ancho de vaina entre 1.72 y 1.92 cm; mientras que el INIA (2012), para la variedad haba INIA 429 - Fortaleza, registró un ancho promedio de vaina de 2.25 cm, Cancho Cuba (2021): en Canaán, Ayacucho, al caracterizar 45 cultivares de haba, reportó anchos de vaina entre 1.4 y 2.6 cm, valores que sirven como referencia local para comparar el comportamiento del cultivo. Frente a ello, los valores obtenidos en la presente investigación, entre 2.29 y 3.28 cm, fueron superiores a dichos referentes, lo que sugiere que la aplicación de biosílce y, principalmente, biochar favoreció el mayor desarrollo transversal de las vainas.

Figura 3.14.

Prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$) de los efectos principales de las dosis de biochar y biosílce en diámetro promedio de vainas de haba

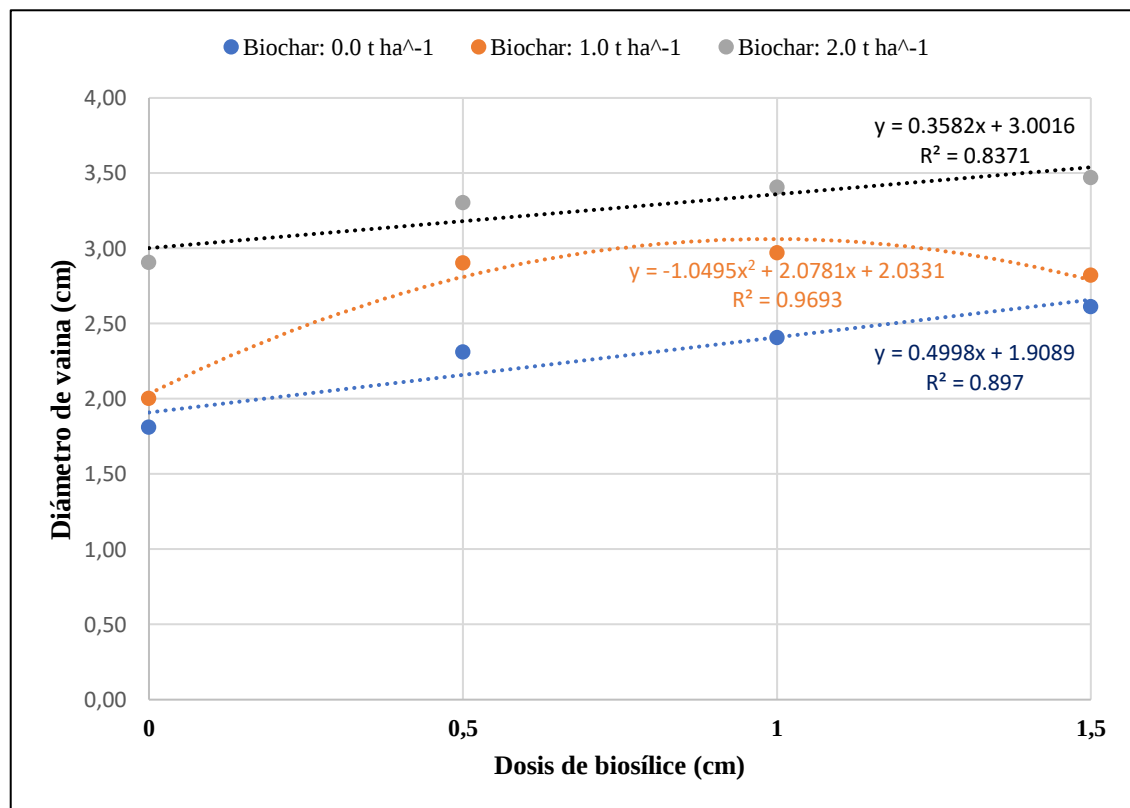


La figura 3.15 presenta los modelos de regresión lineal y cuadrática positiva entre las dosis de biosílce y el diámetro promedio de vainas de haba en ambos niveles de biochar. Sin biochar, la ecuación $y = 0.4998x + 1.9089$ presentó un $r^2 = 0.8976$, indicando que el

modelo explicó el 89.76 % de la variabilidad; además, por cada unidad de incremento de biosílce, el diámetro aumentó aproximadamente 0.50 cm. Bajo la aplicación de 1.0 t ha⁻¹ de biochar, el diámetro promedio de vainas de haba presentó un comportamiento curvilíneo descrito por un modelo de regresión cuadrático, cuya ecuación fue $y = -1.0495x^2 + 2.0781x + 2.0331$. El coeficiente de determinación fue $r^2 = 0.9693$, lo que indica que el modelo explicó el 96.93 % de la variación observada en el diámetro de vaina dentro del rango experimental evaluado.

Figura 3.15.

Modelo de regresión del comportamiento del diámetro promedio de las vainas de haba, bajo el efecto de las dosis biosílce en cada dosis de biochar.



Según la ecuación, el diámetro estimado fue de 2.03 cm sin biosílce, 2.81 cm con 0.5 %, 3.06 cm con 1.0 % y 2.79 cm con 1.5 % de biosílce. Aunque la respuesta general fue favorable con el incremento de biosílce, el aumento no fue constante, debido a que la curva mostró una tendencia creciente hasta aproximadamente 0.99 % de biosílce, punto en el cual se alcanzó un diámetro máximo estimado cercano a 3.06 cm; posteriormente, la respuesta tendió a estabilizarse o disminuir ligeramente. Con 2.0 t ha⁻¹ de biochar, la

ecuación $y = 0.3582x + 3.0016$ obtuvo un $r^2 = 0.8371$, explicando el 83.71 % de la variabilidad, con un incremento estimado de 0.36 cm por cada unidad de biosílce. En conjunto, los resultados indican que la biosílce favoreció el aumento progresivo del diámetro de vaina, mientras que el biochar elevó el diámetro inicial, mostrando un efecto base más marcado sobre esta variable.

3.7. Número de granos por vaina

La tabla 3.7 de ANVA muestra que el número de granos promedio por vaina fue influenciado significativamente por los tratamientos evaluados, debido a que los efectos de dosis de biochar y dosis de biosílce presentaron significancia estadística alta. Asimismo, la interacción biochar x biosílce no fue significativa, lo que indica que ambos factores actuaron de manera independiente sobre esta variable.

Tabla 3.7.

Análisis de varianza del número de granos promedio por vaina, bajo el efecto de las dosis de biochar y biosílce.

Fuentes de variación	G.L.	S.C.	C.M.	Fc	P - Valor
Bloque	2	0.170	0.085	0.416	0.6703 ns
Tratamientos	11	12.080	1.098	5.369	0.0004**
Dosis biochar (B)	2	5.170	2.585	12.638	0.0002**
Dosis biosílce (b)	3	6.080	2.027	9.908	0.0002**
Interacción (B*b)	6	0.830	0.138	0.676	0.6681 ns
Biosílce en biochar 0.0 t ha⁻¹					
R. lineal	1	0.820	0.820	4.009	0.0582 ns
R. cuadrática	1	0.080	0.080	0.391	0.5299 ns
R. cúbica	1	0.020	0.020	0.098	0.7780 ns
Biosílce en biochar 1.0 t ha⁻¹					
R. lineal	1	1.670	1.670	8.164	0.0092**
R. cuadrática	1	0.330	0.330	1.613	0.2151 ns
R. cúbica	1	0.000	0.000	0.000	0.999 ns
Biosílce en biochar 2.0 t ha⁻¹					
R. lineal	1	2.400	2.400	11.733	0.0024**
R. cuadrática	1	1.330	1.330	6.502	0.0181 *
R. cúbica	1	0.270	0.270	1.320	0.2658 ns
Error	22	4.500	0.205		
Total	35	16.75			
CV (%):	20.1				

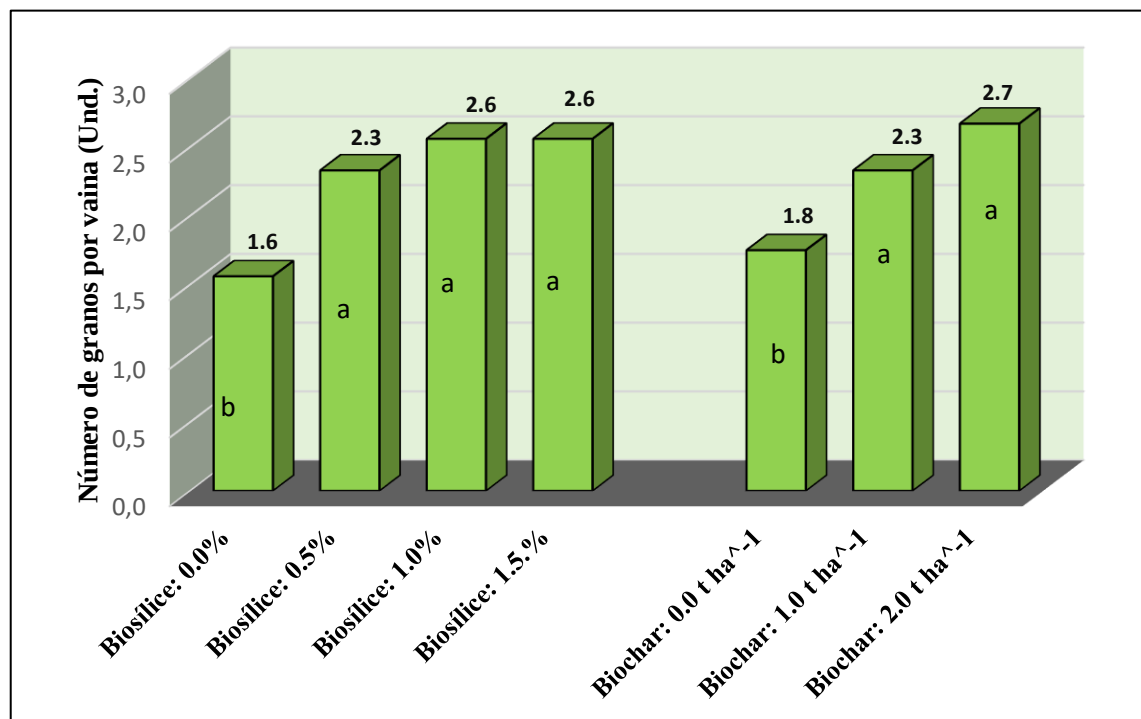
Nota. No significativo (ns), significativo (*), altamente significativo (**)

En el análisis de regresión, con 0.0 t ha⁻¹ de biochar no se observaron efectos significativos de la biosílice; sin embargo, con 1,0 t ha⁻¹ predominó una respuesta lineal significativa, y con 2.0 t ha⁻¹ se evidenciaron respuestas lineales y cuadrática, indicando que el número de granos por vaina tendió a variar según el incremento de biosílice, especialmente bajo mayores dosis de biochar.

El coeficiente de variabilidad fue de 20.1 %, considerado aceptable para condiciones experimentales agrícolas.

Figura 3.16.

Prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$) de los efectos principales de las dosis de biochar y biosílice en número de granos promedio por vaina.



La figura 3.16 muestra la prueba de Duncan que la aplicación de biosílice y biochar influyó en el número de granos promedio por vaina. En biosílice, el testigo presentó el menor valor con 1.6 granos por vaina, ubicándose en el grupo estadístico “b”, mientras que las dosis de 0.5 %, 1.0 % y 1.5 % alcanzaron 2.3; 2.6 y 2.6 granos por vaina, respectivamente, todas en el grupo “a”. Esto indica que las dosis de biosílice fueron estadísticamente similares entre sí, pero superiores al testigo. En biochar, el testigo registró 1,8 granos por vaina y se ubicó en el grupo “b”, mientras que las dosis de 1.0 y

2.0 t ha⁻¹ alcanzaron 2.3 y 2.7 granos por vaina, respectivamente, ambas en el grupo “a”. En conjunto, los resultados evidencian que ambos insumos favorecieron el número de granos por vaina, destacando la dosis de 2.0 t ha⁻¹ de biochar por presentar el mayor promedio.

Se observa que los valores obtenidos en la presente investigación, entre 1.6 y 2.7 granos por vaina, fueron cercanos a los reportados por Tadesse et al. (2025), quienes registraron 2.78 semillas por vaina con 10 t ha⁻¹ de biocarbón en Etiopía. Sin embargo, fueron inferiores a los resultados de Hafez et al. (2021), quienes obtuvieron entre 5.2 y 6.8 semillas por vaina con silicato de potasio combinado con rizobacterias en Egipto. Estas diferencias podrían atribuirse a las condiciones edafoclimáticas, dosis aplicadas, manejo agronómico, la variedad de haba y tipo de enmienda utilizada.

Al comparar con referentes agronómicos asumiendo como referencias comparativas externas y no como comparación directa de haba en Ayacucho, los valores de la presente investigación, entre 1.6 y 2.7 granos por vaina, fueron cercanos e incluso parcialmente superiores a los reportados por Tineo Mendoza (2011) en Allpachaka, quien reportó entre 1.91 y 2.19 granos por vaina. Sin embargo, fueron inferiores a los valores registrados por Ataupillco Jorge (2025) en Tambo, La Mar, quien reportó 4.78 semillas por vaina en la colección boliviana.

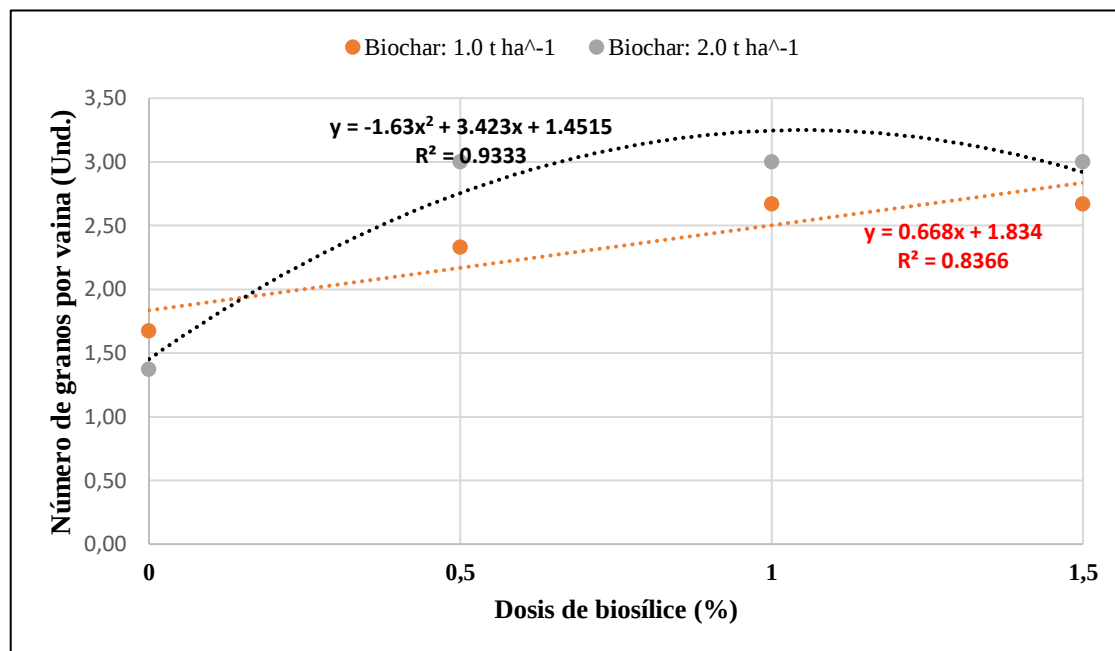
La figura 3.17 muestra que el número promedio de granos por vaina de haba presentó una respuesta diferenciada frente a las dosis de biosílíce, según el nivel de biochar aplicado. Con 1.0 t ha⁻¹ de biochar, relación lineal positiva, descrita por el modelo $y = 0.668x + 1.834$, con un $r^2 = 0.8366$, lo que indica que el modelo explicó el 83.66 % de la variación observada. Bajo este tratamiento, la biosílíce favoreció un incremento progresivo en el rango evaluado del número estimado de granos por vaina, pasando de 1.83 granos sin biosílíce a 2.84 granos con 1.5 % de biosílíce.

Por otro lado, con 2.0 t ha⁻¹ de biochar, la respuesta fue un modelo cuadrático, cuya ecuación fue $y = -1.632x^2 + 3.423x + 1.4515$, con un $r^2 = 0.9333$, explicando el 93.33 % de la variación observada. En este caso, el número estimado de granos aumentó hasta alcanzar un punto máximo aproximado de 3.25 granos por vaina alrededor de 1.05 % de biosílíce, punto óptimo del modelo estimado; posteriormente, la respuesta tendió a

disminuir ligeramente. En conjunto, los resultados indican que con 1.0 t ha⁻¹ de biochar la respuesta fue progresiva, mientras que con 2.0 t ha⁻¹ se obtuvo una mayor respuesta productiva, limitada a un nivel óptimo de biosílíce.

Figura 3.17.

Modelo de regresión del comportamiento del número de granos promedio de las vainas de haba, bajo el efecto de las dosis de biosílíce en cada dosis de biochar.



3.8. Peso de 100 semillas (g)

En la tabla 3.8 del ANVA, se muestra respuesta significativa para los tratamientos y efectos principales de las dosis del biochar y biosílíce; sin embargo, no hubo respuesta estadística en la interacción lo que significa, que las dosis de biochar y biosílíce actúan de forma independiente y permite la comparación de las medias en función de los efectos principales. El coeficiente de variabilidad de 1.63% indica una buena precisión y confiabilidad de los resultados encontrados. La misma tabla muestra los modelos de regresión y se verifica que sin biochar, pero en presencia de biosílíce, la tendencia es lineal ascendente; sin embargo, la aplicación de 1.0 y 2.0 t ha⁻¹ de biochar, fueron significativas en los modelos lineal y cuadrático en el peso de cien semillas de haba verde.

Tabla 3.8.

Análisis de varianza del peso de 100 semillas promedio de haba verde, bajo el efecto de las dosis de biochar y biosílíce.

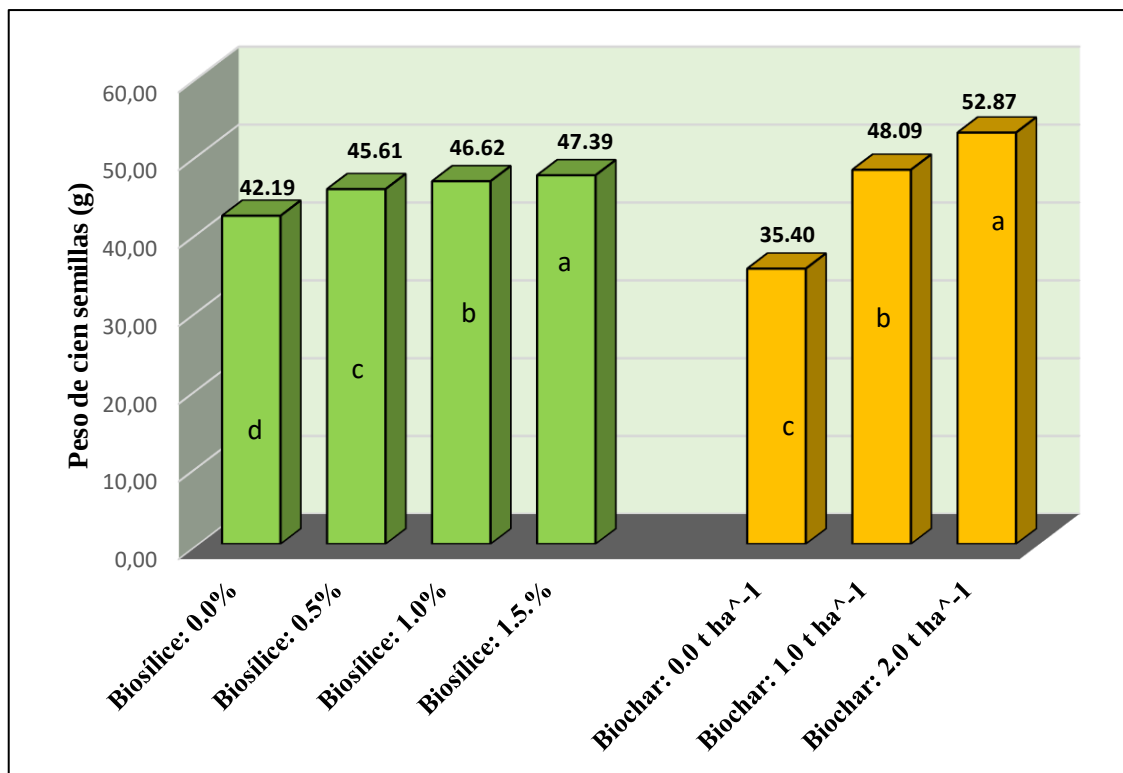
Fuentes de variación	G.L.	S.C.	C.M.	Fc	P - Valor
Bloque	2	52338.890	26169.445	4.743	0.0194*
Tratamientos	11	21046163.890	1913287.626	346.740	<0.0001**
Dosis biochar (B)	2	19558538.890	9779269.445	1772.272	<0.0001**
Dosis biosílíce (b)	3	1421475.000	473825.000	85.870	<0.0001**
Interacción (B*b)	6	66150.000	11025.000	1.998	0.1094 ns
Biosílíce en biochar 0.0 t ha⁻¹					
R. lineal	1	277440.000	277440.000	50.280	<0.0001**
R. cuadrática	1	16133.330	16133.330	2.924	0.1014ns
R. cúbica	1	426.670	426.670	0.077	0.7836ns
Biosílíce en biochar 1.0 t ha⁻¹					
R. lineal	1	351135.000	351135.000	63.635	<0.0001**
R. cuadrática	1	78408.330	78408.330	14.210	0.0011**
R. cúbica	1	14415.000	14415.000	2.612	0.1203ns
Biosílíce en biochar 2.0 t ha⁻¹					
R. lineal	1	657306.670	657306.670	119.122	<0.0001**
R. cuadrática	1	80033.330	80033.330	14.504	0.0010**
R. cúbica	1	12326.670	12326.670	2.234	0.1492ns
Error	22	121394.440	5517.929		
Total	35	21219897.22			
CV (%):	1.63				

Nota. No significativo (ns), significativo (*), altamente significativo (**)

En la figura 3.18, la prueba de Duncan mostró diferencias estadísticas entre los niveles evaluados de biosílíce y biochar en el peso de 100 semillas de haba verde. En el caso de la biosílíce, se observó una tendencia creciente, donde la dosis de 1.5 % alcanzó el mayor promedio con 47.39 g, superando al testigo, que obtuvo 42.19 g, en 5.20 g. Asimismo, todas las dosis de biosílíce se diferenciaron estadísticamente entre sí, lo cual indica que el aumento gradual de este insumo generó una mejora progresiva en el peso de las semillas. Por otro lado, el biochar presentó un efecto más pronunciado, ya que la dosis de 2.0 t ha⁻¹ obtuvo el mayor valor con 52.87 g, superando al testigo, que registró 35.40 g, en 17.47 g. Estos resultados evidencian que ambos insumos favorecieron el peso de 100 semillas; sin embargo, el biochar mostró una mayor influencia en comparación con la biosílíce bajo las condiciones evaluadas.

Figura 3.18.

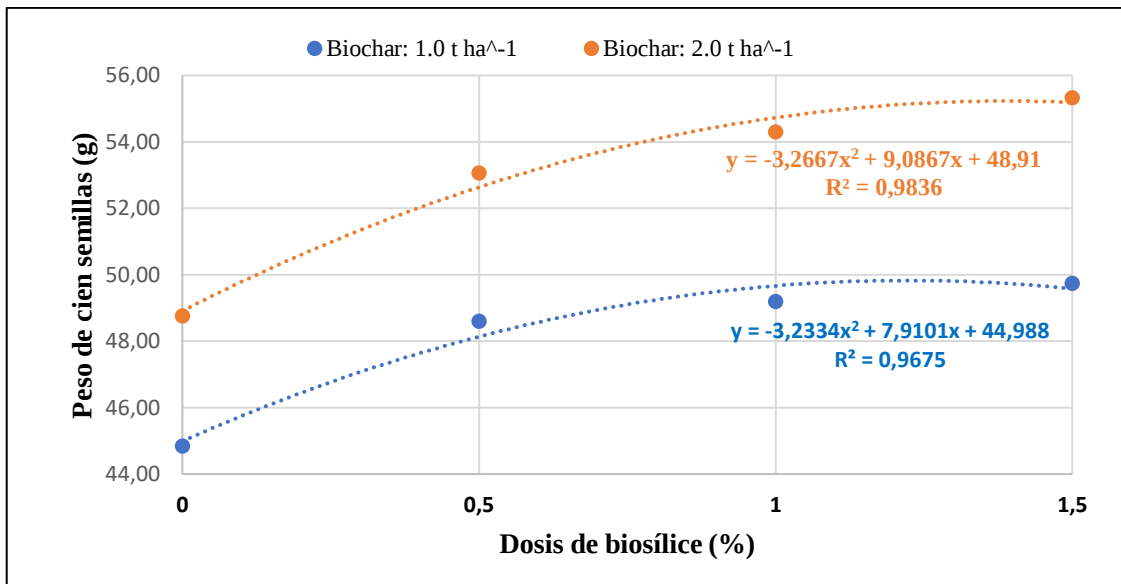
Prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$) de los efectos principales de las dosis de biochar y biosíllice en peso de 100 semillas de haba verde.



Reportado por Tadesse et al. (2025), quienes obtuvieron 97.19 g en peso de 100 semillas de haba con 10 t ha⁻¹ de biocarbón, y también menor que Mohamed et al. (2017), quienes registraron 91.73 g en peso de 100 semillas de haba con 80 g de biochar por maceta más micronutrientes. En cuanto a la biosíllice, el mayor valor fue 47.39 g en peso de 100 semillas de haba verde con 1.5 %, resultado inferior a lo señalado por Shoman & Bughdady (2020), quienes alcanzaron 71.5 g en peso de 100 semillas de haba con 300 ppm de silicio foliar, y por Hafez et al. (2021), quienes reportaron entre 59.3 y 85.5 g en peso de 100 semillas de haba con silicato de potasio combinado con rizobacterias.

Figura 3.19.

Modelos de regresión del comportamiento de peso de 100 semillas de haba verde, bajo el efecto de las dosis de biosilíce en cada dosis de biochar.



En la figura 3.19 se observa que el peso de 100 semillas de haba verde presentó una respuesta curvilínea frente al incremento de las dosis de biosilíce, bajo la aplicación de 1,0 y 2,0 t ha⁻¹ de biochar. Para la dosis de 1.0 t ha⁻¹ de biochar, el modelo cuadrático fue $y = -3,2334x^2 + 7,9101x + 44,988$, con un coeficiente de determinación $r^2 = 0,9675$, lo que indica un alto ajuste del modelo a los valores observados. En este tratamiento, el peso estimado aumentó de 44.99 g, sin biosilíce, hasta un valor máximo aproximado de 49.83 g, alcanzado alrededor de 1.22 % de biosilíce; luego, la respuesta tendió a estabilizarse con una ligera reducción hacia la dosis de 1.5 %. Para la dosis de 2.0 t ha⁻¹ de biochar, la ecuación fue $y = -3,2667x^2 + 9,0867x + 48,91$, con un $r^2 = 0,9836$, evidenciando también un ajuste elevado. En este caso, el peso estimado se incrementó de 48.91 g hasta un máximo aproximado de 55.23 g, ubicado alrededor de 1.39 % de biosilíce, mostrando que la combinación de mayor dosis de biochar con niveles crecientes de biosilíce favoreció el peso de las semillas. Sin embargo, la forma cuadrática de ambos modelos sugiere que el incremento no fue lineal, sino que la ganancia tendió a reducirse conforme se aproximó a las dosis más altas evaluadas.

3.9. Porcentaje de materia seca del grano (%)

En la tabla 3.9 de ANVA de la materia seca de los granos de haba, bajo el efecto de las dosis de biochar y biosílíce. Los bloques no fueron significativos, por lo que no influyeron en los resultados. En cambio, los tratamientos presentaron diferencias altamente significativas, lo que demuestra que las combinaciones evaluadas influyeron en la materia seca del grano. Asimismo, las dosis de biochar y biosílíce tuvieron efectos altamente significativos, indicando que ambos factores modificaron esta variable. La interacción biochar $\times$ biosílíce fue significativa, lo que evidencia que el efecto de la biosílíce cambió según la dosis de biochar aplicada. En el análisis de tendencias, la respuesta lineal fue significativa en los tres niveles de biochar, siendo más fuerte con 2.0 t ha⁻¹. Los efectos cuadráticos y cúbicos no fueron significativos, por lo que la materia seca se explicó principalmente por una tendencia lineal. El coeficiente de variación fue de 4.44 %, lo que indica buena precisión experimental y confiabilidad en los resultados.

Tabla 3.9.

Análisis de varianza de materia seca de los granos de haba, bajo el efecto de las dosis de biochar y biosílíce

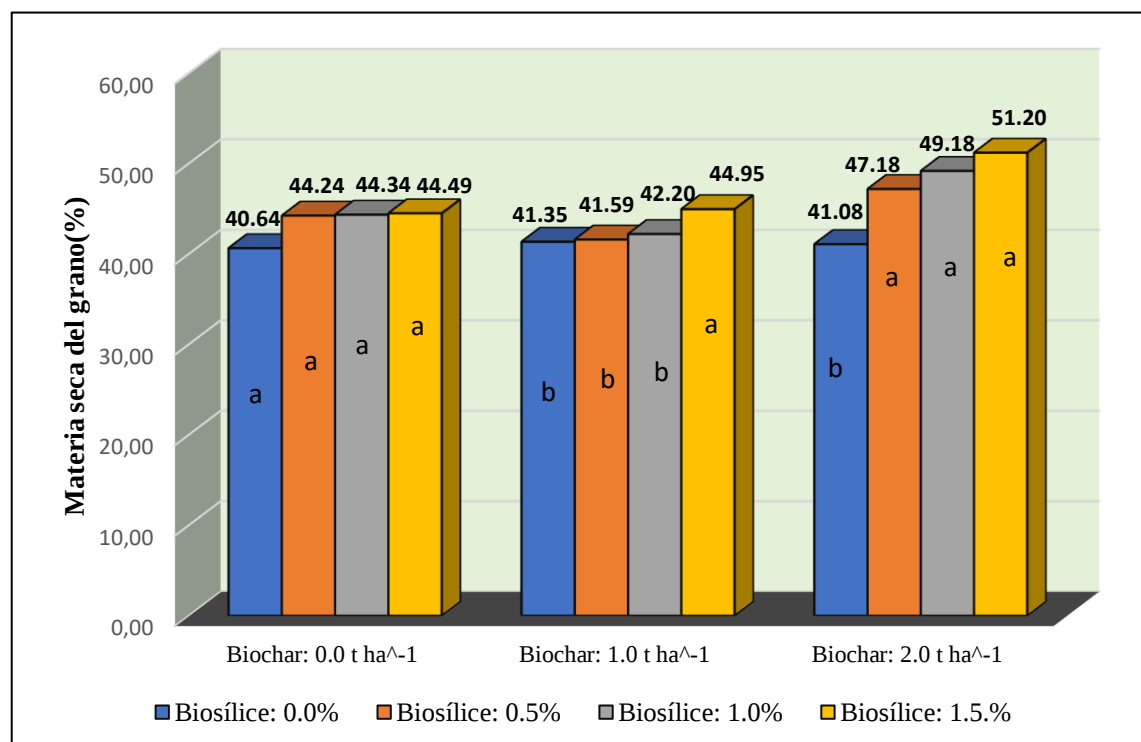
Fuentes de variación	G.L.	S.C.	C.M.	Fc	P - Valor
Bloque	2	14.950	7.475	1.926	0.1142ns
Tratamientos	11	372.910	33.901	8.734	<0.0001**
Dosis biochar (B)	2	145.030	72.515	18.683	<0.0001**
Dosis biosílíce (b)	3	164.280	54.760	14.108	<0.0001**
Interacción (B*b)	6	63.600	10.600	2.731	<0.0388*
Biosílíce en biochar 0.0 t ha⁻¹					
R. lineal	1	20.410	20.410	5.258	0.0318*
R. cuadrática	1	8.930	8.930	2.301	0.1436 ns
R. cúbica	1	1.880	1.880	0.484	0.4934 ns
Biosílíce en biochar 1.0 t ha⁻¹					
R. lineal	1	19.490	19.490	5.021	0.03554*
R. cuadrática	1	4.710	4.710	1.213	0.2824 ns
R. cúbico	1	0.470	0.470	0.121	0.7317 ns
Biosílíce en biochar 2.0 t ha⁻¹					
R. lineal	1	157.010	157.010	40.452	<0.0001**
R. cuadrática	1	12.440	12.440	3.205	0.0871ns
R. cúbica	1	2.530	2.530	0.652	0.4281 ns
Error	22	85.390	3.881		
Total	35	473.25			
CV (%):	4.44				

Nota. No significativo (ns), significativo (*), altamente significativo (**)

La figura 3.20 en la prueba de Duncan evidencia que la materia seca de grano de haba respondió de manera diferenciada a la aplicación combinada de dosis de biochar y biosílice. En ausencia de biochar, las dosis de biosílice no presentaron diferencias estadísticas significativas, aunque se observó un ligero incremento desde 40.64 % hasta 44.49 %. Con 1.0 t ha⁻¹ de biochar, la dosis de 1.5 % de biosílice alcanzó el mayor valor de materia seca con 44.95 %, diferenciándose estadísticamente de las dosis menores, lo que indica una mejor respuesta cuando se incrementa la biosílice en este nivel de biochar. La respuesta más favorable se presentó con 2.0 t ha⁻¹ de biochar, donde las dosis de 0.5 %, 1.0 % y 1.5 % de biosílice superaron significativamente al tratamiento sin biosílice, alcanzando valores de 47.18 %, 49.18 % y 51.20 %, respectivamente. En este sentido, el mayor porcentaje de materia seca se obtuvo con la combinación de 2.0 t ha⁻¹ de biochar y 1.5 % de biosílice; sin embargo, estadísticamente fue similar a las dosis de 0.5 % y 1.0 % de biosílice dentro del mismo nivel de biochar. Estos resultados sugieren que la incorporación conjunta de biochar y biosílice favorece la acumulación de materia seca en los granos, especialmente cuando se emplea la mayor dosis de biochar.

Figura 3.20.

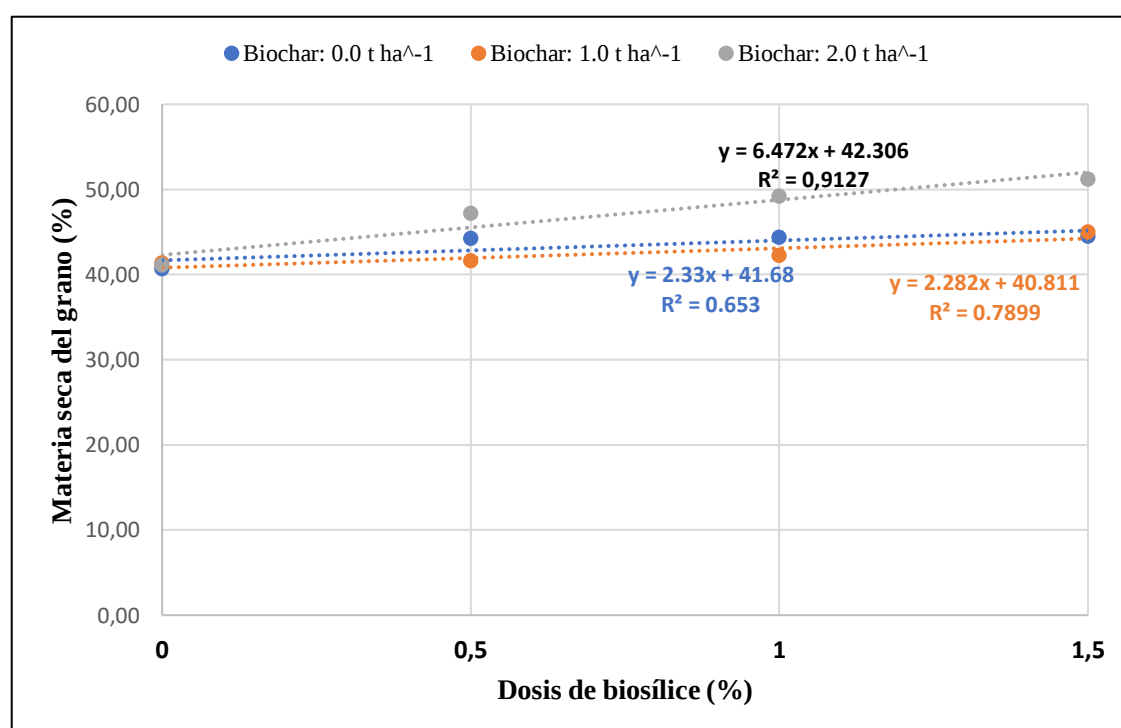
Prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$) de los efectos simples de las dosis de biosílice en cada dosis de biochar en el porcentaje de materia seca de grano de haba.



En haba, Poormansour & Razzaghi (2018), en Shiraz, Irán, encontraron que la aplicación de 25 t ha⁻¹ de biochar incrementó el peso seco de grano en 94 %. De manera similar, Van Zwieten et al. (2015), en Australia, reportaron que 10 t ha⁻¹ de biochar aumentó la biomasa seca de 3.67 a 7.89 t ha⁻¹. Asimismo, Al-Mishyyikh & Jarallah (2024), en Irak, evidenciaron que la combinación de 15 t ha⁻¹ de biochar con 30 t ha⁻¹ de bentonita elevó el peso seco de planta de 52.58 a 88.93 g planta⁻¹. Respecto a la biosílice, Cerda Gómez (2021), en maíz morado en Ayacucho, Perú, evaluó dosis foliares de 0.0, 1.0 y 2.0 %, y dosis edáficas de 0.0, 500 y 1000 kg ha⁻¹, encontrando una tendencia favorable al incremento de la materia seca aérea.

Figura 3.21.

Modelos de regresión lineal del comportamiento de materia seca de grano de haba, bajo el efecto de las dosis de biosílice en cada dosis de biochar.



En la figura 3.21 evidencia una tendencia lineal positiva entre la dosis de biosílice y el porcentaje de materia seca del grano de haba en los tres niveles de biochar evaluados. Este comportamiento indica que, dentro del rango experimental estudiado, el incremento de la biosílice favoreció la acumulación de materia seca en el grano. En ausencia de biochar, el modelo de regresión fue $y = 2.33x + 41.68$, con un coeficiente de

determinación de $r^2 = 0.653$, lo que señala que el 65.30 % de la variación observada en la materia seca del grano fue explicada por la dosis de biosílíce. Con la aplicación de 1.0 t ha⁻¹ de biochar, el modelo $y = 2.282x + 40.811$ presentó un $r^2 = 0.7899$, explicando el 78.99 % de la variación. Finalmente, con 2.0 t ha⁻¹ de biochar, el modelo $y = 6.472x + 42.306$ alcanzó el mayor ajuste, con un $r^2 = 0.9127$, explicando el 91.27 % de la variación observada. Asimismo, con 2.0 t ha⁻¹ de biochar presentó los valores más altos de materia seca y la mayor pendiente del modelo, equivalente a 6.472, lo que indica que por cada incremento porcentual de biosílíce la materia seca del grano aumentó aproximadamente en 6.47%.

3.10. Rendimiento de vaina verde

Tabla 3.10.

Análisis de varianza del rendimiento promedio de la vaina verde de haba, bajo el efecto de las dosis de biochar y biosílíce.

Fuentes de variación	G.L.	S.C.	C.M.	Fc	P - Valor
Bloque	2	0.17	0.09	0.69	0.5130 ns
Tratamientos	11	290.286	26.390	213.367	< 0.0001**
Dosis biochar (B)	2	221.77	110.89	896.54	< 0.0001**
Dosis biosílíce (b)	3	50.70	16.90	136.63	< 0.0001**
Interacción (B*b)	6	17.82	2.97	24.01	< 0.0001**
Biosílíce en biochar 0.0 t ha⁻¹					
R. lineal	1	4.38	4.38	35.43	<0.0001**
R. cuadrática	1	0.01	0.01	0.10	0.7580ns
R. Cubica	1	0.01	0.01	0.04	0.8504 ns
Biosílíce en biochar 1.0 t ha⁻¹					
R. lineal	1	10.55	10.55	85.30	<0.0001**
R. cuadrática	1	0.11	0.11	0.91	0.3514 ns
R. Cubica	1	0.11	0.11	0.86	0.3650 ns
Biosílíce en biochar 2.0 t ha⁻¹					
R. lineal	1	45.57	45.57	368.45	<0.0001**
R. cuadrática	1	7.19	7.19	58.15	<0.0001**
R. Cubica	1	0.63	0.63	5.05	0.0348*
Error	22	2.72	0.12		
Total	35	293.18			
CV (%):	5.12				

Nota. No significativo (ns), significativo (*), altamente significativo (**).

La tabla 3.10 de ANVA evidencia que el rendimiento promedio de vaina verde de haba fue influenciado de manera altamente significativa por los tratamientos, así como por las dosis de biochar, biosílice y su interacción, todos con valores de $p < 0.0001$. Esto indica que ambos factores modificaron el rendimiento y que el efecto de la biosílice dependió del nivel de biochar aplicado. En los tres niveles de biochar se observó una respuesta lineal altamente significativa de la biosílice, lo que muestra una tendencia clara del rendimiento frente al incremento de sus dosis. Sin embargo, con 2.0 t ha^{-1} de biochar también se presentaron efectos cuadrático y cúbico significativos, evidenciando una respuesta más marcada y compleja. Finalmente, el coeficiente de variación de 5.12 % indica buena precisión experimental y confiabilidad en los resultados obtenidos.

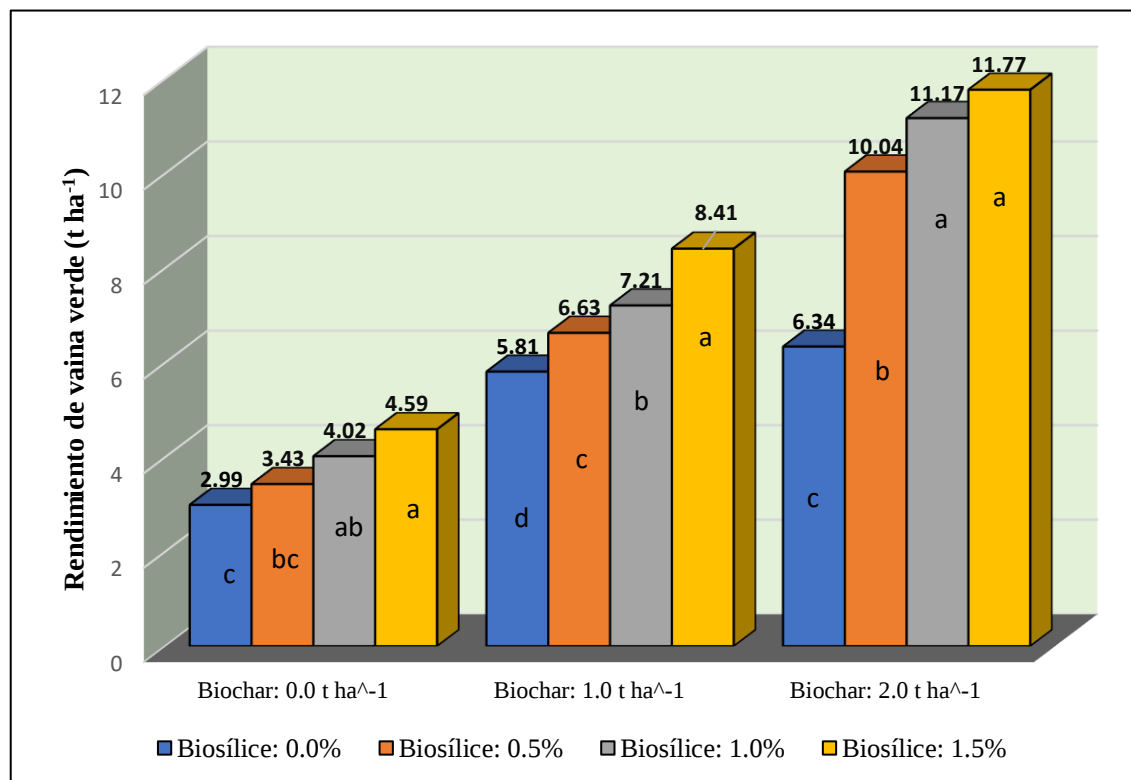
En la figura 3.22 se presenta la prueba de Duncan al 5 % para evaluar el efecto de las dosis de biosílice dentro de cada nivel de biochar sobre el rendimiento de vaina verde de haba. Las letras ubicadas sobre las barras permiten identificar las diferencias estadísticas; por tanto, tratamientos que comparten al menos una letra no presentan diferencias significativas entre sí.

Sin aplicación de biochar, el rendimiento aumentó de 2.99 a 4.59 t ha^{-1} conforme se incrementó la dosis de biosílice. El mayor valor se obtuvo con 1.5 % de biosílice, con 4.59 t ha^{-1} , ubicado en el grupo “a”; este resultado fue estadísticamente similar al tratamiento con 1.0 % de biosílice, que alcanzó 4.02 t ha^{-1} y se ubicó en el grupo “ab”. El menor rendimiento correspondió al tratamiento sin biosílice, con 2.99 t ha^{-1} , ubicado en el grupo “c”.

Con 1.0 t ha^{-1} de biochar, el rendimiento presentó una tendencia creciente según la dosis de biosílice. El mayor rendimiento se alcanzó con 1.5 % de biosílice, con 8.41 t ha^{-1} , perteneciente al grupo “a”, superando estadísticamente a las demás dosis. Los tratamientos con 1.0 %, 0.5 % y 0 % de biosílice obtuvieron 7.21 , 6.63 y 5.81 t ha^{-1} , respectivamente, mostrando diferencias estadísticas entre ellos.

Figura 3.22.

Prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$) de los efectos simples de las dosis de biosíllice en cada dosis de biochar en el rendimiento de la vaina verde de haba.



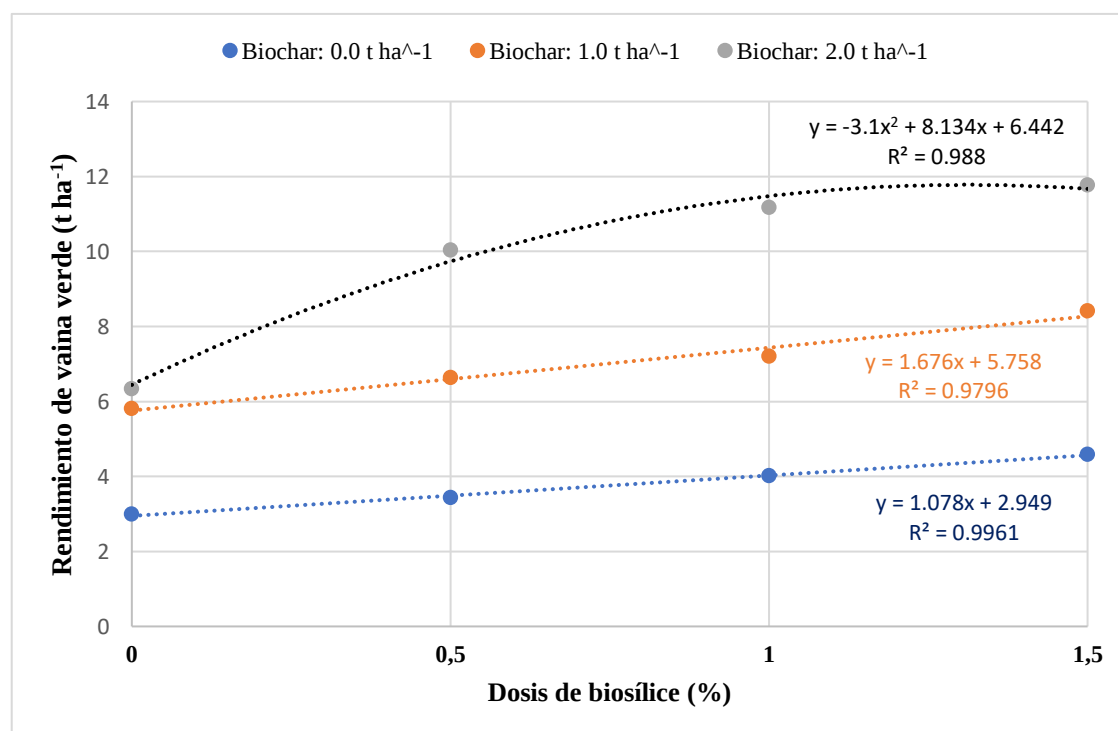
Con 2.0 t ha⁻¹ de biochar se registraron los mayores rendimientos. Las dosis de 1.5 % y 1.0 % de biosíllice alcanzaron 11.77 y 11.17 t ha⁻¹, respectivamente, ambas ubicadas en el grupo “a”, por lo que fueron estadísticamente similares. En cambio, el tratamiento con 0.5 % de biosíllice obtuvo 10.04 t ha⁻¹ y se ubicó en el grupo “b”, mientras que el tratamiento sin biosíllice alcanzó 6.34 t ha⁻¹ y correspondió al grupo “c”.

Se sustenta con Al-Mishyyikh & Jarallah (2024), quienes en Al-Anbar, Irak, en el cultivo de haba (*Vicia faba* L.), registraron que la aplicación de 15 t ha⁻¹ de biochar incrementó el rendimiento de vainas frescas de 9.907 a 17.540 t ha⁻¹, alcanzando 20.543 t ha⁻¹ al combinarlo con 30 t ha⁻¹ de bentonita. Asimismo, Shoman & Bughdady (2020), en New Valley, Egipto, también en haba, observaron que 300 ppm de silicio foliar favoreció la formación de 14.2 vainas por planta y un rendimiento de 1823 kg/fed de semilla. De igual manera, Hafez et al. (2021), en Kafr El-Sheikh, Egipto, en el cultivo de haba, reportaron que el silicato de potasio combinado con rizobacterias produjo hasta 3.9 t ha⁻¹ bajo condiciones de agua dulce.

Al contrastar los resultados con referencias agronómicas externas, ya que no se evaluaron biochar ni biosílíce, sino otros manejos, variedades y condiciones de cultivo. En la presente investigación, el rendimiento de vaina verde de haba. Huamán Tapara et al. (2026), en Chinchero, Cusco, encontraron rendimientos de vaina verde entre 5.56 y 11.,67 t ha⁻¹.

Figura 3.23.

Modelos de regresión del comportamiento de rendimiento de vaina verde de haba, bajo el efecto de las dosis de biosílíce en cada dosis de biochar.



En la figura 3.23 se evidencia una tendencia lineal positiva entre la dosis de biosílíce y el rendimiento de vaina verde de haba. Esto indica que, dentro del rango evaluado, el incremento de biosílíce favoreció el rendimiento del cultivo. Sin biochar, el modelo fue $y = 1.078x + 2.949$, con $r^2 = 0.9961$, explicando el 99.61 % de la variación observada. Con 1,0 t ha⁻¹ de biochar, el modelo fue $y = 1.676x + 5.758$, con $r^2 = 0.9796$, explicando el 97.96 % de la variación. Además, este último tratamiento presentó mayores valores de rendimiento y una pendiente más elevada, lo que indica que por cada incremento porcentual de biosílíce el rendimiento aumentó aproximadamente 1.68 t ha⁻¹. En conjunto, los resultados sugieren que la aplicación de 1.0 t ha⁻¹ de biochar potencia la

respuesta del cultivo frente a la biosílice. En cambio, bajo la aplicación de 2.0 t ha⁻¹ de biochar. El modelo cuadrático obtenido fue $y = -3.1x^2 + 8.134x + 6.442$, con un coeficiente de determinación $r^2 = 0.9883$, lo que evidencia un ajuste muy alto del modelo a los datos observados. El rendimiento estimado aumentó desde 6.44 t ha⁻¹ en ausencia de biosílice hasta un valor máximo aproximado de 11.78 t ha⁻¹, alcanzado alrededor de 1.31 % de biosílice. A partir de este punto, la curva muestra una tendencia a estabilizarse, con una ligera reducción hacia la dosis de 1.5 %. Este comportamiento indica que la incorporación de biosílice favoreció el rendimiento de vaina verde hasta una dosis óptima; sin embargo, el efecto no fue lineal, pues las ganancias productivas disminuyeron conforme se aproximaron las dosis más altas evaluadas. Por tanto, la combinación de 2.0 t ha⁻¹ de biochar con niveles intermedios de biosílice resultó más eficiente para mejorar el rendimiento, mientras que dosis superiores no necesariamente generarían mayores rendimientos estimados.

3.11. Rentabilidad económica

Tabla 3.11.

Análisis de rentabilidad económica en cada tratamiento por efecto de las dosis de biochar y biosílíce

Trt	Densidad de siembra	Rdt. (kg/ha)	Precio Unitario (kg)	Costo de prod. (S/.)	Valor bruto de prod. (S/xha)	Valor neto de prod. (S/ x ha)	Rentabilidad (%)	Beneficio costo (B/C)
T1	Sin biochar y sin biosílíce	2,988.89	2.00	9,420.07	5,977.78	- 3,442.29	- 36.54	- 0.30
T2	Sin biochar, 0.5% biosílíce	3,427.78	2.00	9,620.69	6,855.56	- 2,765.14	- 28.74	- 0.24
T3	Sin biochar, 1% biosílíce	4,019.44	2.00	9,821.32	8,038.89	- 1,782.43	- 18.15	- 0.15
T4	Sin biochar, 1.5% biosílíce	4,586.11	2.00	10,021.94	9,172.22	- 849.72	- 8.48	- 0.07
T5	1 t ha ⁻¹ de biochar, sin biosílíce	5,812.50	2.00	9,741.07	11,625.00	1,883.93	19.34	0.16
T6	1 t ha ⁻¹ de biochar, 0.5% biosílíce	6,625.00	2.00	9,941.69	13,250.00	3,308.31	33.28	0.28
T7	1 t ha ⁻¹ de biochar, 1% biosílíce	7,212.50	2.00	10,142.32	14,425.00	4,282.68	42.23	0.35
T8	1 t ha ⁻¹ de biochar, 1.5% biosílíce	8,411.11	2.00	10,342.94	16,822.22	6,479.28	62.64	0.52
T9	2 t ha ⁻¹ de biochar, sin biosílíce	6,340.28	2.00	10,062.07	12,680.56	2,618.49	26.02	0.22
T10	2 t ha ⁻¹ de biochar, 0.5% biosílíce	10,041.67	2.00	10,262.69	20,083.33	9,820.64	95.69	0.80
T11	2 t ha ⁻¹ de biochar, 1% biosílíce	11,169.44	2.00	10,463.32	22,338.89	11,875.57	113.50	0.95
T12	2 t ha ⁻¹ de biochar, 1.5% biosílíce	11,772.22	2.00	10,663.94	23,544.44	12,880.50	120.79	1.01

Nota. B/C = 1 (indiferente), B/C <1 (no rentable), B/C >1 (rentable).

3.11.1. Ingreso bruto (S/. ha⁻¹)

El ingreso bruto de producción se obtuvo multiplicando el rendimiento de cada tratamiento por el precio unitario de S/ 2.00 por kilogramo. Los tratamientos con 2 t ha⁻¹ de biochar y mayores dosis de biosílíce registraron los mayores ingresos brutos. El valor más alto correspondió a T12, con S/ 23 544.44 ha⁻¹, seguido de T11, con S/ 22 338.89 ha⁻¹, y T10, con S/ 20 083.33 ha⁻¹. Esta tendencia evidencia que la combinación de biochar y biosílíce favoreció el rendimiento del cultivo y, en consecuencia, incrementó el valor económico de la producción.

3.11.2. Costo total de producción (S/. ha⁻¹)

El costo total de producción incluyó los gastos asociados al manejo del cultivo, insumos, biochar, biosílíce, mano de obra y demás actividades productivas. Los costos variaron entre S/ 9 420.07 ha⁻¹ en T1 y S/ 10 663.94 ha⁻¹ en T12. Aunque los tratamientos con mayores dosis de biochar y biosílíce presentaron costos ligeramente superiores, este incremento fue compensado por el aumento del rendimiento y del valor bruto de producción, especialmente en los tratamientos con 2 t ha⁻¹ de biochar.

3.11.3. Valor neto (S/. ha⁻¹)

El valor neto de producción se obtuvo restando el costo total de producción al valor bruto generado por cada tratamiento. Los tratamientos T1, T2, T3 y T4 presentaron valores netos negativos, lo que indica que no lograron cubrir los costos de producción. En cambio, desde T5 hasta T12 se observaron valores netos positivos. El mayor valor neto correspondió a T12, con S/ 12 880.50 ha⁻¹, seguido de T11, con S/ 11 875.57 ha⁻¹, y T10, con S/ 9 820.64 ha⁻¹. Esto demuestra que el uso combinado de 2 t ha⁻¹ de biochar con biosílíce mejoró de forma importante el retorno económico del cultivo.

3.11.4. Rentabilidad y relación benéfico/costo (B/C)

La rentabilidad porcentual mostró una tendencia creciente conforme se incrementaron las dosis de biochar y biosílíce. Los tratamientos T1, T2, T3 y T4 presentaron rentabilidades negativas, mientras que desde T5 hasta T12 se registraron rentabilidades positivas. El tratamiento T12 alcanzó la mayor rentabilidad con 120.79%, seguido de T11 con 113.50% y T10 con 95.69%. Sin embargo, al evaluar la relación beneficio/costo, solo T12

superó la unidad, con un B/C de 1.01. Por ello, bajo las condiciones del experimento y el criterio económico aplicado, T12 fue el único tratamiento económicamente rentable, mientras que T11 se ubicó muy próximo al punto de equilibrio, con B/C de 0.95.

En síntesis, en la tabla 3.11, muestra el análisis económico financiero, donde se realizó estimaciones para determinar el porcentaje de rentabilidad y balance beneficio/costo. Para el cálculo de beneficio costo se consideró una tasa de descuento de 20% y para estimar valor bruto de producción se consideró precio unitario de 2.0 soles por kilogramo. Los únicamente el T12 (2 t ha⁻¹ de biochar, 1.5% biosílice) fue económicamente rentable, donde se encontraron B/C de 1.01. Es decir, con este tratamiento hay un valor de recupero de 0.01 soles por cada sol invertido. Mientras, los tratamientos T1, T2, T3 y T4 fueron económicamente perdidas, por lo que no es recomendable. En los tratamientos desde T5 hasta T12 el % de rentabilidad es positivo, es decir, monetariamente se recupera esos porcentajes en cada tratamiento, pero mediante índice B/C solo el T12 es más rentable. Cabe recalcar que estos cálculos solo fueron analizados para primera campaña agrícola con fines informativos.

CAPITULO IV

CONCLUSIONES

1. El rendimiento de haba en verde ha sido influenciado en las variables evaluadas por el biochar y biosílice. Así:
 - 1.1. La mayor altura de planta se logró a los 90 días (168.48 cm) con 2.0 t ha⁻¹ de biochar y 1.5% de biosílice.
 - 1.2. La dosis de 2.0 t ha⁻¹ de biochar y 1.5% de biosílice se logró el mayor número de flores (39), mayor número de vainas por planta (36) y mayor longitud de vaina (13.90 cm)
 - 1.3. La dosis de 2.0 t ha⁻¹ de biochar permitió la mayor altura en la madurez fisiológica (177.83), el mayor número de macollos por planta (8.9), el mayor diámetro de vainas con 3.28 cm; el mayor número de granos por vaina (2.7 unidades) y el peso de cien semillas (52. 87 g).
 - 1.4. La aplicación de biosílice al 1.5% logró el mayor número de granos por vaina (2.6) y peso de cien semillas (47.39 g).
 - 1.5. Con 2.0 t ha⁻¹ de biochar y 1.5% de biosílice se obtuvo el mayor peso de materia seca de grano (51.2%) y el mayor rendimiento de vaina verde con 11.77 t ha⁻¹, superior al testigo.
2. El tratamiento con 2 t ha⁻¹ de biochar y 1.5% de biosilice logró el mayor valor de la relación beneficio costo con 1.01 soles por cada sol invertido.

RECOMENDACIONES

1. Emplear 2.0 t ha⁻¹ de biochar con 1.5% de biosílíce para lograr mayor rendimiento de vaina verde y favorecer un incremento en la rentabilidad económica del cultivo de haba en condiciones similares al lugar donde se realizó esta investigación (Tayancayocc, distrito de Huamanguilla).
2. Realizar investigaciones adicionales sobre la aplicación de biochar en distintos cultivos andinos de la región, evaluando su producción mediante la pirolisis de restos orgánicos locales, con el fin de optimizar la fertilidad del suelo, mejorar la eficiencia en el uso de nutrientes y aumentar el rendimiento agrícola de manera sostenible.
3. Realizar investigaciones sobre la aplicación de la tierra de diatomea directamente en el suelo, y no limitar su uso únicamente a aplicaciones foliares, con el fin de evaluar su impacto en las propiedades edáficas, la disponibilidad de nutrientes y el desarrollo integral de la planta.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agrotendencia TV. (2022, octubre 1). *Beneficios de la tierra de diatomeas en el agro* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=fIBoqggRCg0>
- Aguilera, C. (1997). *Estudio de los efectos de la densidad de siembra y la fertilización nitrogenada en la cosecha de habas y sus componentes* (Manual nº 3). Universidad de Almería, Servicio de Publicaciones. Caja Rural de Almería. https://books.google.com.pe/books?hl=en&lr=&id=T62MmBDXQ4MC&oi=fnd&pg=PA13&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Al-Mishyyikh, S. H. W., & Jarallah, A. K. A. (2024). Role of biochar and bentonite in improving some chemical properties of desert soil, growth and yield of broad bean (*Vicia faba* L.). *Iraqi Journal of Agricultural Sciences*, 55(4), 1465–1474. <https://doi.org/10.36103/206c9n85>
- Aquino-Durán, E. (2020). Microorganismos eficaces (EM) en el rendimiento del cultivo de habas (*Vicia faba*) variedad Señorita en condiciones edafoclimáticas de Panao, Pachitea. *Revista Investigación Agraria*, 2(2), 49-55. <https://pdfs.semanticscholar.org/246a/48582c5a85ccf6260aa8134864ccf2d16f85.pdf>
- Arrieta Hinostroza, F. C., & Deudor López, E. L. (2020). *Estudio del efecto de los abonos orgánicos en el rendimiento verde del cultivo de haba (Vicia faba L.), variedad Pacae amarillo en condiciones de Huariaca-Pasco 2018* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/2048/1/T026_45697094_T.pdf
- Ataupillco Jorge, E. (2025). *Rendimiento y rentabilidad en la producción de semilla de tres cultivares de haba (Vicia faba L.) con dos densidades de plantas, Tambo 3650 msnm - Ayacucho* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga]. Repositorio Institucional UNSCH. <https://hdl.handle.net/20.500.14612/8584>
- Baglione, L. (2011). Usos de la tierra diatomea. *Revista Técnicaña*, 27, 31-32.

- https://saltonverde.com/wp-content/uploads/2015/tec_no27_2011_p33-34.pdf
- Barrow, C. J. (2012). *Biochar: potential to counteract land degradation and improve agriculture*. Appl Geogr 34:21–28. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.09.008>
- Calderón, T. C. (2016). *Identificación de las etapas fenológicas del frijol y haba* [Tesis de maestría]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Agraria La Molina.
http://193.122.196.39:8080/xmlui/bitstream/handle/10521/3506/Calderon_Tomas_C_MC_EDAR_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Cancho Cuba, D. T. (2021). *Caracterización y selección de 45 cultivares de haba (Vicia faba L.). Canaán (2762 msnm), Ayacucho* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga]. Repositorio Institucional UNSCH.
<https://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/4542>
- Cartagena Gamboa, Y. (2025). *Biosílice foliar y levadura de panificación al suelo en el rendimiento de cebolla (Allium cepa L.), Canaán a 2750 msnm, Ayacucho 2023*.
<https://repositorio.unsch.edu.pe/items/97d43ee5-7080-42a9-934e-ce0b08dc024e>
- Castellanos González, Leónides, de Mello Prado, Renato, & Silva Campos, Cid Naudi. (2015). El Silicio en la resistencia de los cultivos. *Cultivos Tropicales*, 36(Supl. 1), 16-24. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362015000500002
- Cerda Gómez, M. (2019). Niveles y finura de diatomita en propiedades químicas de suelo ácido altoandino en invernadero - Ayacucho. *Investigación*, 27(1), 23 –. <https://doi.org/10.51440/unsch.revistainvestigacion.2019.1.97>
- Cerda Gómez, M. (2021). Biosílice foliar y edáfico en la tolerancia del maíz morado a la salinidad, en laboratorio ayacucho. *Investigación*, 29(1), 65–72. <https://doi.org/10.51440/unsch.revistainvestigacion.29.1.2021.283>
- CIREN. 2017. Haba. En: <https://www.ciren.cl/wp-content/uploads/2017/12/Haba.pdf>
- Checa, O. E. (1994). *Manejo agronómico del cultivo de haba (Vicia faba L.)*. FENALCE-Corporación colombiana de investigación agropecuaria - AGROSAVIA.

<https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/1149>

- Chen, X., Yang, S., Ding, J., Jiang, Z., & Sun, X. (2021). Effects of biochar addition on rice growth and yield under water-saving irrigation. *Water*, 13(2), 209. <https://doi.org/10.3390/w13020209>
- Colorado Quispe, L. C. (2023). *Expresión genotípica sobre los componentes asociados al rendimiento y capacidad de nodulación de líneas de haba (Vicia faba) resistentes a Botrytis fabae, Pampas-Tayacaja, Huancavelica* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Centro del Perú, Facultad de Agronomía, El Mantaro, Jauja, Perú. https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/10263/T010_72007542_T.pdf?sequence=1
- Cronquist, A. (1981). *An integrated system of classification of flowering plants*. Columbia University Press. <https://archive.org/details/integratedsystem0000cron>
- Cubero, J. I., & Moreno, M. T. (1983). *Libro: Leguminosas de grano*. Ediciones Mundi-Prensa.
- Dai, Z., Wang, Y., Muhammad, N., Yu, X., Xiao, K., Meng, J., Liu, X., Xu, J., & Brookes, P. C. (2014). The Effects and Mechanisms of Soil Acidity Changes, following Incorporation of Biochars in Three Soils Differing in Initial pH. *Soil Science Society of America Journal*, 78(5), 1606–1614. <https://doi.org/10.2136/sssaj2013.08.0340>
- Debona, D., Rodrigues, F. A., & Datnoff, L. E. (2017). The role of silicon in abiotic and biotic stress in plants [The role of silicon in plant abiotic and biotic stress]. *Annual Review of Phytopathology*, 55, 85–107. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080516-035312>
- Dhanker, R., Saxena, A., Tiwari, A., Singh, P. K., Patel, A. K., Dahms, H.-U., Hwang, J.-S., González-Meza, G. M., Melchor-Martínez, E. M., Iqbal, H. M. N., & Parra-Saldívar, R. (2024). *Hacia una biorrefinería sostenible de diatomeas: tendencias recientes en cultivo y aplicaciones*. Tecnología de biorrecursos. Elsevier.
- Díaz-Solares, M., Martín-Martín, G. J., Miranda-Tortoló, T., Fonte-Carballo, L., Lamela-

López, L., Montejo-Sierra, I. L., Contino-Esquiñerosa, Y., Ojeda-García, F., Medina-Salas, R., Ramírez-Suárez, W. M., Lezcano-Fleires, J. C.,

EcologíaVerde. (2024, 26 de julio). *¿Para qué SIRVE la TIERRA de DIATOMEAS?* 🌱 (3 Usos de la Tierra de Diatomeas) [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=c01awcwjIWw>

Ediz, N., Bentli, İ., & Tatar, İ. (2010). *Improved diatomite filtration characteristics by calcination*. International Journal of Mineral Processing. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2010.02.004>

Egamberdieva, D., Zoghi, Z., Nazarov, K., Wirth, S., & Bellingrath-Kimura, S. D. (2020). Response of plant growth of broad bean (*Vicia faba* L.) to amendment with biochar of sandy loam soil under irrigated and drought conditions. *Environmental Sustainability*, 3(4), 319–324. <https://doi.org/10.1007/s42398-020-00116-y>

Escalante Rebolledo, A., G. Pérez López, C. Hidalgo Moreno, J. López Collado, J. Campo Alves, E. Valtierra Pacheco y J. D. Etchevers Barra (2016). *Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo*. Terra Latinoamericana 34: 367-382. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v34n3/2395-8030-tl-34-03-00367.pdf>

Falcão, N. (2012). *Investigadores exploran la historia contenida en la tierra preta de los indígenas*. Globo Natureza, con información de Globo Rural (ed.). <http://g1.globo.com/natureza/noticia/2012/06/pesquisadores-garimpam-historia-contida-na-terra-preta-de-indio.html>

Gao, B., Jiang, P., An, F., Zhao, S., & Ge, Z. (2005). *Studies on the surface modification of diatomite with polyethylenimine and the trapping effect of phenol-modified diatomite*. Applied surface science. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2005.02.119>

Garau, M., Lo Cascio, M., Vasileiadis, S., Sizmur, T., Nieddu, M., Pinna, M. V., Sirca, C., Spano, D., Roggero, P. P., Garau, G., & Castaldi, P. (2024). Using biochar for environmental recovery and boosting the yield of valuable non-food crops: The case of hemp in a soil contaminated by potentially toxic elements (PTEs). *Heliyon*,

10(6), e28050. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2024.E28050>

- Gasim, S., Hamad, S. A., Abdelmula, A., & Mohamed Ahmed, I. A. (2015). Yield and quality attributes of pure lines of broad beans grown under marginal environmental conditions in Sudan. *Food Sci. Nutr.* 3, 539–547. <https://doi.org/10.1002/fsn3.245>
- Glaser, B., Haumaier, L., Guggenberger, G., & Zech, W. (2001). The 'Terra Preta' phenomenon: a model of sustainable agriculture in the humid tropics. *Naturwissenschaften*, 88(1), 37-41. <https://doi.org/10.1007/s001140000193>
- Gomes, F. B., Moraes, J. C., Donizete dos Santos, C., & Goussain, M. M. (2005). Induction of resistance in wheat plants by silicon and aphids. *Agricultural Science*, 62(6), 849-853. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162005000600006>
- Gryta, A., Skic, K., Adamczuk, A., Skic, A., Marciniak, M., Józefaciuk, G., & Boguta, P. (2024). The importance of specific design of the physicochemical properties of biochar in microbial inoculation to improve agricultural productivity: a review. *Agriculture* , 14 (1), 37. <https://doi.org/10.3390/agriculture14010037>
- Hafez, E. M., Osman, H. S., Abd El-Razek, U. A., Elbagory, M., Omara, A. E.-D., Eid, M. A., & Gowayed, S. M. (2021). Foliar-applied potassium silicate coupled with plant growth-promoting rhizobacteria improves growth, physiology, nutrient uptake and productivity of faba bean (*Vicia faba* L.) irrigated with saline water in salt-affected soil. *Plants*, 10(5), 894. <https://doi.org/10.3390/plants10050894>
- Hamissou, I. G. M., Appiah, K. E. K., Sylvie, K. A. T., Ousmaila, S. M., Casimir, B. Y., & Benjamin, Y. K. (2023). Valorization of cassava peelings into biochar: Physical and chemical characterizations of biochar prepared for agricultural purposes. *Scientific African*, 20, e01737. <https://doi.org/10.1016/J.SCIAF.2023.E01737>
- Hassan, M. S., Ibrahim, I. A., & Ismael, I. S. (1999). *Fayium Diatom Deposits, Egypt: Characterization and Evaluation for Industrial Applications*. Mentón. J. Geochem., 18, 233-241. <https://doi.org/10.1007/BF02831069>
- Horque Ferro, R. (2004). *Cultivo del haba* (Manual RI N° 01-04). <https://repositorio.inia.gob.pe/server/api/core/bitstreams/715ee52d-6df5-4fdb->

- Huamán Tapara, E., Acuña Espinoza, K. W., Huamán Tapara, J. C., Castillo Nole, M. J., & Valverde Rodríguez, A. (2026). Comparación agronómica de líneas avanzadas y variedades locales de haba (*Vicia faba*) en Cusco, Perú. *ALFA. Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinarias*, 10(28), 262–274. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v10i28.432>
- Ikusika, O. O., Mpendulo, C. T., Zindove, T. J., & Okoh, A. I. (2019). Fossil shell flour in livestock production: a review. *Animals* 9(3), 70. <https://doi.org/10.3390/ani9030070>
- Infante Gálvez, M. (2014). *Efecto de la aplicación foliar con Ca y B, hormonas vegetales (auxinas) en la abscisión floral y en el cuajado de frutos del cultivo de haba (Vicia faba L.), en condiciones de Acobamba-Huancavelica* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Huancavelica]. Repositorio Institucional UNH. <https://apirepositorio.unh.edu.pe/server/api/core/bitstreams/2718fec7-8c4e-4c47-bd16-ec106987df62/content>
- Instituto Nacional de Innovación Agraria [INIA] (2013). *Estación Experimental Agraria Santa Ana - Huancayo*. Manejo del cultivo de haba, hojas divulgativa N°01-2013. <https://repositorio.inia.gob.pe/server/api/core/bitstreams/3fa3728b-57ed-4513-92fe-7a7964114ce1/content>
- Instituto Nacional de Innovación Agraria. (2012). *Haba INIA 429 – Fortaleza*. INIA. https://www.inia.gob.pe/wp-content/uploads/investigacion/programa/sistProductivo/variedad/haba/INIA_429.pdf
- Instituto Nacional de Investigación Agraria. (2007). *Haba INIA 417-Hinán Carmen: Una nueva variedad para la sierra del Perú*. INIA. https://www.inia.gob.pe/wp-content/uploads/investigacion/programa/sistProductivo/variedad/haba/INIA_417.pdf
- Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) (2021). Ficha técnica de la variedad de haba INIA 417 – Laive. Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego del Perú.

https://www.inia.gob.pe/wp-content/uploads/investigacion/programa/sistProductivo/variedad/haba/INIA_417.pdf

INTAGRI. (2023). *El cultivo de haba* (Serie Hortalizas, Núm. 34). Artículos Técnicos de INTAGRI. <https://www.intagri.com/articulos/hortalizas/el-cultivo-de-haba>

Ismail, L. M., Soliman, M. I., Abd El-Aziz, M. H., & Abdel-Aziz, H. M. M. (2022). Impact of silica ions and nano silica on growth and productivity of pea plants under salinity stress. *Plants*, 11(4), 494. <https://doi.org/10.3390/plants11040494>

Khan, Z., Zhang, K., Khan, M. N., Zhu, K., & Hu, L. (2024). Effects of biochar persistence on soil physiochemical properties, enzymatic activities, nutrient utilization, and crop yield in a three-year rice-rapeseed crop rotation. *European Journal of Agronomy*, 154, 127096. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127096>

Kizito, S., Luo, H., Lu, J., Bah, H., Dong, R., & Wu, S. (2019). Role of nutrient-enriched biochar as a soil amendment during maize growth: Exploring practical alternatives to recycle agricultural residuals and to reduce chemical fertilizer demand. *Sustainability*, 11(11), Article 3211. <https://doi.org/10.3390/su11113211>

Korunic, Z. (1998). Diatomaceous earths, a group of natural insecticides. *Stocked Products Research Journal*, 34(2–3), 87–97. Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0022-474X\(97\)00039-8](https://doi.org/10.1016/S0022-474X(97)00039-8)

Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Routledge.

Liu, L., Knight, J. D., Lemke, R. L., & Farrell, R. E. (2019). Direct comparison of biological nitrogen fixation and yield of four legume crops. *Plant Soil*. 442, 169–182. doi: 10.1007/s11104-019-04167-x

López Velasco, M. A. (2011). *Evaluación de tres bioestimulantes foliares en el cultivo de haba sometido a dos niveles de fertilización edáfica en la zona de Huaca, provincia del Carchi* [Tesis de grado, Universidad Técnica de Babahoyo]. Repositorio Institucional de la Universidad Técnica de Babahoyo. <https://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/134>

- Lu, S. (2021). *Efecto de la aplicación de biocarbón de sarmientos sobre las propiedades físicoquímicas de un suelo de vid*. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/50532>
- Ma, R., Wu, X., Liu, Z., Yi, Q., Xu, M., Zheng, J., Bian, R., Zhang, X., & Pan, G. (2023). Biochar improves soil organic carbon stability by shaping the microbial community structures at different soil depths four years after an incorporation in a farmland soil. *Current Research in Environmental Sustainability*, 5, 100214. <https://doi.org/10.1016/J.CRSUST.2023.100214>
- Martineau-Côté, D., Achouri, A., Karboune, S., & L'Hocine, L. (2022). Haba: una fuente sin explotar de proteínas vegetales y bioactivos de calidad. *Nutrientes*, 14 (8), 1541. <https://doi.org/10.3390/nu14081541>
- Melo-Lozano, H. A., & Afanasjeva, N. (2023). Effect of biochar application on microbial activity in soils: Review. *Biotechnology in the Agricultural and Agroindustrial Sector*, 21(2), 193. <https://doi.org/10.18684/rbsaa.v21.n2.2023.2197>
- Mierzwa-Hersztek, M., Wolny-Koładka, K., Gondek, K., Gałązka, A., & Gawryjolek, K. (2020). Effect of coapplication of biochar and nutrients on microbiocenotic composition, dehydrogenase activity index and chemical properties of sandy soil. *Waste Biomass Valorization*, 11, 3911–3923. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00757-z>
- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. (2024). *Boletín mensual: El agro en cifras – diciembre* 2023. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/5941243/4024332-boletin-mensual-el-agro-en-cifras-diciembre-2023.pdf?v=1710003696>
- Mohamed, I., El-Meihy, R., Ali, M., Chen, F., & Raleve, D. (2017). Interactive effects of biochar and micronutrients on faba bean growth, symbiotic performance, and soil properties. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 180(6), 729–738. <https://doi.org/10.1002/jpln.201700293>
- Murer, A. S., Mobil, E., Mc-Clenner, K. L., Ellison, T. K., & Mobil, E. (2000). Proyecto de inyección de vapor en diatomita de aceite pesado. SPE. *Reservoir Evaluation Engineering*, 3(1), 2-12.

- Naranjo, J. F., & Solórzano, S. A. (2018). *Evaluación de diferentes dosis y épocas de aplicación de silicio en el desarrollo y producción del cultivo de arroz variedad DICTA Playitas* [Tesis doctoral, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano]. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/55057e96-2435-464e-af76-c1e9b4e04295/content>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2016). *Legumbres, semillas nutritivas para un futuro sostenible*. FAO. <http://www.fao.org/3/ai5528s.pdf>
- Orozco Gutiérrez, G., Medina Telez, L., Elvira Espinosa, A., Cervantes Preciado, J. F., Orozco Gutiérrez, G., Medina Telez, L., Elvira Espinosa, A., & Cervantes Preciado, J. F. (2021). Biocarbón de bambú como mejorador de la fertilidad del suelo en caña de azúcar. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(65), 67-88. <https://doi.org/10.29298/RMCF.V12I65.780>
- Paco Abenza, D., & Alcañiz, J. M. (2012). *Evaluación de efectos de varios tipos de biochar en suelo y planta*. <https://ddd.uab.cat/record/102163>
- Pentón -Fernández, G., Milera Rodríguez, M. de la C., & Schmidt, H. P. (2021). *Manual para la elaboración de Biochar y microorganismos eficientes IHPLUS® BF* (M. de la C. Milera Rodríguez, Comp.). EEPF Indio Hatuey. https://www.researchgate.net/publication/356835765_Manual_para_la_elaboracion_de_biochar_y_microorganismos_eficientes_IHPLUSRBF
- Pineda Serruto, M. E. (2024). *Crecimiento de cuyes mejorados hembras alimentadas con concentrado comercial y local, Tamburco, 2581msnm, Abancay* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga]. Repositorio Institucional de la UNSCH. <https://repositorio.unsch.edu.pe/items/35c0f8b4-b57d-432f-9284-661be44c6c99>
- Poormansour, S., & Razzaghi, F. (2018). Effect of biochar and irrigation levels on faba bean productivity. *Acta Horticulturae*, 1190, 157–162. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1190.27>
- Queiroz, L. L. G. de, Mesquita, E. F. de, Sousa, C. da S., Pereira, R. F., Diniz, J. P. C.,

- Melo, A. S. de, Alencar, R. S. de, Dias, G. F., Soares, V. C. da S., Mesquita, F. de O., Pires, J. P. M. M., Rodrigues, S. S., Lins, L. K. S., Alves, A. da S., Araújo, K. T. A., & Costa Ferraz, P. de S. (2025). Foliar silicon alleviates water deficit in cowpea by enhancing nutrient uptake, proline accumulation, and antioxidant activity. *Plants*, 14(8), 1241. <https://doi.org/10.3390/plants14081241>
- Quispe Vallejo, J. G. (2018). *Niveles de estiércol de ovino en el rendimiento en vaina verde de dos variedades de haba (Vicia faba L.) Socos, 3200 msnm – Ayacucho* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga]. <https://repositorio.unsch.edu.pe/server/api/core/bitstreams/46e0ae59-2ae5-4520-a0e7-614f9331b712/content>
- Ramírez Carrión, J. (2010). *Diatomitas en el Perú: Características y aplicaciones*. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET). <https://www.calameo.com/books/000820129188044fb4f06>
- Reka, A. A., Pavlovski, B., Fazlija, E., Berisha, A., Pacarizi, M., Daghmehchi, M., Sacalis, C., Jovanovski, G., Makreski, P., & Oral, A. (2021). Diatomaceous Earth: Characterization, Thermal Modification and Application. *Open Chemistry*, 19, 451–461. <https://doi.org/10.1515/chem-2020-0049>
- Roca Molina, G. A. (2024). *Niveles de biosílíce, boro y zinc foliar en el rendimiento y calidad de tomate cherry (Lycopersicum esculentum) var. cerasiforme. Ayacucho-2022*. <https://repositorio.unsch.edu.pe/items/cb67c2f8-5ea9-497d-bd3e-1a60ec4e9bdb>
- Sarai, N. S., Fugel, M., Dittmer, A., Kleemiss, F., & Grabowsky, S. (2021). Biocatalytic transformations of silicon: the other element of group 14. *ACS Central Science*, 7(6), 944–953. <https://doi.org/10.1021/acscentsci.1c00182>
- Savvas, D., & Ntatsi, G. (2015). Biostimulant activity of silicon in horticulture. *Scientia Horticulturae*, 196, 66–81. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.010>
- Schlund, P. G. (2025). *Biocarbon*. Agroecologia. <https://agrologia.wordpress.com/2018/08/12/biochar-biocarbon/>
- Sela, G. (2023, 7 de junio). *El biocarbón, su uso en la agricultura y beneficios*. Cropaia.

<https://croapaia.com/es/blog/biocarbon/>

SEMBRALIA (2020, mayo 5). *Tierra de diatomeas: fertilizante, biocida y mucho más.*

Ventajas de este producto polivalente. Sembralia.

[https://sembralia.com/blogs/blog/tierra-diatomeas-](https://sembralia.com/blogs/blog/tierra-diatomeas-agricultura?srsltid=AfmBOopGtoRoQ2exTFIhOUM7au6CTvpek9itrkwji2IuBNlW_s_aGrz7)

[agricultura?srsltid=AfmBOopGtoRoQ2exTFIhOUM7au6CTvpek9itrkwji2IuBN](https://sembralia.com/blogs/blog/tierra-diatomeas-agricultura?srsltid=AfmBOopGtoRoQ2exTFIhOUM7au6CTvpek9itrkwji2IuBNlW_s_aGrz7)

[lW_s_aGrz7](https://sembralia.com/blogs/blog/tierra-diatomeas-agricultura?srsltid=AfmBOopGtoRoQ2exTFIhOUM7au6CTvpek9itrkwji2IuBNlW_s_aGrz7)

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. (2012). *Impacto del cambio climático en cultivos anuales de las regiones de Cusco y Apurímac* (Informe final de investigación del Programa de Adaptación al Cambio Climático PACC).

<https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/siarapurimac/archivos/public/docs/1481.pdf>

Servicio Nacional de Sanidad Agraria del Perú [SENASA]. (2020). *Guía para la implementación de buenas prácticas agrícolas para el cultivo de haba.*

<https://www.senasa.gob.pe/senasa/descargasarchivos/2020/07/Guia-BPA-HABA.pdf>

Sharma, P., Abrol, V., Nazir, J., Samnotra, R. K., Gupta, S. K., Anand, S., Biswas, J. K., Shukla, S., & Kumar, M. (2025). Optimizing soil properties, water use efficiency, and crop yield through biochar and organic manure integration in organic soil.

Journal of Environmental Management, 373, 123673.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123673>

Shoman, H. A., & Bughdady, A. M. M. (2020). Effect of silicon foliar application and sowing dates on faba bean (*Vicia faba* L.) productivity under New Valley conditions–Egypt. *Journal of Plant Production*, 11(12), 1393–1397.

<https://doi.org/10.21608/jpp.2020.149811>

Soto Muñoz, G., Chin Pampillo, J. S., Chinchilla Soto, C., & Pérez Villanueva, M. (2023).

Manual de biocarbón para una agricultura sostenible: Experiencias en Costa Rica (1ª ed.). Universidad de Costa Rica, CICA. [https://cica.ucr.ac.cr/wp-](https://cica.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/2023/12/OP-394-22-Manual-de-biocarbon-FINAL.pdf)

[content/uploads/2023/12/OP-394-22-Manual-de-biocarbon-FINAL.pdf](https://cica.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/2023/12/OP-394-22-Manual-de-biocarbon-FINAL.pdf)

Sun, W., Zhang, J., Fan, Q., Xue, G., Li, Z., & Liang, Y. (2010). The silicon-enhanced

- rice blight resistance is attributed to silicon-mediated defensive resistance and its function as a physical barrier. *Eur. J. Plant Pathol.* 128, 39–49. doi: 10.1007/s10658-010-9625-x
- Tadesse, N., Yoseph, T., Demrew, Z., & Nebiyu, A. (2025). Improving faba bean (*Vicia faba* L.) productivity and nutrient availability through organic amendments and bio-inoculants in acidic soils stress. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 8(1), e70073. <https://doi.org/10.1002/agg2.70073>
- Tapia Figueroa, F., & Bascur Bascuñán, G. (1992). El haba: Un cultivo con proyecciones. 2. Requerimientos climáticos, manejo y costos de producción. Investigación y Progreso Agropecuario La Platina. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/34830>
- Tineo Mendoza, M. (2011). Rendimiento en verde y grano seco de 10 variedades de haba (*Vicia faba* L.). *Allpachaka* 3,500 m.s.n.m. Ayacucho [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga]. Repositorio Institucional UNSCH. <http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/1920>
- Valladolid Chiroque, A. R. (2016). *Leguminosas de grano: Cultivares y clases comerciales del Perú* (1ª ed.). Ministerio de Agricultura y Riego, Dirección General de Negocios Agrarios. <https://www.midagri.gob.pe/portal/download/legumbres/catalogo-leguminosas.pdf>
- Van Zwieten, L., Rose, T., Herridge, D., Kimber, S., Rust, J., Cowie, A., & Morris, S. (2015). Enhanced biological N₂ fixation and yield of faba bean (*Vicia faba* L.) in an acid soil following biochar addition: Dissection of causal mechanisms. *Plant and Soil*, 395, 7–20. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2427-3>
- Vieira da Cunha, K. P., Araújo do Nascimento, C. W., & da Silva, A. J. (2008). *El silicio alivia la toxicidad del cadmio y el zinc para el maíz (Zea mays L.) cultivado en suelo contaminado*. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, 171(6), 849-853. <https://doi.org/10.1002/jpln.200800147>
- Wang, M., Gao, L., Dong, S., Sun, Y., Shen, Q., & Guo, S. (2017). Role of silicon in plant-pathogen interactions. *Frontiers in Plant Science*, 8, 701.

<https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00701>

- Woods, W. I., & Glaser, B. (2004). *Amazonian Dark Lands: Explorations in Space and Time*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
https://www.researchgate.net/publication/321609974_Amazonian_Dark_Earths_Explorations_in_Space_and_Time
- Xu, W., Xie, X., Li, Q., Yang, X., Ren, J., Shi, Y., Liu, D., Shaheen, S. M., & Rinklebe, J. (2024). Biochar co-pyrolyzed from peanut shells and maize straw improved soil biochemical properties, rice yield, and reduced cadmium mobilization and accumulation by rice: Biogeochemical investigations. *Journal of Hazardous Materials*, 466, 133486. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2024.133486>
- Yuan, P., Wu, D. Q., He, H. P., & Lin, Z. Y. (1997). Hydroxyl species and acidic sites on the diatomite surface: A combined study of IR and Raman. *Applied Surface Science*, 227, 30-39. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2003.10.031>
- Zeni, V., Baliota, G. V., Benelli, G., Canale, A., & Athanassiou, C. G. (2021). Diatomaceous earth for arthropod pest control: A return to the future. *Molecules*, 26(24), 7487. <https://doi.org/10.3390/molecules26247487>

ANEXOS

Anexo 1. Resultados del análisis del suelo de la parcela experimental del Anexo de Tayancayocc del Distrito de Huamanguilla



MULTISERVICIOS AGROLAB
INGENIEROS TRABAJANDO POR UN AGRO SOSTENIBLE
 LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES
ANÁLISIS DE SUELOS : CARACTERIZACIÓN

ASESORÍA Y CAPACITACIÓN EN:

- EVALUACIÓN Y MUESTREO DE SUELOS
- INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DEL ANÁLISIS AGRÍCOLA
- USO, MANEJO Y CONSERVACIÓN DE SUELOS
- ESTUDIOS DE IMPACTO AMBIENTAL
- AGRICULTURA SUSTENTABLE

Solicitante		Sr. Gil Edison De La Cruz Huamán				Fecha	10/11/2024	
Proyecto		N/A						
Departamento		Ayacucho	Provincia:	Huanla	Distrito:	Huamanguilla	C.P:	N/A
Sector				Altitud (m.s.n.m.)	N/A	Superficie:	Coordenadas: N/A	
Código de muestra	13414	Referencia de Campo:	Tayancayocc	Cultivo anterior:	papa	Cultivo a sembrar:	maíz	

Parámetro	Resultado	Unidad	Clasificación
1 pH (1:1)	5.15	Unidad pH	Fuertemente ácido
2 Conductividad (1:1)	0.17	dS m.-1	No salino
3 Carbonatos	0.00	%	Muy bajo
4 Materia orgánica	4.11	%	Alto
5 Fósforo disponible	38.00	ppm	Muy Alto
6 Potasio disponible	85	ppm	Medio
7 Nitrogeno total	0.21	%	Alto
8 C.I.C.	15.21	Cmol (+).kg-1	Medio

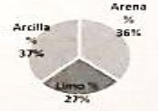
Acido	Neutro	Básica
5.15		
0.17		
0.00		
4.11		
38.0		
85		
0.21		
15.21		

Parámetro	Resultado	Unidad	Clasificación
10 Ca ⁺⁺	6.21	Cmol (+).kg-1	Medio
11 Mg ⁺⁺	1.30	Cmol (+).kg-1	Medio
12 K ⁺	0.24	Cmol (+).kg-1	Bajo
13 Na ⁺	0.34	Cmol (+).kg-1	Bajo
14 Al ⁺⁺⁺ + H ⁺	0.84	Cmol (+).kg-1	Muy alto
15 Saturación de bases	53	%	Medio

Bajo	Medio	Alto
6.21		
1.30		
0.24		
0.34		
0.84		
53		

Clase textural

Arena	%	Clase	Fr.Ar.
Arena	36		
Limo	27		
Arcilla	37		



Relaciones catiónicas

Parámetro	Resultado	Valoración
Ca / K	26.33	Deficiencia de Potasio
Ca / Mg	4.78	Deficiencia de Calcio
Mg / K	5.51	Deficiencia de Potasio
(Ca + Mg + K)/Al	9.2	

10/11/2024 Ph.D. Marjory Cerda Gómez
 Responsable de Laboratorio

Legenda:
 A = arena, A.Fr = Arena franca; Fr.A. = Franco arenoso; Fr = Franco; Fr.L = Franco limoso; L = Limoso; FrArA = Franco arcillo arenoso; FrAr = Franco arcilloso; FrArL = Franco arcillo limoso; ArA = Arcillo arenoso; ArL = Arcillo limoso; Ar = Arcilloso.

Urb. Mariscal Cáceres Mz. "G-12" - Ayacucho / ☎ (066) 312049 - 📞 966938028 - 966631889 / 📠 982781298 ✉ agrolab01@yahoo.es - agrolab107@gmail.com

Nota. Reporte de caracterización de análisis de suelo, por el laboratorio Multiservicios Agrolab -Ayacucho

Anexo 2. Fotografías del muestreo del suelo para su análisis



¡Error! Vínculo no válido. Nota. a. área experimental b. materiales para el muestreo del suelo c. extracción de muestras de suelos d. homogeneización de muestras de suelo para análisis físico-químico en laboratorio.

Anexo 3. Registro fotográfico de la desinfección de semillas de habas



Anexo 4. Fotografías de siembra de habas



Nota. **a.** marcado y apertura de surcos **b.** señalización de los tratamientos **c.** siembra de habas **d.** cubrimiento de semillas.

Anexo 5. *Fotografías de preparación y aplicación de biochar sobre el suelo*





Nota. *a.* obtención de biochar a través de pirolisis *b.* guano de ovino y biochar, ambos tamizados *c.* homogenización de biochar y guano de ovino en proporción 1:1 *d.* pesado para los tratamientos *e.* aplicación de biochar sobre el fondo de los surcos.

Anexo 6. Registro fotográfico sobre la aplicación de biol sobre biochar





Nota. **a.** insumo agrícola: biol de 10 litros; materiales: timbo y mochila de fumigar de capacidad 50 y 15 litros respectivamente **b.** mezcla de 35 L de agua con 10 L de biol, la cual se homogenizó antes de su aplicación sobre el biochar **c.** aplicación de biol con mochila de fumigar sobre el biochar en los surcos.

Anexo 7. Registro de fotografías sobre la aplicación de biosilice





Nota. **a.** Tierra de Diatomea de aplicación foliar **b.** acidificante de agua se aplicó 1ml/10l H₂O **c.** pesado de biosilice **d.** preparación de biosilice foliar con ayuda de papel tornasol **e. f. g.** primera, segunda y tercera aplicación de biosilice respectivamente.

Anexo 8. Registro de fotografías de las variables evaluadas







Nota. Registros de: **a.** altura de planta **b.** número de macollos/planta **c.** número de flores/planta **d.** número de vainas/planta **e.** longitud y diámetro de vainas **f.** número de granos/vaina **g.** peso de 100 semillas verdes **h.** peso de MS de los granos en laboratorio **i.** peso del rendimiento de vaina verde/tratamiento.

Anexo 9. Costo de producción del cultivo de haba verde para una hectárea en los tratamientos

ACTIVIDADES: T1	Unidad de medida	Veces	Cantidad	Costo Unitario (S/.)	Sub Total por Actividad (S/.)
Costos directos					8.252,40
Labores culturales					3.410,00
Preparación del terreno					660,00
Limpieza del terreno	Jornal		1	50,00	50,00
Aradura mecanizada	HM		4	80,00	320,00
Rastra o mullido	HM		2	70,00	140,00
Surcado	Jornal		3	50,00	150,00
					-
Siembra					200,00
Siembra de haba (global)	Jornal		4	50	200,00
Fertilización					450,00

Aplicación foliar de biosilice	Jornal	3	1	50,00	150,00
Aplicación de biochar	Jornal		3	50,00	150,00
Aplicación de fertilizantes granulados	Jornal	1	3	50,00	150,00
Riego					500,00
Riegos periódicos por aspersión (global)	Jornal		10	50,00	500,00
Control de malezas y raleo					250,00
Deshierbos	Jornal	4	4	50,00	200,00
Raleo	Jornal	1	1	50,00	50,00
Aporques					300,00
Primer aporque	Jornal	1	3	50,00	150,00
Segundo aporque	Jornal	1	3	50,00	150,00
Control fitosanitario y cosecha					450,00
Aplicación de fungicidas e insecticidas	Jornal	3	1	50,00	150,00
Cosecha de haba verde	Jornal	1	6,00	50,00	300,00
Insumos					2.509,90
Fertilizantes, semillas y bioestimulantes:					
Biochar	kg		0	-	-
Biosílce (dolomita)	kg		0	-	-
Biol	L		170	5,50	935,00
Semillas de haba	kg		70	5,00	350,00
Nitrato de amonio	kg		76	3,50	266,00
Superfosfato triple	kg		87	4,50	391,50
Cloruro de potasio	kg		58	2,80	162,40
Control fitosanitario					-
Fungicidas (VITAVAX® 300 WP)	kg		3	70,00	210,00
Insecticidas (Albatross® 200 SC)	L		3	60,00	180,00
Estabilizador de pH INTERCOR pH	L		0,5	30,00	15,00
Materiales y equipos					2.332,50
Cordel de nylon	und		1	25,00	25,00
Mantas	und		5	2,50	12,50
Costales			20	2,50	50,00
Cartel de Tecnopor	und		36	2,50	90,00

Yeso para señalizaciones	und	20	0,50	10,00
Bidón redondo con tapa y Suncho 50 litros	und	1	80,00	80,00
Mochila fumigadora	und	1	350,00	350,00
Implementos de riego por aspersión	global	1	1.200,00	1.200,00
Balde de 10 L	global	2	10,00	20,00
Picos	und	5	45,00	225,00
Rastrillos	und	2	35,00	70,00
Azadones	unid	5	40,00	200,00
Costos indirectos				1.167,67
Análisis del suelo		1	90,00	90,00
Alquiler de terreno	has	1	500,00	500,00
Gastos administrativos 5% CD			5%	412,62
Imprevistos 2% CD			2%	165,05
COSTOS TOTALES				9.420,07

ACTIVIDADES: T2	Unidad de medida	Veces	Cantidad	Costo Unitario (S/.)	Sub Total por Actividad (S/.)
Costos directos					8.439,90
Labores culturales					3.410,00
Preparación del terreno					660,00
Limpieza del terreno	Jornal		1	50,00	50,00
Aradura mecanizada	HM		4	80,00	320,00
Rastra o mullido	HM		2	70,00	140,00
Surcado	Jornal		3	50,00	150,00
					-
Siembra					200,00
Siembra de haba (global)	Jornal		4	50	200,00
Fertilización					450,00
Aplicación foliar de biosílíce	Jornal	3	1	50,00	150,00
Aplicación de biochar	Jornal		3	50,00	150,00
Aplicación de fertilizantes granulados	Jornal	1	3	50,00	150,00
Riego					500,00

Riegos periódicos por aspersión (global)	Jornal	10	50,00	500,00
Control de malezas y raleo				250,00
Deshierbos	Jornal	4	4	50,00
Raleo	Jornal	1	1	50,00
Aporques				300,00
Primer aporque	Jornal	1	3	50,00
Segundo aporque	Jornal	1	3	50,00
Control fitosanitario y cosecha				450,00
Aplicación de fungicidas e insecticidas	Jornal	3	1	50,00
Cosecha de haba verde	Jornal	1	6,00	50,00
Insumos				2.697,40
Fertilizantes, semillas y bioestimulantes:				
Biochar	kg	0	0,30	-
Biosílce (dolomita)	kg	3,75	50,00	187,50
Biol	L	170	5,50	935,00
Semillas de haba	kg	70	5,00	350,00
Nitrato de amonio	kg	76	3,50	266,00
Superfosfato triple	kg	87	4,50	391,50
Cloruro de potasio	kg	58	2,80	162,40
Control fitosanitario				-
Fungicidas (VITAVAX® 300 WP)	kg	3	70,00	210,00
Insecticidas (Albatross® 200 SC)	L	3	60,00	180,00
Estabilizador de pH INTERCOR pH	L	0,5	30,00	15,00
Materiales y equipos				2.332,50
Cordel de nylon	und	1	25,00	25,00
Mantas	und	5	2,50	12,50
Costales		20	2,50	50,00
Cartel de Tecnopor	und	36	2,50	90,00
Yeso para señalizaciones	und	20	0,50	10,00
Bidón redondo con tapa y Suncho 50 litros	und	1	80,00	80,00
Mochila fumigadora	und	1	350,00	350,00
Implementos de riego por aspersión	global	1	1.200,00	1.200,00

Balde de 10 L	global	2	10,00	20,00
Picos	und	5	45,00	225,00
Rastrillos	und	2	35,00	70,00
Azadones	unid	5	40,00	200,00
Costos indirectos				1.180,79
Análisis del suelo		1	90,00	90,00
Alquiler de terreno	has	1	500,00	500,00
Gastos administrativos 5% CD			5%	422,00
Imprevistos 2% CD			2%	168,80
COSTOS TOTALES				9.620,69

ACTIVIDADES: T3	Unidad de medida	Veces	Cantidad	Costo Unitario (S/.)	Sub Total por Actividad (S/.)
Costos directos					8.627,40
Labores culturales					3.410,00
Preparación del terreno					660,00
Limpieza del terreno	Jornal		1	50,00	50,00
Aradura mecanizada	HM		4	80,00	320,00
Rastra o mullido	HM		2	70,00	140,00
Surcado	Jornal		3	50,00	150,00
					-
Siembra					200,00
Siembra de haba (global)	Jornal		4	50	200,00
Fertilización					450,00
Aplicación foliar de biosíllice	Jornal	3	1	50,00	150,00
Aplicación de biochar	Jornal		3	50,00	150,00
Aplicación de fertilizantes granulados	Jornal	1	3	50,00	150,00
Riego					500,00
Riegos periódicos por aspersión (global)	Jornal		10	50,00	500,00
Control de malezas y raleo					250,00
Deshierbos	Jornal	4	4	50,00	200,00
Raleo	Jornal	1	1	50,00	50,00

Aporques					300,00
Primer aporque	Jornal	1	3	50,00	150,00
Segundo aporque	Jornal	1	3	50,00	150,00
Control fitosanitario y cosecha					450,00
Aplicación de fungicidas e insecticidas	Jornal	3	1	50,00	150,00
Cosecha de haba verde	Jornal	1	6,00	50,00	300,00
Insumos					2.884,90
Fertilizantes, semillas y bioestimulantes:					
Biochar	kg		0	0,30	-
Biosílce (dolomita)	kg		7,5	50,00	375,00
Biol	L		170	5,50	935,00
Semillas de haba	kg		70	5,00	350,00
Nitrato de amonio	kg		76	3,50	266,00
Superfosfato triple	kg		87	4,50	391,50
Cloruro de potasio	kg		58	2,80	162,40
Control fitosanitario					-
Fungicidas (VITAVAX® 300 WP)	kg		3	70,00	210,00
Insecticidas (Albatross® 200 SC)	L		3	60,00	180,00
Estabilizador de pH INTERCOR pH	L		0,5	30,00	15,00
Materiales y equipos					2.332,50
Cordel de nylon	und		1	25,00	25,00
Mantas	und		5	2,50	12,50
Costales			20	2,50	50,00
Cartel de Tecnopor	und		36	2,50	90,00
Yeso para señalizaciones	und		20	0,50	10,00
Bidón redondo con tapa y Suncho 50 litros	und		1	80,00	80,00
Mochila fumigadora	und		1	350,00	350,00
Implementos de riego por aspersión	global		1	1.200,00	1.200,00
Balde de 10 L	global		2	10,00	20,00
Picos	und		5	45,00	225,00
Rastrillos	und		2	35,00	70,00
Azadones	unid		5	40,00	200,00

COSTOS INDIRECTOS				1.193,92
Análisis del suelo		1	90,00	90,00
Alquiler de terreno	has	1	500,00	500,00
Gastos administrativos 5% CD			5%	431,37
Imprevistos 2% CD			2%	172,55
COSTOS TOTALES				9.821,32

ACTIVIDADES: T4	Unidad de medida	Veces	Cantidad	Costo Unitario (S/.)	Sub Total por Actividad (S/.)
Costos directos					8.814,90
Labores culturales					3.410,00
Preparación del terreno					660,00
Limpieza del terreno	Jornal		1	50,00	50,00
Aradura mecanizada	HM		4	80,00	320,00
Rastra o mullido	HM		2	70,00	140,00
Surcado	Jornal		3	50,00	150,00
					-
Siembra					200,00
Siembra de haba (global)	Jornal		4	50	200,00
Fertilización					450,00
Aplicación foliar de biosílice	Jornal	3	1	50,00	150,00
Aplicación de biochar	Jornal		3	50,00	150,00
Aplicación de fertilizantes granulados	Jornal	1	3	50,00	150,00
Riego					500,00
Riegos periódicos por aspersión (global)	Jornal		10	50,00	500,00
Control de malezas y raleo					250,00
Deshierbos	Jornal	4	4	50,00	200,00
Raleo	Jornal	1	1	50,00	50,00
Aporques					300,00
Primer aporque	Jornal	1	3	50,00	150,00
Segundo aporque	Jornal	1	3	50,00	150,00
Control fitosanitario y cosecha					450,00

Aplicación de fungicidas e insecticidas	Jornal	3	1	50,00	150,00
Cosecha de haba verde	Jornal	1	6,00	50,00	300,00
INSUMOS					3.072,40
INSUMOS					3.072,40
Fertilizantes, semillas y bioestimulantes:					
Biochar	kg		0	0,30	-
Biosílce (dolomita)	kg		11,25	50,00	562,50
Biol	L		170	5,50	935,00
Semillas de haba	kg		70	5,00	350,00
Nitrato de amonio	kg		76	3,50	266,00
Superfosfato triple	kg		87	4,50	391,50
Cloruro de potasio	kg		58	2,80	162,40
Control fitosanitario					-
Fungicidas (VITAVAX® 300 WP)	kg		3	70,00	210,00
Insecticidas (Albatross® 200 SC)	L		3	60,00	180,00
Estabilizador de pH INTERCOR pH	L		0,5	30,00	15,00
Materiales y equipos					2.332,50
Cordel de nylon	und		1	25,00	25,00
Mantas	und		5	2,50	12,50
Costales			20	2,50	50,00
Cartel de Tecnopor	und		36	2,50	90,00
Yeso para señalizaciones	und		20	0,50	10,00
Bidón redondo con tapa y Suncho 50 litros	und		1	80,00	80,00
Mochila fumigadora	und		1	350,00	350,00
Implementos de riego por aspersión	global		1	1.200,00	1.200,00
Balde de 10 L	global		2	10,00	20,00
Picos	und		5	45,00	225,00
Rastrillos	und		2	35,00	70,00
Azadones	unid		5	40,00	200,00
Costos indirectos					1.207,04
Análisis del suelo			1	90,00	90,00
Alquiler de terreno	has		1	500,00	500,00

Gastos administrativos 5% CD	5%	440,75
Imprevistos 2% CD	2%	176,30
COSTOS TOTALES		10.021,94

ACTIVIDADES: T5	Unidad de medida	Veces	Cantidad	Costo Unitario (S/.)	Sub Total por Actividad (S/.)
Costos directos					8.552,40
Labores culturales					3.410,00
Preparación del terreno					660,00
Limpieza del terreno	Jornal		1	50,00	50,00
Aradura mecanizada	HM		4	80,00	320,00
Rastra o mullido	HM		2	70,00	140,00
Surcado	Jornal		3	50,00	150,00
					-
Siembra					200,00
Siembra de haba (global)	Jornal		4	50	200,00
Fertilización					450,00
Aplicación foliar de biosílice	Jornal	3	1	50,00	150,00
Aplicación de biochar	Jornal		3	50,00	150,00
Aplicación de fertilizantes granulados	Jornal	1	3	50,00	150,00
Riego					500,00
Riegos periódicos por aspersión (global)	Jornal		10	50,00	500,00
Control de malezas y raleo					250,00
Deshierbos	Jornal	4	4	50,00	200,00
Raleo	Jornal	1	1	50,00	50,00
Aporques					300,00
Primer aporque	Jornal	1	3	50,00	150,00
Segundo aporque	Jornal	1	3	50,00	150,00
Control fitosanitario y cosecha					450,00
Aplicación de fungicidas e insecticidas	Jornal	3	1	50,00	150,00
Cosecha de haba verde	Jornal	1	6,00	50,00	300,00
Insumos					2.809,90

Fertilizantes, semillas y bioestimulantes:				
Biochar	kg	1000	0,30	300,00
Biosílce (dolomita)	kg	0	50,00	-
Biol	L	170	5,50	935,00
Semillas de haba	kg	70	5,00	350,00
Nitrato de amonio	kg	76	3,50	266,00
Superfosfato triple	kg	87	4,50	391,50
Cloruro de potasio	kg	58	2,80	162,40
Control fitosanitario				-
Fungicidas (VITAVAX® 300 WP)	kg	3	70,00	210,00
Insecticidas (Albatross® 200 SC)	L	3	60,00	180,00
Estabilizador de pH INTERCOR pH	L	0,5	30,00	15,00
Materiales y equipos				2.332,50
Cordel de nylon	und	1	25,00	25,00
Mantas	und	5	2,50	12,50
Costales		20	2,50	50,00
Cartel de Tecnopor	und	36	2,50	90,00
Yeso para señalizaciones	und	20	0,50	10,00
Bidón redondo con tapa y Suncho 50 litros	und	1	80,00	80,00
Mochila fumigadora	und	1	350,00	350,00
Implementos de riego por aspersión	global	1	1.200,00	1.200,00
Balde de 10 L	global	2	10,00	20,00
Picos	und	5	45,00	225,00
Rastrillos	und	2	35,00	70,00
Azadones	unid	5	40,00	200,00
Costos indirectos				1.188,67
Análisis del suelo		1	90,00	90,00
Alquiler de terreno	has	1	500,00	500,00
Gastos administrativos 5% CD			5%	427,62
Imprevistos 2% CD			2%	171,05
COSTOS TOTALES				9.741,07

ACTIVIDADES: T6	Unidad de medida	Veces	Cantidad	Costo Unitario (S/.)	Sub Total por Actividad (S/.)
Costos directos					8.739,90
Labores culturales					3.410,00
Preparación del terreno					660,00
Limpieza del terreno	Jornal		1	50,00	50,00
Aradura mecanizada	HM		4	80,00	320,00
Rastra o mullido	HM		2	70,00	140,00
Surcado	Jornal		3	50,00	150,00
					-
Siembra					200,00
Siembra de haba (global)	Jornal		4	50	200,00
Fertilización					450,00
Aplicación foliar de biosílce	Jornal	3	1	50,00	150,00
Aplicación de biochar	Jornal		3	50,00	150,00
Aplicación de fertilizantes granulados	Jornal	1	3	50,00	150,00
Riego					500,00
Riegos periódicos por aspersión (global)	Jornal		10	50,00	500,00
Control de malezas y raleo					250,00
Deshierbos	Jornal	4	4	50,00	200,00
Raleo	Jornal	1	1	50,00	50,00
Aporques					300,00
Primer aporque	Jornal	1	3	50,00	150,00
Segundo aporque	Jornal	1	3	50,00	150,00
Control fitosanitario y cosecha					450,00
Aplicación de fungicidas e insecticidas	Jornal	3	1	50,00	150,00
Cosecha de haba verde	Jornal	1	6,00	50,00	300,00
Insumos					2.997,40
Fertilizantes, semillas y bioestimulantes:					
Biochar	kg		1000	0,30	300,00
Biosílce (dolomita)	kg		3,75	50,00	187,50
Biol	L		170	5,50	935,00

Semillas de haba	kg	70	5,00	350,00
Nitrato de amonio	kg	76	3,50	266,00
Superfosfato triple	kg	87	4,50	391,50
Cloruro de potasio	kg	58	2,80	162,40
Control fitosanitario				-
Fungicidas (VITAVAX® 300 WP)	kg	3	70,00	210,00
Insecticidas (Albatross® 200 SC)	L	3	60,00	180,00
Estabilizador de pH INTERCOR pH	L	0,5	30,00	15,00
Materiales y equipos				2.332,50
Cordel de nylon	und	1	25,00	25,00
Mantas	und	5	2,50	12,50
Costales		20	2,50	50,00
Cartel de Tecnopor	und	36	2,50	90,00
Yeso para señalizaciones	und	20	0,50	10,00
Bidón redondo con tapa y Suncho 50 litros	und	1	80,00	80,00
Mochila fumigadora	und	1	350,00	350,00
Implementos de riego por aspersión	global	1	1.200,00	1.200,00
Balde de 10 L	global	2	10,00	20,00
Picos	und	5	45,00	225,00
Rastrillos	und	2	35,00	70,00
Azadones	unid	5	40,00	200,00
Costos indirectos				1.201,79
Análisis del suelo		1	90,00	90,00
Alquiler de terreno	has	1	500,00	500,00
Gastos administrativos 5% CD			5%	437,00
Imprevistos 2% CD			2%	174,80
COSTOS TOTALES				9.941,69

ACTIVIDADES: T7	Unidad de medida	Veces	Cantidad	Costo Unitario (S/.)	Sub Total por Actividad (S/.)
Costos directos					8.927,40
Labores culturales					3.410,00

Preparación del terreno					660,00
Limpieza del terreno	Jornal	1	50,00	50,00	
Aradura mecanizada	HM	4	80,00	320,00	
Rastra o mullido	HM	2	70,00	140,00	
Surcado	Jornal	3	50,00	150,00	
					-
Siembra					200,00
Siembra de haba (global)	Jornal	4	50	200,00	
Fertilización					450,00
Aplicación foliar de biosílce	Jornal	3	1	50,00	150,00
Aplicación de biochar	Jornal		3	50,00	150,00
Aplicación de fertilizantes granulados	Jornal	1	3	50,00	150,00
Riego					500,00
Riegos periódicos por aspersión (global)	Jornal		10	50,00	500,00
Control de malezas y raleo					250,00
Deshierbos	Jornal	4	4	50,00	200,00
Raleo	Jornal	1	1	50,00	50,00
Aporques					300,00
Primer aporque	Jornal	1	3	50,00	150,00
Segundo aporque	Jornal	1	3	50,00	150,00
Control fitosanitario y cosecha					450,00
Aplicación de fungicidas e insecticidas	Jornal	3	1	50,00	150,00
Cosecha de haba verde	Jornal	1	6,00	50,00	300,00
Insumos					3.184,90
Fertilizantes, semillas y bioestimulantes:					
Biochar	kg		1000	0,30	300,00
Biosílce (dolomita)	kg		7,5	50,00	375,00
Biol	L		170	5,50	935,00
Semillas de haba	kg		70	5,00	350,00
Nitrato de amonio	kg		76	3,50	266,00
Superfosfato triple	kg		87	4,50	391,50
Cloruro de potasio	kg		58	2,80	162,40

Control fitosanitario				-
Fungicidas (VITAVAX® 300 WP)	kg	3	70,00	210,00
Insecticidas (Albatross® 200 SC)	L	3	60,00	180,00
Estabilizador de pH INTERCOR pH	L	0,5	30,00	15,00
Materiales y equipos				2.332,50
Cordel de nylon	und	1	25,00	25,00
Mantas	und	5	2,50	12,50
Costales		20	2,50	50,00
Cartel de Tecnopor	und	36	2,50	90,00
Yeso para señalizaciones	und	20	0,50	10,00
Bidón redondo con tapa y Suncho 50 litros	und	1	80,00	80,00
Mochila fumigadora	und	1	350,00	350,00
Implementos de riego por aspersión	global	1	1.200,00	1.200,00
Balde de 10 L	global	2	10,00	20,00
Picos	und	5	45,00	225,00
Rastrillos	und	2	35,00	70,00
Azadones	unid	5	40,00	200,00
Costos indirectos				1.214,92
Análisis del suelo		1	90,00	90,00
Alquiler de terreno	has	1	500,00	500,00
Gastos administrativos 5% CD			5%	446,37
Imprevistos 2% CD			2%	178,55
COSTOS TOTALES				10.142,32

ACTIVIDADES: T8	Unidad de medida	Veces	Cantidad	Costo Unitario (S/.)	Sub Total por Actividad (S/.)
Costos directos					9.114,90
Labores culturales					3.410,00
Preparación del terreno					660,00
Limpieza del terreno	Jornal		1	50,00	50,00
Aradura mecanizada	HM		4	80,00	320,00

Rastra o mullido	HM	2	70,00	140,00
Surcado	Jornal	3	50,00	150,00
				-
Siembra				200,00
Siembra de haba (global)	Jornal	4	50	200,00
Fertilización				450,00
Aplicación foliar de biosílce	Jornal	3	1	50,00
Aplicación de biochar	Jornal		3	50,00
Aplicación de fertilizantes granulados	Jornal	1	3	50,00
Riego				500,00
Riegos periódicos por aspersión (global)	Jornal		10	50,00
Control de malezas y raleo				250,00
Deshierbos	Jornal	4	4	50,00
Raleo	Jornal	1	1	50,00
Aporques				300,00
Primer aporque	Jornal	1	3	50,00
Segundo aporque	Jornal	1	3	50,00
Control fitosanitario y cosecha				450,00
Aplicación de fungicidas e insecticidas	Jornal	3	1	50,00
Cosecha de haba verde	Jornal	1	6,00	50,00
Insumos				3.372,40
Fertilizantes, semillas y bioestimulantes:				
Biochar	kg		1000	0,30
Biosílce (dolomita)	kg		11,25	50,00
Biol	L		170	5,50
Semillas de haba	kg		70	5,00
Nitrato de amonio	kg		76	3,50
Superfosfato triple	kg		87	4,50
Cloruro de potasio	kg		58	2,80

Control fitosanitario					-
Fungicidas (VITAVAX® 300 WP)	kg	3	70,00	210,00	
Insecticidas (Albatross® 200 SC)	L	3	60,00	180,00	
Estabilizador de pH INTERCOR pH	L	0,5	30,00	15,00	
Materiales y equipos					2.332,50
Cordel de nylon	und	1	25,00	25,00	
Mantas	und	5	2,50	12,50	
Costales		20	2,50	50,00	
Cartel de Tecnopor	und	36	2,50	90,00	
Yeso para señalizaciones	und	20	0,50	10,00	
Bidón redondo con tapa y Suncho 50 litros	und	1	80,00	80,00	
Mochila fumigadora	und	1	350,00	350,00	
Implementos de riego por aspersion	global	1	1.200,00	1.200,00	
Balde de 10 L	global	2	10,00	20,00	
Picos	und	5	45,00	225,00	
Rastrillos	und	2	35,00	70,00	
Azadones	unid	5	40,00	200,00	
Costos indirectos					1.228,04
Análisis del suelo		1	90,00	90,00	
Alquiler de terreno	has	1	500,00	500,00	
Gastos administrativos 5% CD			5%	455,75	
Imprevistos 2% CD			2%	182,30	
COSTOS TOTALES					10.342,94

ACTIVIDADES: T9	Unidad de medida	Veces	Cantidad	Costo Unitario (S/.)	Sub Total por Actividad (S/.)
Costos directos					8.852,40
Labores culturales					3.410,00
Preparación del terreno					660,00
Limpieza del terreno	Jornal		1	50,00	50,00

Aradura mecanizada	HM	4	80,00	320,00
Rastra o mullido	HM	2	70,00	140,00
Surcado	Jornal	3	50,00	150,00
				-
Siembra				200,00
Siembra de haba (global)	Jornal	4	50	200,00
Fertilización				450,00
Aplicación foliar de biosílce	Jornal	3	1	50,00 150,00
Aplicación de biochar	Jornal		3	50,00 150,00
Aplicación de fertilizantes granulados	Jornal	1	3	50,00 150,00
Riego				500,00
Riegos periódicos por aspersión (global)	Jornal	10	50,00	500,00
Control de malezas y raleo				250,00
Deshierbos	Jornal	4	4	50,00 200,00
Raleo	Jornal	1	1	50,00 50,00
Aporques				300,00
Primer aporque	Jornal	1	3	50,00 150,00
Segundo aporque	Jornal	1	3	50,00 150,00
Control fitosanitario y cosecha				450,00
Aplicación de fungicidas e insecticidas	Jornal	3	1	50,00 150,00
Cosecha de haba verde	Jornal	1	6,00	50,00 300,00
Insumos				3.109,90
Fertilizantes, semillas y bioestimulantes:				
Biochar	kg	2000	0,30	600,00
Biosílce (dolomita)	kg	0	50,00	-
Biol	L	170	5,50	935,00
Semillas de haba	kg	70	5,00	350,00
Nitrato de amonio	kg	76	3,50	266,00
Superfosfato triple	kg	87	4,50	391,50
Cloruro de potasio	kg	58	2,80	162,40
Control fitosanitario				-
Fungicidas (VITAVAX® 300 WP)	kg	3	70,00	210,00

Insecticidas (Albatross® 200 SC)	L	3	60,00	180,00
Estabilizador de pH INTERCOR pH	L	0,5	30,00	15,00
Materiales y equipos				2.332,50
Cordel de nylon	und	1	25,00	25,00
Mantas	und	5	2,50	12,50
Costales		20	2,50	50,00
Cartel de Tecnopor	und	36	2,50	90,00
Yeso para señalizaciones	und	20	0,50	10,00
Bidón redondo con tapa y Suncho 50 litros	und	1	80,00	80,00
Mochila fumigadora	und	1	350,00	350,00
Implementos de riego por aspersión	global	1	1.200,00	1.200,00
Balde de 10 L	global	2	10,00	20,00
Picos	und	5	45,00	225,00
Rastrillos	und	2	35,00	70,00
Azadones	unid	5	40,00	200,00
Costos indirectos				1.209,67
Análisis del suelo		1	90,00	90,00
Alquiler de terreno	has	1	500,00	500,00
Gastos administrativos 5% CD			5%	442,62
Imprevistos 2% CD			2%	177,05
COSTOS TOTALES				10.062,07

ACTIVIDADES: T10	Unidad de medida	Veces	Cantidad	Costo Unitario (S./.)	Sub Total por Actividad (S./.)
Costos directos					9.039,90
Labores culturales					3.410,00
Preparación del terreno					660,00
Limpieza del terreno	Jornal		1	50,00	50,00
Aradura mecanizada	HM		4	80,00	320,00
Rastra o mullido	HM		2	70,00	140,00
Surcado	Jornal		3	50,00	150,00
					-

Siembra					200,00
Siembra de haba (global)	Jornal	4	50	200,00	
Fertilización					450,00
Aplicación foliar de biosílice	Jornal	3	1	50,00	150,00
Aplicación de biochar	Jornal		3	50,00	150,00
Aplicación de fertilizantes granulados	Jornal	1	3	50,00	150,00
Riego					500,00
Riegos periódicos por aspersión (global)	Jornal	10	50,00	500,00	
Control de malezas y raleo					250,00
Deshierbos	Jornal	4	4	50,00	200,00
Raleo	Jornal	1	1	50,00	50,00
Aporques					300,00
Primer aporque	Jornal	1	3	50,00	150,00
Segundo aporque	Jornal	1	3	50,00	150,00
Control fitosanitario y cosecha					450,00
Aplicación de fungicidas e insecticidas	Jornal	3	1	50,00	150,00
Cosecha de haba verde	Jornal	1	6,00	50,00	300,00
Insumos					3.297,40
Fertilizantes, semillas y bioestimulantes:					
Biochar	kg	2000	0,30	600,00	
Biosílce (dolomita)	kg	3,75	50,00	187,50	
Biol	L	170	5,50	935,00	
Semillas de haba	kg	70	5,00	350,00	
Nitrato de amonio	kg	76	3,50	266,00	
Superfosfato triple	kg	87	4,50	391,50	
Cloruro de potasio	kg	58	2,80	162,40	
Control fitosanitario					-
Fungicidas (VITAVAX® 300 WP)	kg	3	70,00	210,00	
Insecticidas (Albatross® 200 SC)	L	3	60,00	180,00	
Estabilizador de pH INTERCOR pH	L	0,5	30,00	15,00	
Materiales y equipos					2.332,50
Cordel de nylon	und	1	25,00	25,00	

Mantas	und	5	2,50	12,50
Costales		20	2,50	50,00
Cartel de Tecnopor	und	36	2,50	90,00
Yeso para señalizaciones	und	20	0,50	10,00
Bidón redondo con tapa y Suncho 50 litros	und	1	80,00	80,00
Mochila fumigadora	und	1	350,00	350,00
Implementos de riego por aspersión	global	1	1.200,00	1.200,00
Balde de 10 L	global	2	10,00	20,00
Picos	und	5	45,00	225,00
Rastrillos	und	2	35,00	70,00
Azadones	unid	5	40,00	200,00
Costos indirectos				1.222,79
Análisis del suelo		1	90,00	90,00
Alquiler de terreno	has	1	500,00	500,00
Gastos administrativos 5% CD			5%	452,00
Imprevistos 2% CD			2%	180,80
COSTOS TOTALES				10.262,69

ACTIVIDADES: T11	Unidad de medida	Veces	Cantidad	Costo Unitario (S/.)	Sub Total por Actividad (S/.)
Costos directos					9.227,40
Labores culturales					3.410,00
Preparación del terreno					660,00
Limpieza del terreno	Jornal		1	50,00	50,00
Aradura mecanizada	HM		4	80,00	320,00
Rastra o mullido	HM		2	70,00	140,00
Surcado	Jornal		3	50,00	150,00
					-
Siembra					200,00
Siembra de haba (global)	Jornal		4	50	200,00
Fertilización					450,00
Aplicación foliar de biosílíce	Jornal	3	1	50,00	150,00

Aplicación de biochar	Jornal		3	50,00	150,00
Aplicación de fertilizantes granulados	Jornal	1	3	50,00	150,00
Riego					500,00
Riegos periódicos por aspersión (global)	Jornal		10	50,00	500,00
Control de malezas y raleo					250,00
Deshierbos	Jornal	4	4	50,00	200,00
Raleo	Jornal	1	1	50,00	50,00
APORQUES					300,00
Primer aporque	Jornal	1	3	50,00	150,00
Segundo aporque	Jornal	1	3	50,00	150,00
Control fitosanitario y cosecha					450,00
Aplicación de fungicidas e insecticidas	Jornal	3	1	50,00	150,00
Cosecha de haba verde	Jornal	1	6,00	50,00	300,00
Insumos					3.484,90
Fertilizantes, semillas y bioestimulantes:					
Biochar	kg		2000	0,30	600,00
Biosílce (dolomita)	kg		7,5	50,00	375,00
Biol	L		170	5,50	935,00
Semillas de haba	kg		70	5,00	350,00
Nitrato de amonio	kg		76	3,50	266,00
Superfosfato triple	kg		87	4,50	391,50
Cloruro de potasio	kg		58	2,80	162,40
Control fitosanitario					-
Fungicidas (VITAVAX® 300 WP)	kg		3	70,00	210,00
Insecticidas (Albatross® 200 SC)	L		3	60,00	180,00
Estabilizador de pH INTERCOR pH	L		0,5	30,00	15,00
Materiales y equipos					2.332,50
Cordel de nylon	und		1	25,00	25,00
Mantas	und		5	2,50	12,50
Costales			20	2,50	50,00
Cartel de Tecnopor	und		36	2,50	90,00
Yeso para señalizaciones	und		20	0,50	10,00

Bidón redondo con tapa y Suncho 50 litros	und	1	80,00	80,00
Mochila fumigadora	und	1	350,00	350,00
Implementos de riego por aspersión	global	1	1.200,00	1.200,00
Balde de 10 L	global	2	10,00	20,00
Picos	und	5	45,00	225,00
Rastrillos	und	2	35,00	70,00
Azadones	unid	5	40,00	200,00
Costos indirectos				1.235,92
Análisis del suelo		1	90,00	90,00
Alquiler de terreno	has	1	500,00	500,00
Gastos administrativos 5% CD			5%	461,37
Imprevistos 2% CD			2%	184,55
COSTOS TOTALES				10.463,32

ACTIVIDADES: T12	Unidad de medida	Veces	Cantidad	Costo Unitario (S/.)	Sub Total por Actividad (S/.)
Costos directos					9.414,90
Labores culturales					3.410,00
Preparación del terreno					660,00
Limpieza del terreno	Jornal		1	50,00	50,00
Aradura mecanizada	HM		4	80,00	320,00
Rastra o mullido	HM		2	70,00	140,00
Surcado	Jornal		3	50,00	150,00
					-
Siembra					200,00
Siembra de haba (global)	Jornal		4	50	200,00
Fertilización					450,00
Aplicación foliar de biosílíce	Jornal	3	1	50,00	150,00
Aplicación de biochar	Jornal		3	50,00	150,00
Aplicación de fertilizantes granulados	Jornal	1	3	50,00	150,00
Riego					500,00
Riegos periódicos por aspersión (global)	Jornal		10	50,00	500,00

Control de malezas y raleo					250,00
Deshierbos	Jornal	4	4	50,00	200,00
Raleo	Jornal	1	1	50,00	50,00
Aporques					300,00
Primer aporque	Jornal	1	3	50,00	150,00
Segundo aporque	Jornal	1	3	50,00	150,00
Control fitosanitario y cosecha					450,00
Aplicación de fungicidas y insecticidas	Jornal	3	1	50,00	150,00
Cosecha de haba verde	Jornal	1	6,00	50,00	300,00
Insumos					3.672,40
Fertilizantes, semillas y bioestimulantes:					
Biochar	kg		2000	0,30	600,00
Biosílce (dolomita)	kg		11,25	50,00	562,50
Biol	L		170	5,50	935,00
Semillas de haba	kg		70	5,00	350,00
Nitrato de amonio	kg		76	3,50	266,00
Superfosfato triple	kg		87	4,50	391,50
Cloruro de potasio	kg		58	2,80	162,40
Control fitosanitario					-
Fungicidas (VITAVAX® 300 WP)	kg		3	70,00	210,00
Insecticidas (Albatross® 200 SC)	L		3	60,00	180,00
Estabilizador de pH INTERCOR pH	L		0,5	30,00	15,00
MATERIALES Y EQUIPOS					2.332,50
Cordel de nylon	und		1	25,00	25,00
Mantas	und		5	2,50	12,50
Costales			20	2,50	50,00
Cartel de Tecnopor	und		36	2,50	90,00
Yeso para señalizaciones	und		20	0,50	10,00
Bidón redondo con tapa y Suncho 50 litros	und		1	80,00	80,00
Mochila fumigadora	und		1	350,00	350,00
Implementos de riego por aspersión	global		1	1.200,00	1.200,00
Balde de 10 L	global		2	10,00	20,00

Picos	und	5	45,00	225,00
Rastrillos	und	2	35,00	70,00
Azadones	unid	5	40,00	200,00
Costos indirectos				1.249,04
Análisis del suelo		1	90,00	90,00
Alquiler de terreno	has	1	500,00	500,00
Gastos administrativos 5% CD			5%	470,75
Imprevistos 2% CD			2%	188,30
COSTOS TOTALES				10.663,94

Anexo 10. *Resumen de costos directos e indirectos*

Tratamientos	Costos directos (S/.)	Costos indirectos (S/.)	Costo de producción
T1	8.252,40	1.167,67	9.420,07
T2	8.439,90	1.180,79	9.620,69
T3	8.627,40	1.193,92	9.821,32
T4	8.814,90	1.207,04	10.021,94
T5	8.552,40	1.188,67	9.741,07
T6	8.739,90	1.201,79	9.941,69
T7	8.927,40	1.214,92	10.142,32
T8	9.114,90	1.228,04	10.342,94
T9	8.852,40	1.209,67	10.062,07
T10	9.039,90	1.222,79	10.262,69
T11	9.227,40	1.235,92	10.463,32
T12	9.414,90	1.249,04	10.663,94

**UNSCH**FACULTAD DE CIENCIAS
AGRARIAS**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS**
Bach. GIL EDISON DE LA CRUZ HUAMAN**R.D. N° 191-2026-UNSCH-FCA-D**

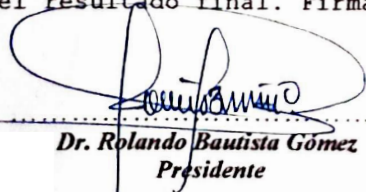
En la ciudad de Ayacucho, a los dieciseis días del mes de junio del año dos mil veintiséis, siendo las dieciocho horas, se reunieron en el auditorio de la Facultad de Ciencias Agrarias, bajo la presidencia del Dr. Felipe Escobar Ramírez Decano de la Facultad de Ciencias Agrarias; los miembros del jurado conformado por el Dr. Rolando Bautista Gómez, Dr. Raúl José Palomino Marcatoma como asesor, M.Sc. Alex Lázaro Tineo Bermúdez y el Ing. Juan Benjamín Girón Molina; actuando como secretario de actas el Mtro. Rodolfo Alca Mendoza, para recibir la sustentación de la Tesis titulado: **Dosis de biosílíce y biochar en el rendimiento de haba (*Vicia faba* L.) en Huamanguilla a 3458 msnm. Ayacucho - 2024**, para obtener el Título Profesional de Ingeniero Agrónomo, presentado por el Bachiller **GIL EDISON DE LA CRUZ HUAMAN**.

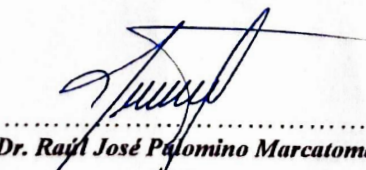
El señor Decano previa verificación de los documentos exigidos solicitó se proceda con la sustentación y posterior defensa de la tesis en un periodo de cuarenta y cinco minutos de acuerdo al reglamento de grados y títulos vigente. Terminado la exposición, los miembros del Jurado, formularon sus preguntas, aclaraciones y/o observaciones correspondientes. Luego se invitó a los miembros del jurado pasar a otra aula para la deliberación y calificación del trabajo de tesis, teniendo el siguiente resultado:

Jurado evaluador	Exposición	Respuestas a las preguntas	Generación de conocimiento	Promedio
Dr. Rolando Bautista Gómez	15	14	15	15
Dr. Raúl José Palomino Marcatoma	16	15	17	16
M.Sc. Alex Lázaro Tineo Bermúdez	14	15	16	15
Ing. Juan Benjamín Girón Molina	16	15	16	16
PROMEDIO GENERAL				16

OBSERVACIONES: Por acuerdo unánime de los miembros del jurado, el título del trabajo de investigación debe ser: **Dosis de biosílíce y biochar enriquecido en el rendimiento en vaina verde de haba (*Vicia faba* L.) en Huamanguilla, Ayacucho - 2024.**

Acto seguido se invita a la sustentante y público en general para dar a conocer el resultado final. Firman el acta.


.....
Dr. Rolando Bautista Gómez
Presidente


.....
Dr. Raúl José Palomino Marcatoma
Asesor


.....
M. Sc. Alex Lázaro Tineo Bermúdez
Jurado


.....
Ing. Juan Benjamín Girón Molina
Jurado


.....
Mtro. Rodolfo Alca Mendoza
Secretario Docente

**UNSCH**FACULTAD DE CIENCIAS
AGRARIAS

CONSTANCIA DE CONTROL DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE TESIS

El que suscribe, miembro de la comisión de docentes instructores responsables de operativizar, verificar, garantizar y controlar la originalidad de los trabajos de **TESIS** de la Facultad de Ciencias Agrarias, de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, autorizado por R.D N° 213-2025-UNSCH-FCA-D; hace constar que el trabajo titulado;

Dosis de biosíllice y biochar enriquecido en el rendimiento en vaina verde de haba (*Vicia faba* L.) en Huamanguilla, Ayacucho - 2024.

Autor : Gil Edison DE LA CRUZ HUAMAN
Asesor : Raúl José PALOMINO MARCATOMA

Ha sido sometido al control de originalidad mediante el software TURNITIN UNSCH, acorde al Reglamento de originalidad de trabajos de tesis, aprobando mediante de RCU 039-2021-UNSCH-CU, arrojando un resultado de quince por ciento **(15%)** de índice de similitud, realizado con **depósito de trabajo estándar**.

En consecuencia, se otorga la presente Constancia de Originalidad para los fines pertinentes.

Nota: Se adjunta el resultado con identificador de la entrega: 2997488360

Ayacucho, 13 de julio de 2026

.....
Angela J. Requis Quintanilla

M.Sc. en Fitopatología
E.P. Agronomía

Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga

Dosis de biosílíce y biochar enriquecido en el rendimiento en vaina verde de haba (*Vicia faba* L.) en Huamanguilla, Ayacucho - 2024.

por Gil Edison DE LA CRUZ HUAMAN

Fecha de entrega: 13-jul-2026 09:50a. m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2997488360

Nombre del archivo: Tesis_final_Gil_Edison_De_La_Cruz_Huaman_3_.pdf (10.87M)

Total de palabras: 48018

Total de caracteres: 240422

Dosis de biosílíce y biochar enriquecido en el rendimiento en vaina verde de haba (Vicia faba L.) en Huamanguilla, Ayacucho - 2024.

INFORME DE ORIGINALIDAD			
15%	15%	6%	7%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS	
1	repositorio.unsch.edu.pe Fuente de Internet
2	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga Trabajo del estudiante
3	repositorio.udh.edu.pe Fuente de Internet
4	repositorio.undac.edu.pe Fuente de Internet
5	repositorio.uncp.edu.pe Fuente de Internet
6	www.tecnicana.org Fuente de Internet
7	dspace.unitru.edu.pe Fuente de Internet
8	repositorio.utn.edu.ec Fuente de Internet
9	www.slideshare.net Fuente de Internet
10	terralatinoamericana.org.mx Fuente de Internet
11	silisio.blogspot.com Fuente de Internet
12	hdl.handle.net Fuente de Internet
13	cica.ucr.ac.cr Fuente de Internet
14	Submitted to Universidad Nacional de Piura Trabajo del estudiante

15

Fuente de Internet

16

uvadoc.uva.es

Fuente de Internet

17

apirepositorio.unu.edu.pe

Fuente de Internet

18

repositorio.unah.edu.pe

Fuente de Internet

19

dspace.utb.edu.ec

Fuente de Internet

20

reunioncientificatabasco.org.mx

Fuente de Internet

21

apirepositorio.unh.edu.pe

Fuente de Internet

22

revistas.unicauca.edu.co

Fuente de Internet

23

rein.umcc.cu

Fuente de Internet

24

[Submitted to Universidad Nacional de Colombia](#)

Trabajo del estudiante

25

[Submitted to Costa Rica Institute of Technology](#)

Trabajo del estudiante

26

api.index-360.com

Fuente de Internet

27

www.researchgate.net

Fuente de Internet

28

www.tdx.cat

Fuente de Internet

29

revistas.unsch.edu.pe

Fuente de Internet

30

dgsa.uaeh.edu.mx:8080

Fuente de Internet

31

acorbatinternacional.com

Fuente de Internet

32

colposdigital.colpos.mx:8080

Fuente de Internet

33 repositorio.unal.edu.co
Fuente de Internet

34 Submitted to Universidad Politécnica Estatal de Carchi
Trabajo del estudiante

35 repositorio.unc.edu.pe
Fuente de Internet

36 Submitted to Universidad Nacional de Trujillo
Trabajo del estudiante

37 repositorio.unjbg.edu.pe
Fuente de Internet

38 bdigital.zamorano.edu
Fuente de Internet

39 vdocuments.es
Fuente de Internet

40 Teodoro Ascensión San Román Suárez, Vilma Rocio Hualla Mamani, Amelia Huaranga Joaquin. "IMPACTO DE ABONOS ORGÁNICOS EN EL RENDIMIENTO DE FRIJOL (PHASEO VULGARIS L.) EN LA COSTA PERUANA", Editora Científica Digital, 2021
Publicación

41 Submitted to Instituto Tecnológico de Costa Rica
Trabajo del estudiante

42 repositorio.lamolina.edu.pe
Fuente de Internet

43 repositorio.uta.edu.ec
Fuente de Internet

44 revistaalfa.org
Fuente de Internet

45 www.scielo.org.mx
Fuente de Internet

Dosis de biosílice y biochar enriquecido mejoran el rendimiento y la rentabilidad del cultivo de haba (*Vicia faba* L.) en condiciones altoandinas de Ayacucho, Perú.

Dosages of biosilica and enriched biochar improve the yield and profitability of fava bean (*Vicia faba* L.) cultivation under high-Andean conditions in Ayacucho, Peru.

Gil Edison De La Cruz Huamán¹, Raúl José Palomino Marcatoma²

Área de investigación: Ingeniería y Ciencias básicas

Línea de Investigación: Ciencias de la tierra y el ambiente

gil.delacruz.01@unsch.edu.pe

raul.palomino@unsch.edu.pe

RESUMEN

El uso intensivo de fertilizantes sintéticos y la degradación progresiva de los suelos agrícolas representan factores limitantes en la productividad de cultivos en los Andes peruanos. En este contexto, el biochar enriquecido y la biosílice constituyen alternativas sostenibles capaces de mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, favoreciendo el crecimiento y el rendimiento de los cultivos. El objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto de diferentes dosis de biochar enriquecido y biosílice sobre el rendimiento en vaina verde y la rentabilidad económica del cultivo de haba (*Vicia faba* L.) en condiciones altoandinas de Huamanguilla, Ayacucho. El experimento se desarrolló durante la campaña agrícola 2024–2025 utilizando un Diseño de Bloques Completos al Azar con arreglo factorial 3×4, constituido por tres niveles de biochar (0, 1 y 2 t ha⁻¹) y cuatro concentraciones de biosílice (0; 0,5; 1,0 y 1,5%), con tres repeticiones. Se evaluaron variables de crecimiento, componentes del rendimiento, rendimiento en vaina verde y rentabilidad económica. Los datos fueron sometidos a análisis de varianza y comparación de medias mediante la prueba de Duncan ($\alpha = 0,05$). Los resultados evidenciaron interacción significativa entre ambos factores para la mayoría de variables evaluadas. La combinación de 2 t ha⁻¹ de biochar enriquecido y 1,5% de biosílice produjo los mayores valores de altura de planta (168,48 cm), número de flores (39 planta⁻¹),

número de vainas (36 planta^{-1}), longitud de vaina (13,90 cm), materia seca del grano (51,20%) y rendimiento en vaina verde ($11,77 \text{ t ha}^{-1}$). Asimismo, este tratamiento presentó la mayor relación beneficio/costo (1,01), demostrando su viabilidad económica. Se concluye que la aplicación conjunta de biochar enriquecido y biosílice constituye una estrategia eficiente para incrementar la productividad y rentabilidad del cultivo de haba bajo condiciones agroecológicas de la sierra sur del Perú, contribuyendo además al manejo sostenible del suelo.

Palabras clave: agricultura sostenible, biochar, biosílice, diatomita, fertilidad del suelo, rendimiento, *Vicia faba*.

ABSTRACT

Soil degradation and the excessive use of synthetic fertilizers are among the major constraints limiting crop productivity in the Peruvian highlands. Enriched biochar and biosilica have emerged as sustainable soil amendments capable of improving soil physical, chemical, and biological properties while enhancing crop growth and productivity. This study evaluated the effects of different doses of enriched biochar and biosilica on green pod yield and economic profitability of broad bean (*Vicia faba* L.) under high Andean conditions in Huamanguilla, Ayacucho, Peru. The experiment was conducted during the 2024–2025 growing season using a randomized complete block design with a 3×4 factorial arrangement consisting of three biochar rates (0, 1, and 2 t ha^{-1}) and four biosilica concentrations (0, 0.5, 1.0, and 1.5%), with three replications. Growth traits, yield components, green pod yield, and economic profitability were evaluated. Data were analyzed by analysis of variance followed by Duncan's multiple range test ($P \leq 0.05$). Significant interactions between biochar and biosilica were observed for most evaluated variables. The combination of 2 t ha^{-1} enriched biochar and 1.5% biosilica produced the greatest plant height (168.48 cm), flowers per plant (39), pods per plant (36), pod length (13.90 cm), grain dry matter (51.20%), and green pod yield (11.77 t ha^{-1}). This treatment also achieved the highest benefit-cost ratio (1.01), indicating superior economic performance. The combined application of enriched biochar and biosilica is therefore an effective agronomic strategy to improve broad bean productivity

and profitability under high Andean conditions while promoting sustainable soil management.

Keywords: biochar, biosilica, broad bean, soil fertility, sustainable agriculture, yield.

INTRODUCCIÓN

El cultivo de haba (*Vicia faba* L.) constituye una de las leguminosas alimenticias de mayor importancia económica y social en las zonas altoandinas debido a su elevado valor nutricional, su contribución a la seguridad alimentaria y su capacidad para fijar biológicamente nitrógeno atmosférico, mejorando la fertilidad del suelo dentro de los sistemas agrícolas tradicionales. En el Perú, este cultivo ocupa un lugar destacado entre las leguminosas de grano, siendo cultivado principalmente entre los 2500 y 4000 m s.n.m., donde representa una importante fuente de ingresos para miles de pequeños productores. Durante el año 2023 se sembraron más de 56 mil hectáreas de haba grano seco, mientras que Ayacucho se ubicó entre las principales regiones productoras del país, reflejando la importancia socioeconómica del cultivo para las comunidades rurales altoandinas. A pesar de su importancia, los rendimientos obtenidos en muchas zonas productoras continúan siendo inferiores a su potencial genético debido a la baja fertilidad natural de los suelos, la pérdida progresiva de materia orgánica, la limitada disponibilidad de fósforo y otros nutrientes esenciales, así como la creciente variabilidad climática que afecta la disponibilidad de agua durante las etapas críticas del desarrollo del cultivo (Abd El-Moaty et al. 2024). Estas limitaciones reducen la eficiencia del uso de fertilizantes minerales y comprometen la sostenibilidad de los sistemas de producción agrícola altoandinos. Diversos estudios han señalado que la restauración de la calidad del suelo constituye una de las principales estrategias para incrementar la productividad agrícola frente al cambio climático.

En los últimos años, el biochar ha adquirido especial relevancia como una enmienda orgánica capaz de mejorar simultáneamente las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Tal como mencionan Tadesse et al (2025), este material carbonoso, obtenido mediante pirólisis de residuos vegetales en condiciones de baja disponibilidad de oxígeno,

presenta elevada estabilidad química, gran superficie específica y alta capacidad de intercambio catiónico, características que favorecen la retención de agua, la disponibilidad de nutrientes, el desarrollo microbiano y el secuestro de carbono. Diversas investigaciones realizadas en diferentes condiciones agroecológicas, entre ellas la de Razzaghi et al (2022), han demostrado incrementos significativos en el crecimiento vegetal y el rendimiento de cultivos cuando el biochar es incorporado al suelo, especialmente en ambientes con limitaciones de fertilidad.

Paralelamente, el silicio ha sido reconocido como un elemento benéfico para numerosas especies agrícolas debido a su participación en mecanismos fisiológicos asociados con la tolerancia al estrés biótico y abiótico (Yadav et al (2023). El biosílice obtenida a partir de diatomita constituye una fuente natural de silicio disponible que fortalece las paredes celulares, mejora la eficiencia fotosintética, incrementa la absorción de nutrientes y reduce los efectos ocasionados por sequía, salinidad y enfermedades (Zhou et al, 2024). En leguminosas como el haba, diversos estudios han reportado incrementos en el número de vainas, peso de semillas y rendimiento cuando se aplican fuentes solubles de silicio mediante pulverización foliar.

Aunque existen numerosas investigaciones sobre biochar y silicios evaluados de manera independiente, son escasos los estudios desarrollados bajo condiciones altoandinas que analicen el efecto combinado de ambas tecnologías sobre el crecimiento, los componentes del rendimiento y la rentabilidad económica del cultivo de haba. Esta información resulta especialmente relevante considerando las características edáficas de los suelos de Ayacucho, generalmente ácidos y con baja disponibilidad de nutrientes, donde el empleo conjunto de biochar enriquecido y biosílice podría generar efectos sinérgicos que permitan incrementar la productividad agrícola y mejorar la eficiencia del uso de insumos.

En este contexto, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto de diferentes dosis de biochar enriquecido y biosílice sobre el crecimiento, el rendimiento en vaina verde y la rentabilidad económica del cultivo de haba (*Vicia faba* L.) en condiciones agroecológicas del distrito de Huamanguilla, Ayacucho, con la finalidad de identificar una alternativa tecnológica sostenible para fortalecer la producción de esta importante leguminosa en los sistemas agrícolas altoandinos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La investigación se realizó durante la campaña agrícola 2024–2025 en el anexo de Tayancayocc, distrito de Huamanguilla, provincia de Huanta, región Ayacucho, Perú, ubicado a 3458 m.s.n.m. El área experimental corresponde a un ecosistema agrícola altoandino caracterizado por clima templado frío, con precipitaciones concentradas entre los meses de noviembre y marzo, condiciones representativas de las principales zonas productoras de haba de la región. Antes del establecimiento del experimento se efectuó la caracterización física y química del suelo (Tabla 1) para determinar sus condiciones de fertilidad iniciales y establecer un manejo agronómico uniforme para todos los tratamientos.

Tabla 1.

Resultados del análisis de caracterización del suelo e interpretación

Parámetro	Unidad	Resultado	Interpretación
Arena	%	36	Franco arcilloso
Limo	%	27	
Arcilla	%	37	
Materia orgánica	%	4.11	Alto
pH (1:1)	Unidades de pH	5.15	Fuertemente ácido
C.E.	dS m ⁻¹	0.17	No salino
Carbonatos CaCO ₃	%	0	Muy bajo
Nitrógeno total (Nt)	%	0.21	Alto
Fosforo disponible (P)	ppm	38	Muy alto
Potasio disponible (K)	ppm	85	Medio
C.I.C.	Cmol (+).kg ⁻¹	15.21	Medio
Ca ⁺⁺	Cmol (+).kg ⁻¹	6.21	medio
Mg ⁺⁺	Cmol (+).kg ⁻¹	1.30	medio
K ⁺	Cmol (+).kg ⁻¹	0.24	bajo
Na ⁺	Cmol (+).kg ⁻¹	0.34	bajo
Al ⁺³ + H ⁺	Cmol (+).kg ⁻¹	0.84	Muy alto,
Sat. Bases	%	53	Medio
Ca ⁺² /K ⁺	-	26.33	Desequilibrio
Ca ⁺² /Mg ⁺²	-	4.78	Desequilibrio
Mg ⁺² /K ⁺	-	5.51	Desequilibrio

Material vegetal y factores de estudio

Se utilizó la variedad de haba (*Vicia faba* L.) Quelcao de Anta, ampliamente cultivada en la sierra centro-sur del Perú por su adaptación a condiciones altoandinas y elevada producción de vaina verde.

Los factores evaluados fueron:

Factor A. Biochar enriquecido

$$a1 = 0 \text{ t ha}^{-1}$$

$$a2 = 1 \text{ t ha}^{-1}$$

$$a3 = 2 \text{ t ha}^{-1}$$

El biochar fue obtenido mediante pirólisis de biomasa vegetal y posteriormente enriquecido con estiércol de ovino (relación 1:1) y asperjado con biol cuando se incorporó al suelo. El propósito fue incrementar su capacidad de aporte de nutrientes y estimular la actividad biológica del suelo.

Factor B. Biosílíce

$$b1 = 0 \%$$

$$b2 = 0,5 \%$$

$$b3 = 1,0 \%$$

$$b4 = 1,5 \%$$

El biosílíce usado consistió en tierra de diatomeas formulada para aplicación foliar, empleándose un acidificante para ajustar el pH del agua antes de la preparación de las soluciones de aspersión. Se realizaron tres aplicaciones durante el desarrollo del cultivo (Formación de tallos, elongación de tallos e inicio de floración).

Tratamientos

Los tratamientos que resultan de la combinación de los factores en estudio, se muestran en la tabla 1.

Tabla 1

Codificación y descripción de los tratamientos

Tratamiento	Código	Descripción
T1	a ₀ *b ₀	Sin biochar y sin biosílice
T2	a ₀ *b ₁	Sin biochar, 0.5% biosílice
T3	a ₀ *b ₂	Sin biochar, 1% biosílice
T4	a ₀ *b ₃	Sin biochar, 1.5% biosílice
T5	a ₁ *b ₀	1 t ha ⁻¹ de biochar, sin biosílice
T6	a ₁ *b ₁	1 t ha ⁻¹ de biochar, 0.5% biosílice
T7	a ₁ *b ₂	1 t ha ⁻¹ de biochar, 1% biosílice
T8	a ₁ *b ₃	1 t ha ⁻¹ de biochar, 1.5% biosílice
T9	a ₂ *b ₀	2 t ha ⁻¹ de biochar, sin biosílice
T10	a ₂ *b ₁	2 t ha ⁻¹ de biochar, 0.5% biosílice
T11	a ₂ *b ₂	2 t ha ⁻¹ de biochar, 1% biosílice
T12	a ₂ *b ₃	2t ha ⁻¹ de biochar, 1.5% biosílice

Diseño experimental

El experimento se estableció bajo un Diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA) con arreglo factorial 3 × 4, correspondiente a tres dosis de biochar enriquecido y cuatro concentraciones de biosílice, obteniéndose doce tratamientos experimentales. Cada tratamiento fue repetido tres veces, totalizando 36 unidades experimentales. La distribución de los tratamientos dentro de cada bloque se efectuó mediante aleatorización para minimizar la variabilidad ocasionada por la heterogeneidad del terreno.

El modelo estadístico utilizado fue:

$$Y_{ijk} = \mu + B_i + A_j + C_k + (AC)_{jk} + \varepsilon_{ijk}$$

donde:

- Y_{ijk}: observación de la variable de respuesta;
- μ : media general;
- B_i: efecto del bloque;
- A_j: efecto de la dosis de biochar;

- Ck: efecto de la dosis de biosílice;
- (AC)jk: interacción entre ambos factores;
- ε_{ijk} : error experimental.

Manejo del experimento

El terreno fue preparado mediante aradura, rastra y surcado antes de la siembra. Posteriormente se incorporó el biochar enriquecido en el fondo de los surcos de acuerdo con las dosis establecidas para cada tratamiento.

La semilla fue previamente desinfectada antes de la siembra para reducir la incidencia de patógenos. El cultivo recibió una fertilización basal uniforme para todos los tratamientos calculado considerando el análisis del suelo y extracción del cultivo y corresponde a la dosis: 50-80-70 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ y K₂O, usando como fuentes el Nitrato de Amonio, Superfosfato Triple de Calcio y Cloruro de Potasio. Se incorporó la mitad de la dosis de N y todo el P y K al momento de la siembra y, la otra mitad del N, durante el primer aporque. Se ha complementado la humedad del suelo con riegos periódicos por aspersión realizando, además, deshierbos manuales, raleo, aporques y manejo fitosanitario durante todo el ciclo del cultivo.

El biosílice se aplicó vía foliar mediante mochila de aspersión en tres oportunidades durante el desarrollo vegetativo y reproductivo del cultivo, utilizando un estabilizador de pH para optimizar la disponibilidad del silicio durante la pulverización.

Variables evaluadas

Las variables de respuesta comprendieron indicadores de crecimiento, componentes del rendimiento y rentabilidad económica.

Las variables agronómicas fueron:

- altura de planta (cm);
- número de macollos por planta;
- número de flores por planta;
- número de vainas por planta;
- longitud de vaina (cm);

- diámetro de vaina (cm);
- número de granos por vaina;
- peso de 100 semillas (g);
- porcentaje de materia seca del grano (%);
- rendimiento de vaina verde (t ha^{-1}).

Adicionalmente se realizó el análisis económico mediante el cálculo del ingreso bruto, costo total de producción, utilidad neta y relación beneficio/costo para cada tratamiento experimental.

Análisis estadístico

Los datos experimentales fueron sometidos a pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas antes del análisis estadístico. Posteriormente se realizó el análisis de varianza (ANOVA) para determinar los efectos principales del biochar enriquecido, la biosílice y su interacción sobre cada variable evaluada. Cuando el análisis mostró diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0,05$), las medias fueron comparadas mediante la prueba de rangos múltiples de Duncan al 5 % de probabilidad.

Con el propósito de describir la respuesta biológica del cultivo frente al incremento de las dosis de biosílice en cada nivel de biochar, se ajustaron modelos de regresión lineal, cuadrática o cúbica, seleccionándose el modelo con mejor ajuste estadístico y mayor significado biológico. Finalmente, la rentabilidad económica de los tratamientos se estimó mediante la relación beneficio/costo, utilizando los costos reales de producción registrados durante el desarrollo del experimento.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Longitud de vaina y rendimiento de vaina verde

La longitud de vaina y el rendimiento de vaina verde respondieron significativamente a la aplicación de biochar enriquecido y biosílice. El análisis de varianza (Tabla 2), mostró efectos altamente significativos ($p \leq 0,01$) para los factores biochar (B), biosílice (S) y la interacción $B \times S$ en ambas variables, lo que indica que el efecto de la biosílice dependió de la dosis de biochar aplicada al suelo. Los coeficientes de variación fueron inferiores al

6 %, reflejando una adecuada precisión experimental y una baja variabilidad entre las unidades experimentales, lo que respalda la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Tabla 2

Resumen del análisis de varianza para longitud de vaina y rendimiento de vaina verde.

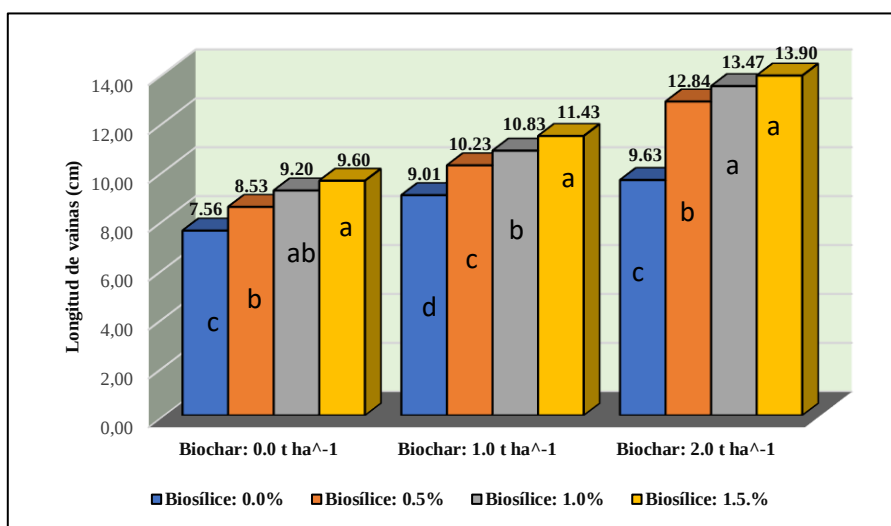
Fuente de variación	Longitud de Vaina (cm)	Rendimiento Kg ha ⁻¹
Biochar (B)	393.706**	896.54**
Biosílíce (S)	136.899**	136.63**
B × S	10.313**	24.01**
CV (%)	3,1	5,12

Longitud de vaina

La longitud de vaina aumentó progresivamente conforme se incrementaron las dosis de biochar enriquecido y biosílíce (Figura 1). El tratamiento a₂b₃ (2 t ha⁻¹ de biochar + 1,5 % de biosílíce) registró la mayor longitud de vaina (13,90 cm), diferenciándose estadísticamente del resto de tratamientos ($p \leq 0,05$). Por el contrario, el tratamiento testigo presentó la menor longitud (7,56 cm), evidenciando que la aplicación conjunta de ambos insumos favoreció el desarrollo de los órganos reproductivos.

Figura 1

Comparación de medias para longitud de vaina según la interacción biochar × biosílíce.



La longitud de vaina constituye un componente del rendimiento estrechamente relacionado con la acumulación de biomasa y el adecuado llenado de los granos. En este estudio, el incremento de esta variable puede atribuirse, tal como mencionan Al-Mishyikh y Jarallah (2024), a una mayor disponibilidad de nutrientes y agua en la rizósfera, promovida por el biochar enriquecido, así como al efecto fisiológico de la biosílice sobre la actividad fotosintética y la resistencia al estrés (Pang et al, 2023).

Tal como mencionan Lehmann y Joseph (2024), el biochar mejora la estructura del suelo, incrementa la porosidad y favorece la retención de agua, creando un ambiente propicio para el crecimiento radicular y la absorción de nutrientes. Paralelamente, el silicio fortalece las paredes celulares, mejora la estabilidad de las membranas y aumenta la eficiencia fotosintética, permitiendo una mayor producción y translocación de fotoasimilados hacia las vainas en desarrollo (Zhou et al, 2024). La acción complementaria de ambos insumos explica el incremento observado en la longitud de vaina.

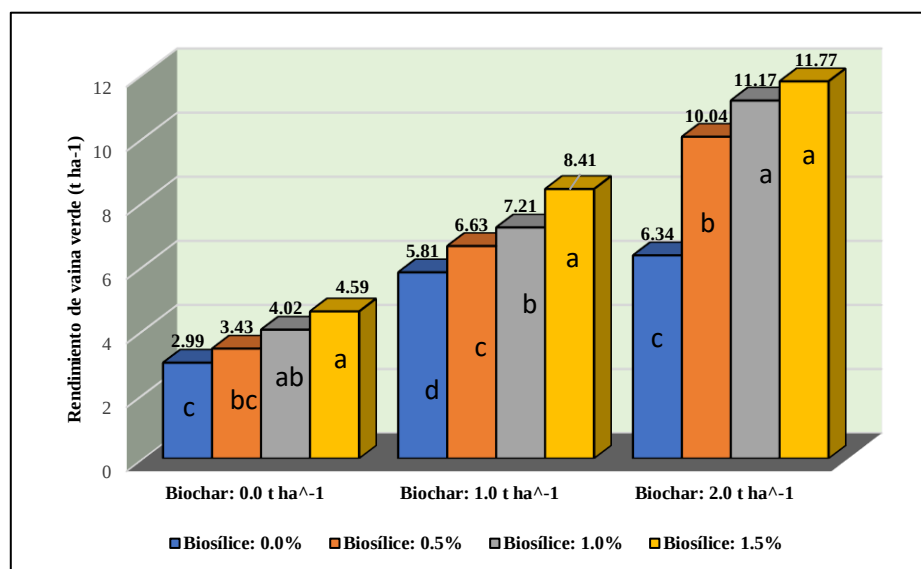
Estos resultados son consistentes con los reportados por Shoman y Bughdady (2020), quienes observaron un incremento significativo en la longitud y peso de las vainas de haba tras aplicaciones foliares de silicio. Asimismo, Tadesse et al. (2025) informaron que la incorporación de biochar mejoró el crecimiento reproductivo y los componentes del rendimiento en *Vicia faba*, debido a un incremento en la disponibilidad de fósforo, nitrógeno y carbono orgánico del suelo.

Rendimiento de vaina verde

El rendimiento de vaina verde fue la variable que presentó la mayor respuesta a la aplicación combinada de biochar enriquecido y biosilice (Figura 2). Se observó un incremento progresivo del rendimiento conforme aumentaron las dosis de ambos insumos, alcanzándose el máximo valor con el tratamiento B₂S₃ (11,77 t ha⁻¹), mientras que el tratamiento testigo produjo únicamente 2,99 t ha⁻¹, lo que representa un incremento del 293,6 % respecto al control.

Figura 2

Comparación de medias del rendimiento de vaina verde.



El incremento del rendimiento fue consistente dentro de cada dosis de biochar, observándose una respuesta positiva a medida que aumentó la concentración de biosilice. Sin embargo, la mayor magnitud de respuesta ocurrió cuando ambos insumos fueron aplicados simultáneamente, lo que evidencia un efecto sinérgico entre la mejora de las propiedades del suelo y el fortalecimiento fisiológico de las plantas.

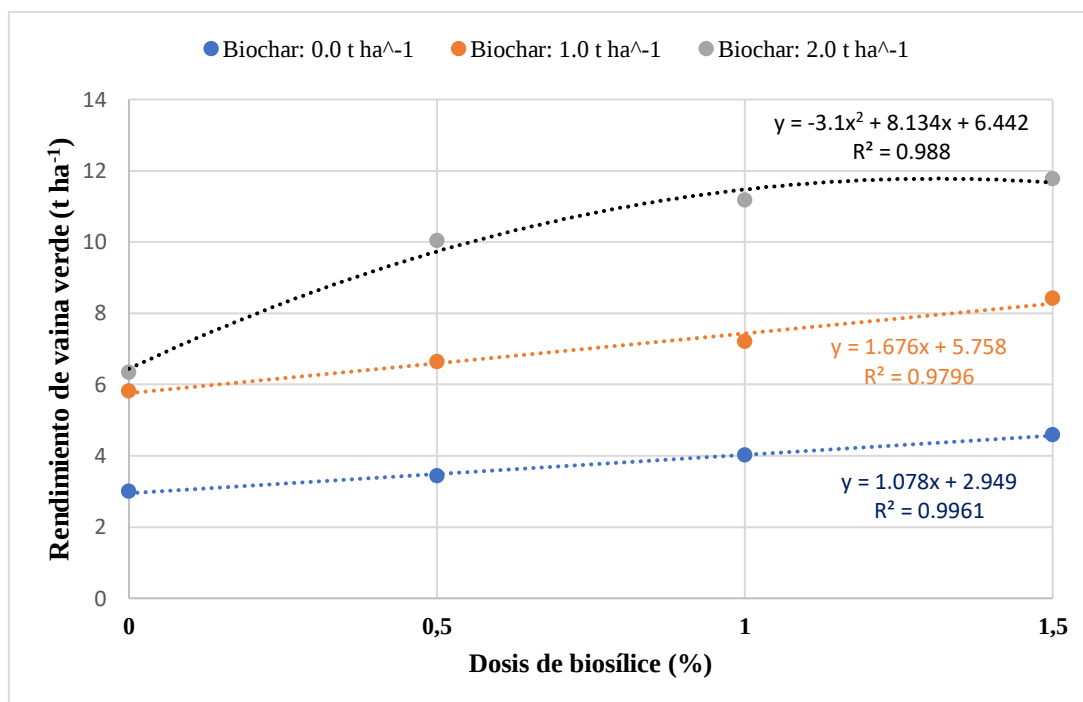
Respuesta del rendimiento a las dosis de biosilice

El análisis de regresión mostró que, en presencia de 2 t ha⁻¹ de biochar enriquecido (Figura 3), la respuesta del rendimiento a las dosis de biosilice se ajustó a un modelo cuadrático con un elevado coeficiente de determinación ($R^2 = 0,988$). El modelo estimó un rendimiento máximo cercano a 11,8 t ha⁻¹ con una dosis aproximada de 1,3 % de biosilice, lo que indica una respuesta positiva que tiende a estabilizarse a concentraciones superiores.

El rendimiento agrícola representa la integración de todos los procesos fisiológicos que ocurren durante el ciclo del cultivo; por ello, la respuesta observada en el presente estudio refleja el efecto acumulativo del biochar enriquecido y la biosilice sobre el crecimiento vegetativo, la formación de flores, el cuajado de vainas y el llenado de los granos.

Figura 3

Modelo de regresión para el rendimiento de vaina verde en función de la concentración de biosílice y biochar.



Como refieren Al-Mishyyikh et al (2024), el biochar enriquecido incorporado al suelo favoreció un ambiente edáfico más adecuado para el desarrollo radical al incrementar la capacidad de intercambio catiónico, mejorar la estabilidad estructural del suelo, aumentar la retención de humedad y estimular la actividad biológica de la rizósfera. Estas modificaciones incrementan la disponibilidad de nitrógeno, fósforo y potasio durante las etapas críticas del desarrollo reproductivo, permitiendo una mayor eficiencia en la absorción de nutrientes y una mayor producción de biomasa. Diversas revisiones sistemáticas recientes concluyen que la incorporación de biochar mejora el reciclaje de nutrientes, incrementa la eficiencia del uso del agua y favorece aumentos consistentes del rendimiento en diferentes sistemas agrícolas, especialmente en suelos con limitaciones de fertilidad (Hafez et al, 2021).

Por otra parte, la biosílice ejerció un efecto complementario al mejorar la eficiencia fisiológica de las plantas. El silicio fortalece la pared celular mediante la deposición de sílice amorfa, incrementa la estabilidad de las membranas, optimiza la apertura estomática y mejora la eficiencia fotosintética (Yadav et al, 2023). Asimismo, contribuye

a reducir el estrés oxidativo y favorece una utilización más eficiente del agua y de los nutrientes, permitiendo una mayor acumulación de biomasa y un mejor llenado de las vainas. Estos mecanismos explican el incremento sostenido del rendimiento conforme aumentó la concentración de biosílice (Zhou et al, 2024).

Los resultados obtenidos coinciden con los reportados por Shoman y Bughdady (2020), quienes encontraron incrementos significativos en el rendimiento de haba mediante aplicaciones foliares de silicio, atribuidos a una mayor actividad fotosintética y un mejor desarrollo reproductivo. De igual manera, Tadesse et al. (2025) demostraron que el biochar incrementó el rendimiento de *Vicia faba* al mejorar la fertilidad del suelo y la disponibilidad de nutrientes. Estudios desarrollados en otros cultivos también han documentado incrementos en productividad asociados con la aplicación conjunta de biochar y fuentes de silicio, lo que respalda la existencia de efectos complementarios entre ambas tecnologías.

La interacción significativa observada entre biochar y biosílice constituye uno de los principales aportes de esta investigación. Mientras el biochar actúa predominantemente sobre el sistema suelo, la biosílice optimiza el funcionamiento fisiológico de la planta. Esta complementariedad permitió obtener el mayor rendimiento con la combinación de 2 t ha⁻¹ de biochar enriquecido y 1,5 % de biosílice, tratamiento que superó ampliamente al testigo y demostró que la integración de ambas tecnologías representa una estrategia agronómica eficiente para incrementar la productividad del cultivo de haba bajo condiciones altoandinas.

Desde una perspectiva agronómica, estos resultados adquieren especial relevancia para los sistemas de producción de la sierra peruana, donde la degradación de los suelos, la disminución de la materia orgánica y la creciente variabilidad climática limitan la productividad de los cultivos. La aplicación conjunta de biochar enriquecido y biosílice no solo incrementa el rendimiento, sino que también contribuye al manejo sostenible del suelo, favoreciendo la resiliencia de los sistemas agrícolas frente a escenarios de cambio climático.

Análisis económico de los tratamientos

El análisis económico (tabla 3), mostró que la aplicación de biochar enriquecido y biosílice incrementó progresivamente los ingresos brutos, la utilidad neta y la relación beneficio/costo (B/C). Aunque la incorporación de ambos insumos aumentó los costos de producción, el incremento del rendimiento compensó ampliamente dicha inversión, generando mayores beneficios económicos respecto al tratamiento testigo.

La mayor rentabilidad se obtuvo con la combinación de 2 t ha⁻¹ de biochar enriquecido y 1,5 % de biosílice (a₂b₃), alcanzando una relación beneficio/costo de 1,01, valor significativamente superior al resto de tratamientos (Tabla 3). En contraste, el tratamiento sin aplicación de biochar ni biosílice presentó una relación B/C negativa, indicando pérdidas económicas debido al bajo rendimiento obtenido.

Tabla 3

Resumen del análisis de varianza para la relación beneficio/costo.

Tratamiento	Descripción	Rentabilidad (%)	Relación B/C
T1	Sin biochar y sin biosílice	- 36.54	- 0.30
T2	Sin biochar, 0.5% biosílice	- 28.74	- 0.24
T3	Sin biochar, 1% biosílice	- 18.15	- 0.15
T4	Sin biochar, 1.5% biosílice	- 8.48	- 0.07
T5	1 t ha ⁻¹ de biochar, sin biosílice	19.34	0.16
T6	1 t ha ⁻¹ de biochar, 0.5% biosílice	33.28	0.28
T7	1 t ha ⁻¹ de biochar, 1% biosílice	42.23	0.35
T8	1 t ha ⁻¹ de biochar, 1.5% biosílice	62.64	0.52
T9	2 t ha ⁻¹ de biochar, sin biosílice	26.02	0.22
T10	2 t ha ⁻¹ de biochar, 0.5% biosílice	95.69	0.80
T11	2 t ha ⁻¹ de biochar, 1% biosílice	113.50	0.95
T12	2 t ha ⁻¹ de biochar, 1.5% biosílice	120.79	1.01

La rentabilidad económica constituye uno de los principales indicadores para evaluar la factibilidad de adoptar nuevas tecnologías agrícolas. En el presente estudio, la aplicación conjunta de biochar enriquecido y biosílice permitió incrementar significativamente la

relación beneficio/costo, demostrando que el aumento en los costos de producción fue ampliamente compensado por el incremento del rendimiento de vaina verde.

La mayor rentabilidad obtenida con el tratamiento a_2b_3 estuvo directamente relacionada con el incremento de los componentes del rendimiento, particularmente el número de vainas por planta, la longitud de vaina y el rendimiento comercial. Estos resultados evidencian que la eficiencia económica depende más del aumento de la productividad que del costo adicional generado por la aplicación de los insumos.

Desde el punto de vista agronómico, el biochar representa una inversión con beneficios que pueden extenderse durante varios ciclos agrícolas debido a su elevada estabilidad y persistencia en el suelo. Diversos estudios, entre ellos el de Cartagena (2025), han demostrado que sus efectos sobre la capacidad de intercambio catiónico, la retención de humedad y la actividad microbiana permanecen durante varios años, lo que permite reducir progresivamente los costos de fertilización y mejorar la sostenibilidad de los sistemas productivos. En consecuencia, la rentabilidad observada en la presente campaña podría incrementarse aún más cuando se evalúe el efecto residual del biochar en campañas sucesivas.

Por otra parte, la biosílice constituye una tecnología de bajo costo relativo y alta eficiencia fisiológica. Su aplicación favorece la tolerancia al estrés hídrico, mejora la eficiencia en el uso del agua y reduce la incidencia de enfermedades, factores que contribuyen indirectamente a disminuir pérdidas de rendimiento y mejorar la estabilidad económica de los sistemas agrícolas (Pang et al, 2023). Estos beneficios adquieren especial importancia en las condiciones agroecológicas de la sierra peruana, donde la variabilidad climática representa una de las principales limitantes para la producción de cultivos.

Los resultados obtenidos coinciden con investigaciones recientes que destacan la viabilidad económica del uso de biochar y silicio en sistemas agrícolas. Diversos autores han señalado que el incremento inicial de los costos de producción es compensado por mejoras sustanciales en el rendimiento y en la eficiencia del uso de los recursos, generando relaciones beneficio/costos superiores a las obtenidas mediante el manejo convencional. Asimismo, se ha reportado que el efecto residual del biochar incrementa la

rentabilidad a mediano plazo, reduciendo la necesidad de aplicaciones frecuentes de fertilizantes minerales.

En conjunto, los resultados demuestran que la combinación de 2 t ha⁻¹ de biochar enriquecido y 1,5 % de biosílice no solo constituye la alternativa más eficiente desde el punto de vista agronómico, sino también la opción económicamente más rentable para la producción de haba en las condiciones edafoclimáticas de Huamanguilla, Ayacucho. La adopción de esta tecnología puede contribuir a mejorar la competitividad de los productores altoandinos mediante el incremento de la productividad, la sostenibilidad del suelo y los ingresos económicos.

CONCLUSIONES

1. El biochar enriquecido y la biosílice ejercieron efectos altamente significativos ($p \leq 0,01$) sobre la altura de planta, número de flores, número de vainas, longitud de vaina, porcentaje de materia seca, rendimiento de vaina verde y relación beneficio/costo. La interacción entre ambos factores evidenció una respuesta sinérgica, obteniéndose los mejores resultados con la aplicación conjunta de 2 t ha⁻¹ de biochar enriquecido y 1,5 % de biosílice.
2. La combinación de 2 t ha⁻¹ de biochar enriquecido y 1,5 % de biosílice produjo el mayor rendimiento de vaina verde (11,77 t ha⁻¹), superando en aproximadamente 293,6 % al tratamiento testigo (2,99 t ha⁻¹). Asimismo, este tratamiento alcanzó los mayores valores de altura de planta (168,48 cm), número de flores (39 flores planta⁻¹), número de vainas (36 vainas planta⁻¹) y longitud de vaina (13,90 cm), evidenciando una mejora integral del desempeño agronómico del cultivo.
3. Desde el punto de vista económico, el tratamiento con 2 t ha⁻¹ de biochar enriquecido y 1,5 % de biosílice presentó la mayor rentabilidad, alcanzando una relación beneficio/costo de 1,01, lo que demuestra que el incremento en los costos de aplicación fue compensado por el aumento del rendimiento, constituyéndose en la alternativa más rentable y técnicamente viable para la producción de haba en las condiciones evaluadas.

RECOMENDACIONES

1. Validar la tecnología en diferentes condiciones agroecológicas. Se recomienda evaluar la aplicación de 2 t ha⁻¹ de biochar enriquecido y 1,5 % de biosílice en otras zonas productoras de haba de la sierra peruana, considerando diferentes tipos de suelo, condiciones climáticas y campañas agrícolas, con el fin de confirmar la estabilidad agronómica y económica de esta tecnología.
2. Evaluar el efecto residual del biochar enriquecido. Se recomienda desarrollar investigaciones de mediano y largo plazo que determinen la persistencia del efecto del biochar sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, así como su influencia en la productividad y rentabilidad de cultivos establecidos en rotación, con el propósito de cuantificar los beneficios acumulativos de esta práctica de manejo sostenible.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abd El-Moaty, H. I., Abdelkader, M. A., & El-Sanatawy, A. M.. (2024). Nano-biochar enhances growth, physiology and yield of faba bean (*Vicia faba* L.) under water deficit conditions. *Frontiers in Plant Science*, 15, Article 1438893. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1438893>

Al-Mishyyikh, A. T., & Jarallah, A. M.. (2024). Effect of biochar application on growth and yield of broad bean (*Vicia faba* L.) under arid conditions. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 24(2), 1520–1534.

Cartagena Gamboa, M. A.. (2025). Aplicación foliar de biosílice en el crecimiento y rendimiento de cebolla (*Allium cepa* L.). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 19(1), 44–56.

Hafez, E. M., Omara, A. E., Alhumaydhi, F. A., & El-Esawi, M. A.. (2021). Minimizing hazard impacts of soil salinity and water stress on broad bean using silicon and plant growth-promoting rhizobacteria. *Plants*, 10(8), 1491. <https://doi.org/10.3390/plants10081491>

Lehmann, J., & Joseph, S.. (2024). *Biochar for environmental management: Science, technology and implementation* (3rd ed.). Routledge.

Liu, X., Zhang, Y., & Chen, H.. (2024). Biochar improves nitrogen fixation, soil fertility and productivity of faba bean under deficit irrigation. *Science of the Total Environment*, 927, 172364.

Pang, Z., Zhao, L., & Wang, X.. (2023). Silicon-mediated improvement of plant resistance to abiotic stress: Physiological and molecular mechanisms. *Science of the Total Environment*, 891, 164642.

Razzaghi, F., Poormansour, S., & Jacobsen, S. E.. (2022). Biochar effects on growth, water use efficiency and productivity of legume crops: A review. *Agronomy*, 12(9), 2148.

Tadesse, A., Bekele, T., & Mengistu, D.. (2025). Biochar improves soil fertility, growth and yield of faba bean (*Vicia faba* L.) under acidic highland soils. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 25(1), 612–628.

Yadav, M., Kumar, V., & Singh, S. (2023). Silicon-mediated mitigation of abiotic stress in legumes: Physiological and molecular mechanisms. *Plant Physiology Reports*, 28(3), 415–431. Et al, 2024)

Zhang, H., Li, Y., & Wang, J.. (2024). Modified biochar for sustainable agriculture: A review of soil improvement and crop productivity. *Biochar*, 6, 45.

Zhou, J., Li, X., & Chen, Y.. (2024). Silicon enhances photosynthesis, antioxidant defense and crop productivity under environmental stress. *Scientific Reports*, 14, 52503.