

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROFORESTAL



TESIS:

**Niveles de guano de isla, en el rendimiento de cultivares de frijol
(*Phaseolus vulgaris* L. y *Vigna unguiculata* L.), bajo el sistema
silvoagrícola, Ayna 590 msnm. Ayacucho, 2025**

Para optar el título profesional de:
INGENIERA AGROFORESTAL

PRESENTADO POR:
Bach. Wendy Elizabeth LEDESMA RAMOS

ASESOR:
Mtro. Rodolfo ALCA MENDOZA

AYACUCHO - PERÚ

2026

DEDICATORIA

A Dios, por la luz, la fuerza y la paz en cada paso de este camino. Esta tesis es un acto de gratitud, porque sin Él nada de esto habría sido posible.

A mi madre, María Ramos, y a mi padre, Julio Ledesma: a ella por su amor incondicional, a él por su temple callado y su ejemplo de trabajo y dignidad. En cada página de esta tesis vive el eco de sus consejos sencillos pero profundos. Gracias por ser mis primeros maestros en la escuela de la vida.

A mis hermanas, compañeras de vida, de lealtad inquebrantable y de enseñanzas profundas. Su inteligencia, sensibilidad y coraje me han mostrado que la fuerza de las mujeres unidas trasciende cualquier barrera.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, por su tradición académica centenaria; a la Facultad de Ciencias Agrarias y a la Escuela Profesional de Ingeniería Agroforestal, por brindarme una formación rigurosa y el espacio institucional para mi desarrollo profesional. Esta tesis es también fruto del compromiso y la excelencia que esta casa de estudios me ha inculcado.

A los docentes de mi querida Escuela de Ingeniería Agroforestal: profesionales de vocación profunda y saber generoso. Gracias por compartir sus enseñanzas, orientaciones y experiencias con tanto corazón. Cada uno de ustedes trazó, con dedicación silenciosa, el camino que me permitió llegar hasta aquí.

Al Mtro. Rodolfo Alca Mendoza, gracias por su asesoría tan rigurosa como generosa. Sus aportes y su apoyo constante no solo guiaron esta investigación, sino que fueron el sostén firme que permitió que este trabajo llegara a su mejor versión.

A mis mejores amigos y compañeros de la Escuela de Ingeniería Agroforestal: gracias por caminar siempre a mi lado. Compartimos aulas, desvelos, alegrías y tantas experiencias que hoy son recuerdos imborrables. Su amistad y apoyo hicieron de este recorrido académico un camino mucho más fértil y humano.

A todos los que, de una u otra manera, formaron parte de este camino: gracias. Su presencia, apoyo y generosidad hicieron posible este logro.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
ÍNDICE GENERAL	iv
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE ANEXOS	x
RESUMEN	xi
ABSTRACT.....	xii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	3
MARCO TEÓRICO	3
1.1. Antecedentes	3
1.1.1. <i>A nivel internacional</i>	3
1.1.2. <i>A nivel nacional</i>	5
1.1.3. <i>A nivel local</i>	8
1.2. Bases teóricas	10
1.2.1. <i>El frijol</i>	10
1.2.2. <i>Taxonomía del frijol</i>	11
1.2.3. <i>Importancia del frijol</i>	11
1.2.4. <i>El frijol común en la fijación biológica del nitrógeno</i>	14
1.2.5. <i>La bacteria Rhizobium</i>	15
1.2.6. <i>La fijación biológica del nitrógeno</i>	16
1.2.7. <i>Propiedades nutritivas y usos del frijol</i>	17
1.2.8. <i>Situación actual del frijol</i>	19
1.2.9. <i>Filogenia y distribución</i>	20
1.2.10. <i>Clasificación taxonómica</i>	21
1.2.11. <i>Características morfológicas</i>	21
1.2.12. <i>Hábitos de crecimiento</i>	22
1.2.13. <i>Variedades</i>	24
1.2.14. <i>Fisiología del frijol</i>	26
1.2.15. <i>Etapas del desarrollo de la planta</i>	27
1.2.16. <i>Factores ambientales que inciden en la producción</i>	28

1.2.17. Sanidad del cultivo	33
1.2.18. Frijol canario	37
1.2.19. Frijol castilla – Frijol caupí (<i>Vigna unguiculata</i> L. Walp.).....	39
1.2.20. Fertilización	41
1.2.21. Guano de las islas	48
1.2.22. Agroforestería.....	52
1.2.23. Clasificación agroforestal	53
1.2.24. Criterios de clasificación agroforestal.....	54
1.2.25. Caracterización de tecnologías agroforestales.....	56
CAPÍTULO II.....	58
METODOLOGÍA.....	58
2.1. Ubicación del experimento.....	58
2.1.1. Ubicación ecológica.....	58
2.2. Antecedentes del terreno experimental	59
2.3. Características edáficas del terreno experimental	60
2.4. Características climatológicas del lugar experimental	60
2.5. Factores en estudio	62
2.6. Tratamientos de estudio.....	62
2.7. Diseño experimental.....	63
2.8. Análisis estadístico	63
2.9. Características del campo experimental	64
2.10. Croquis experimental de los tratamientos	64
2.11. Variables de evaluación.....	66
2.11.1. Variables de precocidad.....	66
2.11.2. Variables de rendimiento	66
2.12. Instalación y conducción del experimento	67
CAPÍTULO III.....	70
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	70
3.1. Variables de precocidad	70
3.1.1. Días a la emergencia.....	70
3.1.2. Días a la floración.....	71
3.1.3. Días a la formación de vainas.....	72
3.1.4. Días a la madurez.....	73
3.2. Variables de rendimiento.....	74

3.2.1. <i>Altura de planta</i>	74
3.2.2. <i>Número de vainas por planta</i>	76
3.2.3. <i>Longitud de vainas</i>	78
3.2.4. <i>Número de semillas por vaina</i>	80
3.2.5. <i>Peso de 1000 semillas</i>	82
3.2.6. <i>Rendimiento en kg ha⁻¹</i>	84
CONCLUSIONES	87
RECOMENDACIONES	88
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
ANEXOS	101

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 <i>Análisis físico-químico de la muestra de suelo del predio de la localidad de Rosario-Ayna</i>	60
Tabla 2 <i>Datos climáticos de temperatura, máxima, mínima, media, precipitación y balance hídrico, campaña 2024. Estación meteorológica San Francisco – Ayacucho</i>	61
Tabla 3 <i>Tratamientos y combinaciones de los factores a estudiar</i>	63
Tabla 4 <i>Emergencia (dds). Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm.</i>	70
Tabla 5 <i>Floración (dds). Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm.</i>	71
Tabla 6 <i>Formación de vainas (dds). Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm</i>	72
Tabla 7 <i>Madurez (dds). Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm.</i>	73
Tabla 8 <i>Análisis de varianza de la altura de planta (m). Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm</i>	74
Tabla 9 <i>Prueba de Tukey – efectos simples para altura de planta (m). Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm</i>	75
Tabla 10 <i>Análisis de varianza del número de vainas por planta. Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm.</i>	76
Tabla 11 <i>Prueba de Tukey – efectos simples para número de vainas por planta. Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm</i>	77
Tabla 12 <i>Análisis de varianza de la longitud de vainas (cm). Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm.</i>	78
Tabla 13 <i>Prueba de Tukey – efectos simples para longitud de vainas (cm). Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm.</i>	79
Tabla 14 <i>Análisis de varianza del número de semillas por vaina. Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm.</i>	80
Tabla 15 <i>Prueba de Tukey – efectos simples para número de semillas por vaina. Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm.</i>	81
Tabla 16 <i>Análisis de varianza del peso de 1000 semillas (g). Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm.</i>	82

Tabla 17 <i>Prueba de Tukey – efectos simples para peso de 1000 semillas (g). Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm.</i>	83
Tabla 18 <i>Análisis de varianza del rendimiento en kg ha⁻¹. Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm.</i>	84

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 <i>Ubicación política del trabajo de investigación – EPIAF-PICHARI.....</i>	59
Figura 2 <i>Diagrama Ombrotérmico de la temperatura vs precipitación correspondiente a la campaña agrícola 2024, registrado en la Estación Meteorológica San Francisco-Ayacucho.....</i>	61
Figura 3 <i>El croquis del campo experimental.....</i>	65
Figura 4 <i>Croquis de la Unidad Experimental</i>	65
Figura 5 <i>Prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$) – Altura de planta (m). Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm.</i>	75
Figura 6 <i>Prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$) – Número de vainas por planta. Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm.....</i>	77
Figura 7 <i>Prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$) – Longitud de vainas (cm). Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm.....</i>	79
Figura 8 <i>Prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$) – Número de semillas por vaina. Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm.....</i>	81
Figura 9 <i>Prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$) – Peso de 1000 semillas (g). Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm.....</i>	83
Figura 10 <i>Prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$) – Rendimiento en kg ha⁻¹. Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm.....</i>	85

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. <i>Panel fotográfico</i>	102
Anexo 2. <i>Análisis de suelo de la parcela experimental en los laboratorios LABSAF</i> <i>PERLA DEL VRAEM-INIA.</i>	108
Anexo 3. <i>Costo de producción de una hectárea</i>	112
Anexo 4. <i>Cuadro de registro y evaluaciones en campo</i>	117

RESUMEN

La investigación se realizó en la localidad de Rosario, distrito de Ayna, La Mar, Ayacucho, a 590 msnm., campaña setiembre-diciembre de 2025. El objetivo fue evaluar cinco niveles de guano de isla (0; 1,0; 1,5; 2,0 y 2,5 t ha⁻¹) sobre variables de precocidad y rendimiento de dos cultivares: frijol Castilla (*Vigna unguiculata* L., c1) y frijol Canario (*Phaseolus vulgaris* L., c2), bajo sistema silvoagrícola con *Pinus radiata* D. Don. Se empleó un Diseño de Bloques Completos Randomizados (DBCR) con arreglo factorial 2C × 5D, tres repeticiones y 30 unidades experimentales. Las variables de rendimiento - altura de planta, número de vainas por planta, longitud de vainas, número de semillas por vaina, peso de 1000 semillas y rendimiento en kg ha⁻¹. Las dosis de guano de isla influyeron significativamente en el rendimiento de ambos cultivares. Para c1, la dosis óptima fue 1,0 t ha⁻¹ (c1d1 = 2 144,42 kg ha⁻¹); para c2, fue 2,0 t ha⁻¹ (c2d3 = 1 384,44 kg ha⁻¹). La interacción cultivar × dosis resultó altamente significativa en rendimiento (F = 139,71; p < 0,0001), vainas por planta (p = 0,0300), longitud de vainas (p = 0,0008), semillas por vaina (p = 0,0191) y peso de 1000 semillas (p < 0,0001). El cultivar frijol Castilla superó estadísticamente al frijol Canario en todos los componentes productivos. Se concluye que *V. unguiculata* con 1,0 t ha⁻¹ de guano de isla constituye la combinación de mayor potencial productivo bajo el sistema silvoagrícola evaluado en la selva alta de Ayacucho.

Palabras clave: *Vigna unguiculata*, *Phaseolus vulgaris*, guano de isla, sistema silvoagrícola, rendimiento, selva alta.

ABSTRACT

The study was conducted in the town of Rosario, Ayna district, La Mar, Ayacucho, at an elevation of 590 meters above sea level, during the September–December 2025 growing season. The objective was to evaluate five levels of island guano (0; 1.0; 1.5; 2.0; and 2.5 t ha⁻¹) on the variables of early maturity and yield of two cultivars: Castilla bean (*Vigna unguiculata* L., c1) and Canario bean (*Phaseolus vulgaris* L., c2), under a agroforestry system with *Pinus radiata* D. Don. A Randomized Complete Block Design (RCBD) was used with a 2C × 5D factorial arrangement, three replications, and 30 experimental units. The yield variables were plant height, number of pods per plant, pod length, number of seeds per pod, weight of 1,000 seeds, and yield in kg ha⁻¹. The doses of island guano significantly influenced the yield of both cultivars. For c1, the optimal rate was 1.0 t ha⁻¹ (c1d1 = 2,144.42 kg ha⁻¹); for c2, it was 2.0 t ha⁻¹ (c2d3 = 1,384.44 kg ha⁻¹). The cultivar × rate interaction was highly significant for yield ($F = 139.71$; $p < 0.0001$), pods per plant ($p = 0.0300$), pod length ($p = 0.0008$), seeds per pod ($p = 0.0191$), and 1,000-seed weight ($p < 0.0001$). The Castilla bean cultivar statistically outperformed the Canario bean in all yield components. It is concluded that *V. unguiculata* with 1.0 t ha⁻¹ of island guano constitutes the combination with the highest yield potential under the agroforestry system evaluated in the high jungle of Ayacucho.

Keywords: *Vigna unguiculata*, *Phaseolus vulgaris*, island guano, agroforestry system, yield, highland rainforest.

INTRODUCCIÓN

La productividad de las leguminosas en sistemas de producción sostenibles depende críticamente de la interacción entre el manejo nutricional y la base genética de los cultivares seleccionados. El frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) presenta una estructura genética compleja dividida en dos acervos principales, el Andino y el Mesoamericano, lo cual es determinante para su adaptación, ya que la domesticación ha generado variaciones significativas en la respuesta de la planta ante la disponibilidad de nutrientes en el suelo (Gioia et al., 2019, p. 2). En la selva alta de Ayacucho, la elección entre diferentes cultivares debe considerar esta herencia, pues la eficiencia en el uso de fertilizantes orgánicos como el guano de isla está estrechamente ligada a la plasticidad fenotípica de cada especie.

Asimismo, la preservación y el estudio de estas especies en áreas rurales marginales, como el distrito de Ayna, cobra una relevancia vital para la seguridad alimentaria regional. Los sistemas silvoagrícolas no solo actúan como refugios de biodiversidad, sino que optimizan el microclima para el desarrollo de cultivos de cobertura (Fiore et al., 2020, p. 2). La implementación de niveles controlados de guano de isla en estos sistemas permite aprovechar la sinergia entre el componente arbóreo y el agrícola, mejorando la estructura del suelo y proporcionando una fuente de nitrógeno de liberación gradual que beneficia tanto a *Phaseolus vulgaris* L. como a *Vigna unguiculata* L.

En el Perú, la producción nacional de frijoles supera las 87 mil toneladas anuales cultivadas por más de 80 mil familias de la agricultura familiar. Las regiones líderes en cosecha son Cajamarca, Huancavelica, Apurímac, Amazonas y Arequipa, destacando también la oferta exportable de más de 20 variedades como el panamito y el canario; a nivel de nuestra región Ayacucho, el frijol como grano seco se mantiene como un cultivo complementario y de rotación en los valles andinos locales, mostrando estabilidad pero

supeditado al factor climatológico, sin embargo, la superficie sembrada se estimó como una meta regional de 1,100 a 1,300 hectáreas destinadas a leguminosas de grano seco, incluyendo el frijol y como rendimiento oscila entre 0.9 y 1.2 toneladas por hectárea bajo sistemas tradicionales de secano y riego menor.

Por último, la caracterización del rendimiento bajo estas condiciones específicas de altitud (590 msnm.) responde a la necesidad de generar recomendaciones técnicas basadas en evidencia científica. Estudios recientes subrayan que el éxito de los programas agrícolas depende de la correcta identificación del germoplasma y su comportamiento bajo estrés o fertilización diferenciada (Catarcione et al., 2023, p. 2). En este contexto, la investigación se fundamenta en la necesidad de determinar el nivel óptimo de abono orgánico que maximice la producción de grano en la zona. Bajo estas consideraciones, se plantean los siguientes objetivos de investigación:

Objetivo general

Determinar los niveles de guano de isla en el rendimiento de cultivares de frijol (*Phaseolus vulgaris* L. y *Vigna unguiculata* L.), bajo sistema de producción silvoagrícola, Ayna 590 msnm. Ayacucho, 2025.

Objetivos específicos

1. Determinar los niveles de guano de isla en el rendimiento de cultivares de frijol (*Phaseolus vulgaris* L. y *Vigna unguiculata* L.), bajo sistema de producción silvoagrícola, Ayna 590 msnm. Ayacucho, 2025.
2. Determinar el rendimiento de cultivares de frijol (*Phaseolus vulgaris* L. y *Vigna unguiculata* L.), bajo el sistema de producción silvoagrícola, Ayna 590 msnm. Ayacucho, 2025.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes

1.1.1. A nivel internacional

Duran Mera et al. (2025) en su investigación titulado "Rendimiento del cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en respuesta de la aplicación de niveles de nitrógeno", analizaron la importancia de este cultivo como fuente proteica esencial (20-30%) y su dependencia de una nutrición mineral equilibrada. La investigación, realizada en el cantón Salitre, Ecuador, entre octubre de 2024 y enero de 2025, se enfocó en identificar la dosis de nitrógeno (N) que optimizara tanto el desarrollo morfológico como la productividad de la variedad "pata de paloma". Bajo un enfoque metodológico riguroso, se empleó un Diseño de Bloques Completamente al Azar (DBCA) con cuatro repeticiones, evaluando un tratamiento testigo y tres niveles crecientes de fertilización: 60, 100 y 140 kg ha⁻¹. Las variables de respuesta agronómica y los componentes de rendimiento fueron sometidos a un análisis de varianza y a la prueba de comparación de medias de Tukey ($P \leq 0,05$). Los resultados revelaron que la aplicación de una dosis baja de nitrógeno (60 kg ha⁻¹) fue la más eficiente, alcanzando un rendimiento promedio de 2 907,98 kg ha⁻¹. Los autores concluyen que este nivel representa el punto de equilibrio óptimo, logrando mejorar las características del cultivo sin incurrir en excesos de fertilización, lo que sugiere que una gestión moderada del nitrógeno es suficiente para maximizar el potencial productivo en las condiciones edafoclimáticas de la provincia del Guayas. (p. 1)

Suvadra et al. (2025) en su investigación titulado "Análisis de la interacción G×E y la estabilidad para la eficiencia del uso del fósforo en el caupí forrajero (*Vigna unguiculata* L. Walp) utilizando medidas de estabilidad basadas en AMMI", examinaron la respuesta de 45 genotipos de caupí bajo ocho regímenes de fertilización fosforada durante dos temporadas consecutivas. El análisis de varianza combinado (ANOVA) y el

modelo de Interacción Multiplicativa de Efectos Principales y de Interacción Aditiva (AMMI) determinaron una variación significativa en la interacción genotipo-ambiente (G x E), la cual explicó el 57.35% de la variabilidad total. Mediante el uso de doce métricas de estabilidad y herramientas como la correlación de Spearman, se estableció que el Índice de Selección de Genotipos (GSI) fue el método más preciso para la clasificación. Como resultado, se identificaron los genotipos FD-1161, UPC-801, UPC-2001, EC-107120, UPC-2002, MFC-09-1 y UPC-618 como los más estables y eficientes en el aprovechamiento de fósforo, posicionándolos como materiales genéticos clave para programas de mejora en suelos con limitaciones nutricionales.

Barman et al. (2025), en su investigación titulado “La agrosilvicultura a largo plazo mejora las reservas de carbono orgánico del suelo y el secuestro de carbono en las capas profundas del suelo en el Himalaya indio”, investigaron durante 15 años (2009-2023) el potencial de los sistemas agroforestales para el almacenamiento de carbono orgánico del suelo (COS). La investigación evaluó sistemas basados en morera (*Morus alba* L.) y bhimal (*Grewia optiva* L.), integrando cultivos de sotobosque como el caupí (*Vigna unguiculata* L.), la toria y la cúrcuma, analizando profundidades de hasta 60 cm. Los resultados destacaron que el tratamiento compuesto por morera en asociación con el sistema caupí-toria presentó los niveles más altos de almacenamiento de carbono, alcanzando 21.35 Mg C ha⁻¹ en la superficie y un notable valor de 33.52 Mg C ha⁻¹ en las capas profundas (30-60 cm), superando significativamente a las prácticas agrícolas convencionales. Además, esta asociación aumentó la concentración de carbono lábil y recalcitrante, logrando un Índice de Gestión de Carbono (CMI) un 33% mayor que el monocultivo. El estudio concluye que la integración del caupí en sistemas agroforestales basados en *M. alba* L. no solo optimiza el secuestro de carbono en horizontes profundos, sino que constituye una estrategia clave para la restauración de tierras degradadas, la seguridad alimentaria y la sostenibilidad ambiental en regiones montañosas.

Freitas et al. (2023) desarrollaron una investigación titulada "Crecimiento, nodulación, producción y fisiología de plantas leguminosas en sistemas de producción integrados", con el fin de analizar la viabilidad del cultivo intercalado de caupí (*Vigna unguiculata*) y frijol guandú (*Cajanus cajan*) asociados con eucalipto y pasto buffel. El estudio se estructuró bajo un diseño factorial de 2 x 4, evaluando diversos sistemas integrados (cultivo-bosque y cultivo-ganadería-bosque) a diferentes distancias (2, 4, 6 y

8 m) de las hileras de eucalipto. Los resultados determinaron que, si bien la nodulación del caupí fue estable frente a los sistemas y distancias, su crecimiento, actividad fotosintética y producción de biomasa se incrementaron proporcionalmente al alejarse de los árboles. No obstante, se observó que la calidad del grano de caupí, medida por el peso de 100 semillas, mejoró significativamente en las zonas de mayor proximidad al eucalipto (2 y 4 m). Finalmente, la investigación concluyó que la inclusión de pasto buffel no perjudicó el rendimiento de las leguminosas, permitiendo una mayor diversificación y un aumento en la biomasa total del sistema. (p. 1)

Wibowo et al. (2022) en su investigación titulada "Estudio de la dosificación de fertilizantes de guano y urea en el crecimiento y rendimiento del caupí (*Vigna unguiculata* L.)", analizaron la respuesta de este cultivo ante diferentes regímenes de fertilización orgánica e inorgánica. El experimento se localizó en Karanganyar, Indonesia, durante el periodo de diciembre de 2021 a febrero de 2022. Metodología aplicada; Diseño Experimental, Se empleó un Diseño Completamente Aleatorizado (DCA) con un esquema factorial de dos factores y tres repeticiones. Factores de estudio: Factor 1 (Guano): Cuatro niveles evaluados (0 g; 4,7 g; 9,4 g y 14,1 g por planta). Factor 2 (Urea): Cuatro niveles evaluados (0 g; 2,7 g; 5,4 g y 8,1 g por planta). Análisis Estadístico: Los datos fueron procesados mediante un Análisis de Varianza (ANOVA), complementado con la prueba de Tukey (BNJ) al 5% de significancia. Hallazgos principales: Los resultados determinaron que la aplicación de guano incidió significativamente en variables clave como el número y área de las hojas, el peso seco del rastrojo y la productividad de las vainas y semillas; estableciéndose una dosis óptima de 9,4 g/planta. Por otro lado, el uso de urea mostró un impacto directo en la altura de la planta, el follaje y los componentes del rendimiento (número y peso de vainas y semillas), alcanzando su mayor eficiencia con una dosis de 5,4 g/planta. (P. 1)

1.1.2. A nivel nacional

Benavente (2025) en su investigación titulado "Efecto de abono foliar orgánico en la producción de tres variedades de frijol canario (*Phaseolus vulgaris* L.) en el sector de Quitasol, Abancay – Apurímac, 2023", analizó la influencia del biofertilizante "Bio Chumbinia" sobre el desempeño productivo de las variedades Canario 2000, Huaralino y Camanejo. El objetivo central fue determinar la dosis óptima de este insumo orgánico para potenciar tanto el crecimiento vegetativo como el rendimiento final de grano en la

región andina de Perú. La metodología se basó en el seguimiento de 288 unidades experimentales, evaluando variables morfológicas y componentes de rendimiento. En términos de crecimiento, la variedad Canario 2000 registró la mayor altura promedio (119.01 cm), mientras que la variedad Huaralino destacó en el vigor del tallo (4.55 mm) y en la longitud de vainas (13.17 cm). Los resultados permitieron identificar que la aplicación de una dosis de 250 ml por cada 20 L de agua fue la más efectiva, logrando incrementar significativamente el diámetro del tallo (5.56 mm), el número de hojas por planta (20.49 frente a las 16.28 del control) y la longitud de las vainas (14.45 cm). En cuanto a la productividad, la variedad Canario 2000 demostró una superioridad genética y adaptativa al alcanzar el mayor número de vainas (34.84) y un rendimiento de 1 768.7 kg/ha, superando al promedio de las otras variedades y al grupo control, que registró apenas 1 567.2 kg/ha. Concluyendo que el uso de biofertilizantes foliares no solo optimiza el desarrollo agronómico del frijol, sino que representa una alternativa sostenible para incrementar la rentabilidad del cultivo, recomendando específicamente el uso de Canario 2000 bajo la dosis de 250 ml/20L para condiciones agroclimáticas similares. (p. 7)

Murga-Orrillo et al. (2024) en su investigación titulado “Caracterización fisiológica y compuestos bioactivos de accesiones prometedoras de caupí (*Vigna unguiculata* L. Walp) en la Amazonía peruana”, evaluaron el desempeño de tres accesiones (PER1005854, PER1005851 y PER12645) bajo la influencia de diversos mantillos orgánicos en Yurimaguas, Loreto. Los hallazgos demostraron que el uso de coberturas “especialmente cáscara de arroz, hojarasca de tornillo y fibra de palma” favoreció significativamente el crecimiento vegetativo al optimizar la retención de humedad en el suelo. Respecto al rendimiento, las accesiones PER12645 y PER1005851 destacaron por su precocidad (ciclos de 71 días) y productividad superior de grano, alcanzando los 1141 y 1125 kg/ha, respectivamente. Por el contrario, la accesión PER1005854 sobresalió por su alta producción de biomasa (14,497 kg/ha), ideal para la conservación de suelos. Finalmente, el análisis bromatológico reveló que, si bien los macronutrientes fueron constantes, las variedades de tegumento oscuro (PER12645 y PER1005854) presentaron una actividad antioxidante superior (hasta 26.3 $\mu\text{molTG/g}$), resaltando su potencial valor nutracéutico para el consumo humano.

Vilchez (2024) en su investigación titulada “Fertilización nitrogenada en la nodulación y el rendimiento de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) var. Canario Centenario en

invernadero”, analizó la tolerancia de la simbiosis entre el frijol y la bacteria *Rhizobium* sp. ante distintas fuentes y dosis de nitrógeno. El estudio se desarrolló bajo un diseño experimental con arreglo factorial 4 x 3, evaluando cuatro fuentes de fertilizante (urea, fosfato diamónico, nitrato de amonio y sulfato de amonio) en tres concentraciones de nitrógeno (20, 40 y 80 ppm). Los hallazgos determinaron una relación inversa entre la disponibilidad de nitrógeno químico y la actividad simbiótica; específicamente, la dosis más elevada (80 ppm) provocó una reducción crítica en la proliferación de nódulos y una inhibición casi total de la fijación biológica de nitrógeno. Por el contrario, el desarrollo vegetativo (tamaño y peso seco foliar) mostró un incremento proporcional a la dosis aplicada. En cuanto al rendimiento, el tratamiento con nitrato de amonio a una dosis de 40 ppm destacó significativamente sobre los demás, logrando un equilibrio óptimo entre el aporte externo y la productividad. Esta investigación concluye que una gestión moderada de la fertilización nitrogenada es clave para maximizar la producción sin suprimir los beneficios biológicos naturales del cultivo.

Laurencio (2021) en su investigación titulado "Guano de Isla en el rendimiento de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) variedad Canario en condiciones Edafoclimáticas de Umari – 2020", desarrollado en Perú, investigó el potencial del guano de isla como alternativa orgánica para optimizar la productividad del cultivo. El objetivo principal fue comparar distintas dosificaciones de este abono frente a un testigo relativo basado en gallinaza, buscando una estrategia nutricional sostenible para el agricultor. Metodológicamente, la investigación se estructuró bajo un Diseño de Bloques Completamente al Azar (DBCA) con cuatro tratamientos y cuatro repeticiones. Las dosis evaluadas de guano de isla fueron de 3,165 kg/ha, 2,374 kg/ha y 1,583 kg/ha, las cuales se contrastaron con una aplicación de gallinaza de 2,026 kg/ha. Se analizaron variables clave como el número de vainas por planta, el peso de 100 granos comerciales, la longitud de vaina, la calidad del grano y el rendimiento proyectado por hectárea. Los resultados determinaron que el tratamiento con la dosis más alta (3,165 kg/ha) fue el más eficiente, alcanzando un rendimiento promedio de 2,782 kg/ha. Este nivel de fertilización orgánica destacó significativamente con un promedio de 37.75 vainas por planta, un peso de grano de 79.50 g y vainas de 17 cm de longitud. En cuanto a la morfología del grano, se observaron características de alta calidad comercial: testa lisa, color amarillo de brillo ligero, tamaño mediano y forma arriñonada. Finalmente, el autor concluye que el guano de isla representa la alternativa más viable para maximizar el rendimiento del frijol Canario, destacando su valor no solo en la

productividad, sino también en la preservación del ecosistema y la obtención de alimentos orgánicos, recomendando su implementación técnica sobre los fertilizantes tradicionales. (p. 4)

1.1.3. A nivel local

Villar (2025) en su investigación titulado “Rendimiento del frijol de grano negro (*Phaseolus vulgaris* L.) con aplicación de nitrógeno e inoculante. Canaán 2735 msnm - Ayacucho 2023”, investigó la respuesta productiva y económica de los ecotipos Ucayali y Pampas frente a la fertilización nitrogenada y el uso de inoculantes (*Rhizobium*). El experimento se llevó a cabo bajo un diseño completamente aleatorizado con arreglo factorial y cuatro repeticiones, evaluando parámetros de crecimiento, rendimiento y rentabilidad. Los resultados indicaron que ambos ecotipos mostraron precocidad, alcanzando la madurez fisiológica entre los 95 y 105 días. En términos de desarrollo morfológico y componentes del rendimiento, las dosis de 120 y 90 kg ha⁻¹ de nitrógeno optimizaron la altura de planta (aprox. 79 cm) y el número de vainas por planta (hasta 32.8). De manera específica, el ecotipo Pampas demostró una superioridad estadística sobre el cultivar Ucayali, logrando un rendimiento promedio de 3 270.12 kg ha⁻¹. Finalmente, el análisis financiero determinó que la mayor rentabilidad económica se obtuvo con el ecotipo Pampas bajo una fertilización de 90 kg ha⁻¹ de nitrógeno, posicionándose como la estrategia de manejo más eficiente para la zona de estudio.

Najarro (2025) en su investigación titulada “Microorganismos y abonos orgánicos en el rendimiento de tres variedades de frijol negro (*Phaseolus vulgaris* L.), Canaán, Ayacucho, 2023”, analizó el impacto de la fertilización biológica y orgánica en la productividad de las variedades Ucayali, Libertena y Menita. El estudio se desarrolló a 2750 msnm bajo un diseño de parcelas divididas (DPD) con tres repeticiones, evaluando la interacción entre el material genético y diversas combinaciones de microorganismos de montaña (MM), *Rhizobium* (Rh) y guano de isla (GI). Los resultados determinaron que la variedad Menita destacó por su precocidad, alcanzando la madurez fisiológica a los 97.4 días, además de registrar el mayor peso de mil semillas (271.81 g) en todos los tratamientos. En términos de productividad, esta misma variedad obtuvo el rendimiento más alto con 4985.5 kg/ha. Respecto a la fertilización, el tratamiento A3 (MM+Rh+GI) fue el más eficaz, elevando la altura de planta a 93.1 cm y maximizando el rendimiento de la variedad Menita hasta los 5527.7 kg/ha. Por su parte, la combinación A2 (Rh+GI)

también mostró resultados sobresalientes con 5429.4 kg/ha, confirmando que la sinergia entre microorganismos y abonos orgánicos potencia significativamente los componentes del rendimiento en el cultivo de frijol. (P. 11)

Centeno (2024) en su investigación titulado “Niveles de guano de isla en el rendimiento de frijol castilla (*Vigna unguiculata* L. Walp), Pichari, Cusco, 2023”, evaluó el impacto de la fertilización orgánica en el Centro Experimental de Ingeniería Agroforestal en Cusco, Perú. La investigación, desarrollada bajo un diseño de bloques completos al azar con seis tratamientos (0.0 a 2.5 t/ha) y tres repeticiones, analizó variables de precocidad, crecimiento y productividad. Los resultados revelaron que, si bien las dosis menores (0.0 a 1.5 t/ha) favorecieron una madurez fisiológica temprana entre los 72 y 80 días, los niveles de 2.0 y 2.5 t/ha retrasaron ligeramente la cosecha pero maximizaron el rendimiento, alcanzando producciones de 2,675.67 y 2,689.67 kg/ha respectivamente. Asimismo, estas dosis superiores optimizaron el peso de mil semillas, el número de vainas por planta y el índice de cosecha (hasta 44.4%). No obstante, el análisis de regresión cuadrática sugirió que incrementar las dosis de guano de isla más allá de los niveles evaluados no se justifica económicamente, estableciendo un límite para la eficiencia del abono orgánico en este cultivo. (P. 9)

Urribarri (2022) en su investigación titulado “Densidades de plantas y niveles de guano de islas en el rendimiento de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) Var. Red Kidney, Pichari - 550 msnm Cusco”, evaluó la respuesta productiva de esta variedad ante el manejo de la población por hectárea y la fertilización orgánica. La investigación se llevó a cabo en la región de Cusco, Perú, bajo un Diseño de Bloque Completo al Azar (DBCA) durante el periodo de agosto a noviembre de 2020, con el fin de optimizar tanto la precocidad como el rendimiento final de grano. Los resultados revelaron una notable precocidad en la variedad Red Kidney, alcanzando la madurez fisiológica entre los 62 y 79 días después de la siembra. En cuanto al desarrollo vegetativo, se observó una correlación directa entre el incremento de la fertilización y la talla de la planta, logrando una altura máxima de 53.3 cm con la aplicación de 3.0 t ha⁻¹. Asimismo, los componentes de rendimiento como el número de vainas (29.1) y la longitud de las mismas (13.65 cm) mostraron sus valores más altos con dosis de 2.0 y 3.0 t ha⁻¹ de guano de isla, evidenciando la eficiencia del abono orgánico en la arquitectura de la planta. En términos de productividad, el estudio determinó que la combinación de factores es determinante:

el rendimiento de grano alcanzó los 3,043.4 kg ha⁻¹ con la dosis más alta de fertilizante. No obstante, el análisis económico reveló que la mayor utilidad bruta y rentabilidad (1.4) se obtuvieron con una densidad de 187,500 plantas ha⁻¹ integrada a una dosis de 2.0 t ha⁻¹ de guano de isla. El autor concluye que esta configuración técnica no solo maximiza el rendimiento físico, sino que garantiza la viabilidad económica del cultivo en condiciones de selva alta. (p. 10)

1.2. Bases teóricas

1.2.1. El frijol

El frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) se define taxonómicamente como una especie perteneciente a la familia Fabaceae (o Leguminosae), siendo la leguminosa de grano con mayor relevancia para el consumo humano directo en el ámbito global. Este cultivo no solo es un componente central de la seguridad alimentaria en países en vías de desarrollo por su bajo costo, sino que también es reconocido como un alimento funcional debido a su densidad nutricional y la presencia de metabolitos secundarios con efectos biológicos positivos (Cid-Gallegos et al., 2023, p. 309). Su importancia económica y social es tan vasta que se estima un consumo per cápita anual de aproximadamente 6.6 kg, lo que subraya su rol estratégico en la dieta de diversas poblaciones (Palacio-Márquez et al., 2021, p. 2).

Desde una perspectiva bioquímica, el grano de frijol destaca por un perfil nutricional complejo donde los carbohidratos constituyen entre el 50% y el 60% de su peso seco, seguidos por un contenido proteico significativo que oscila entre el 15% y el 25% (Cid-Gallegos et al., 2023, p. 309). Estudios específicos sobre la variabilidad genética de la especie han determinado valores promedio de proteína de un 23.16% y fibra dietética de hasta un 19%, destacando que estas legumbres son fuentes esenciales de aminoácidos como la lisina, fenilalanina y tirosina, además de aportar minerales críticos y un contenido lipídico reducido (Palacio-Márquez et al., 2021, p. 5).

La dimensión biológica del frijol se extiende a su capacidad de establecer simbiosis con bacterias del género *Rhizobium*, un proceso conocido como fijación biológica de nitrógeno (FBN). Esta interacción es fundamental para la sostenibilidad del cultivo, ya que permite la conversión del nitrógeno atmosférico en formas asimilables por la planta, lo que reduce la dependencia de fertilizantes químicos y mejora el rendimiento

del grano (Lirio-Paredes et al., 2022, p. 2). No obstante, la eficiencia de esta fijación está condicionada tanto por la genética del hospedero como por la efectividad de las cepas bacterianas presentes en el suelo, existiendo una marcada diferencia en la respuesta de crecimiento y acumulación de biomasa entre variedades cultivadas y silvestres (López-Alcocer et al., 2020, p. 842).

Finalmente, el potencial nutracéutico del frijol radica en su elevada actividad antioxidante, mediada principalmente por compuestos fenólicos, flavonoides y antocianinas. Estos fitonutrientes no solo contribuyen a la pigmentación de la semilla, sino que desempeñan un papel crucial en la neutralización de radicales libres, otorgando al frijol propiedades protectoras contra patologías degenerativas, estrés oxidativo e inflamación crónica (Palacio-Márquez et al., 2021, p. 8). La integración de estos atributos fisicoquímicos y biológicos posiciona a *Phaseolus vulgaris* como un modelo de estudio prioritario para la biofortificación y la agricultura sostenible (Cid-Gallegos et al., 2023, p. 310).

1.2.2. Taxonomía del frijol

El frijol corresponde a la familia Fabáceae, subfamilia Faboideae y del género *Phaseolus*, en la cual pertenecen cincuenta y cinco especies, es el tercer cultivo más importante del mundo. Este género incluye aproximadamente treinta y cinco especies, de las cuales cuatro se cultivan. (Espinoza y Castillo, 2024, p. 12).

Familia	: Fabaceae
Orden	: Fabales
Subfamilia	: Faboideae
Tribu	: Phaseolae
Género	: Phaseolus
Nombre científico	: Frijol Castilla (<i>Vigna unguiculata</i> L.)
	: Frijol Canario (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.)

1.2.3. Importancia del frijol

El frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) constituye una de las leguminosas de grano más relevantes a escala mundial, cuyo cultivo se encuentra ampliamente distribuido en diversas regiones geográficas y sistemas agrícolas. Su trascendencia no se limita

exclusivamente a su papel como fuente de alimento, sino que se extiende hacia dimensiones ambientales, económicas y sociales que lo posicionan como un cultivo estratégico para enfrentar los desafíos contemporáneos de la producción agrícola. En este sentido, Rodríguez Madrera et al. (2024) señalan que esta leguminosa es considerada un cultivo con potencial para garantizar la seguridad alimentaria futura, dado que puede suministrar proteína vegetal a una población mundial en crecimiento, especialmente en África y en países en desarrollo, al tiempo que contribuye a mitigar la obesidad en naciones desarrolladas gracias a su bajo índice glucémico (p. 1).

Desde una perspectiva nutricional, las semillas de frijol presentan una composición particularmente valiosa para la alimentación humana. Rodríguez Madrera et al. (2024) describen que estas se caracterizan por un alto contenido de proteína, carbohidratos, vitaminas y minerales, además de la presencia de compuestos funcionales como la fibra dietética y los compuestos fenólicos, los cuales ejercen efectos protectores frente a diversas enfermedades (p. 1). Esta riqueza nutricional adquiere especial relevancia si se considera que la deficiencia de ciertos elementos como el hierro, el zinc y el fósforo representa un problema de salud pública en numerosas regiones del mundo, y que el frijol puede contribuir de manera significativa a cubrir dichos requerimientos. En el estudio de estos autores, el potasio resultó ser el mineral más abundante en las semillas analizadas, seguido del fósforo, el azufre, el magnesio y el calcio, con concentraciones de hierro que oscilaron entre 50,68 y 66,94 mg/kg y de zinc entre 25,17 y 39,69 mg/kg (Rodríguez Madrera et al., 2024, p. 7).

No obstante, la importancia del frijol trasciende su valor como alimento y se proyecta hacia el ámbito de la sostenibilidad agrícola. Las leguminosas poseen la capacidad singular de fijar nitrógeno atmosférico mediante la simbiosis con bacterias del suelo, un proceso conocido como fijación biológica de nitrógeno (FBN). Ghafoor et al. (2024) explican que este proceso constituye un servicio ecosistémico de gran valor, pues convierte el nitrógeno atmosférico en formas asimilables por las plantas, lo que enriquece naturalmente el suelo con este nutriente esencial y reduce la necesidad de emplear fertilizantes químicos sintéticos (p. 2). De acuerdo con el metaanálisis realizado por estos autores, el porcentaje de nitrógeno derivado de la fijación atmosférica (Ndfa) en leguminosas varía entre el 5 % y el 99 %, con un promedio global del 68 %, lo que

evidencia la magnitud del aporte que estas plantas realizan al ciclo del nitrógeno en los agroecosistemas (Ghafoor et al., 2024, p. 10).

La integración de leguminosas en los sistemas de cultivo genera beneficios que se extienden más allá de la parcela donde se siembran. Ghafoor et al. (2024) destacan que las leguminosas no solo proporcionan nitrógeno para los cultivos con los que se asocian mediante la intercalación, sino también para los cultivos no leguminosos que se establecen en rotaciones posteriores, a través de mecanismos como la exudación radicular y la descomposición de raíces muertas (p. 2). En el contexto de la agricultura orgánica, este servicio ecosistémico resulta particularmente crucial, ya que el suministro de nitrógeno a los ciclos de nutrientes depende enteramente de fuentes biológicas internas, sin recurrir a insumos sintéticos externos. Incluso en sistemas convencionales, el aprovechamiento de la FBN permite reducir el uso de fertilizantes nitrogenados y atenuar los efectos potencialmente perjudiciales de la fertilización química sobre el medio ambiente (Ghafoor et al., 2024, p. 2).

La dimensión ambiental del cultivo de frijol adquiere mayor relevancia cuando se examina en el marco del cambio climático y la búsqueda de modelos agrícolas más sostenibles. Rodríguez Madrera et al. (2024) subrayan que la agricultura constituye un contribuyente significativo de emisiones de gases de efecto invernadero, y que la agricultura orgánica representa un sistema de gestión integrada que promueve la salud del agroecosistema, incluyendo la biodiversidad, los ciclos biológicos y la actividad biológica del suelo, al tiempo que enfatiza el uso de insumos naturales y la renuncia a fertilizantes y pesticidas sintéticos (p. 2). En su estudio comparativo, estos investigadores encontraron que los frijoles cultivados bajo manejo orgánico presentaron un contenido de proteína significativamente superior —aproximadamente un 14 % más en promedio— respecto a los producidos de manera convencional, así como mayores niveles de compuestos fenólicos y de microelementos esenciales como el hierro y el zinc (Rodríguez Madrera et al., 2024, p. 4,7).

Sin embargo, es necesario reconocer que el cambio climático plantea desafíos importantes para el aprovechamiento pleno del potencial de las leguminosas. Ghafoor et al. (2024) advierten que el aumento de las temperaturas y la alteración de los patrones de precipitación reducen significativamente la eficiencia de la FBN, como lo demuestra un

estudio en el que un incremento de 2 °C provocó una reducción del 32 % en la fijación biológica de nitrógeno en soya (p. 2). Además, los eventos climáticos extremos pueden perturbar la simbiosis entre leguminosas y bacterias, disminuyendo la efectividad de este proceso. Ante este panorama, resulta indispensable explorar estrategias adaptativas como la selección de variedades tolerantes a la sequía y la optimización de las prácticas de riego, a fin de salvaguardar tanto la capacidad fijadora de nitrógeno como la productividad general de estos cultivos (Ghafoor et al., 2024, p. 2).

El papel funcional del frijol en la salud humana merece también una consideración detenida. Los compuestos fenólicos presentes en las semillas desempeñan funciones antioxidantes vinculadas a propiedades antidiabéticas, antiinflamatorias, antimutagénicas y anticancerígenas (Rodríguez Madrera et al., 2024, p. 5). Asimismo, el perfil de ácidos grasos del frijol, aunque este posee un contenido lipídico bajo, resulta nutricionalmente interesante debido a la presencia de ácidos grasos esenciales como el linoleico (ω -6) y el linolénico (ω -3), con proporciones ω -6/ ω -3 inferiores a 1, lo que podría contribuir a equilibrar la ingesta excesiva de ácidos grasos ω -6 característica de las dietas modernas (Rodríguez Madrera et al., 2024, p. 7).

1.2.4. El frijol común en la fijación biológica del nitrógeno

El nitrógeno (N) constituye uno de los macronutrientes con mayor influencia en los rendimientos agrícolas a escala mundial, dado que es un componente estructural esencial de proteínas, ácidos nucleicos y clorofila. Sin embargo, su disponibilidad en el suelo es frecuentemente limitante para la producción de cultivos, en especial en sistemas de bajos insumos. La dependencia histórica de los fertilizantes nitrogenados de síntesis química ha generado no solo altos costos de producción para los agricultores, sino también graves implicaciones ambientales como la eutrofización de cuerpos de agua y la emisión de óxido nitroso (N₂O), un potente gas de efecto invernadero. Ante esta problemática, la simbiosis entre leguminosas y bacterias del género *Rhizobium* emerge como una alternativa ecológicamente viable y económicamente eficiente para la provisión de nitrógeno a los cultivos (Sinharoy et al., 2024, p. 1).

En el caso específico del frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.), la asociación simbiótica con bacterias del género *Rhizobium* representa un mecanismo biológico de especial relevancia agronómica. (Uebersax et al., 2023, p. e155) señalan que el frijol es

un cultivo de ciclo corto capaz de albergar rizobios responsables de la fijación biológica del nitrógeno, lo cual le confiere una menor huella de carbono en comparación con otros cultivos de grano. Esta capacidad reduce sustancialmente la necesidad de aplicar fertilizantes nitrogenados de síntesis industrial, lo que favorece la sustentabilidad de los sistemas agrícolas y contribuye a la protección del medio ambiente. De este modo, la interacción *Rhizobium*–frijol se convierte en un componente estratégico para el diseño de sistemas de producción sostenibles, especialmente en regiones de América Latina y África donde predominan los agricultores de pequeña y mediana escala (Uebersax et al., 2023, p. e155).

1.2.5. La bacteria *Rhizobium*

Las bacterias pertenecientes al género *Rhizobium* son microorganismos Gram-negativos de morfología bacilar o cocoide, carentes de endosporas, dotados de movilidad mediante flagelos peritricos o polares y capaces de formar cápsulas protectoras. Su metabolismo es de tipo heterótrofo quimiorganotrófico en condiciones de vida libre, mientras que en condición simbiótica adoptan un estado diferenciado denominado bacterioide, en el cual expresan la maquinaria enzimática necesaria para la fijación del nitrógeno atmosférico. El pH óptimo para su desarrollo se sitúa próximo a la neutralidad, aunque la tolerancia a condiciones extremas de pH, temperatura y salinidad es variable en función de la cepa y la especie considerada (Schulte et al., 2022, p. 2).

Desde el punto de vista del ciclo biológico, *Rhizobium* transita por distintos estadios adaptativos que van desde la vida libre en el suelo hasta la diferenciación en bacteroides fijadores de nitrógeno dentro de los nódulos radicales. Schulte et al. (2022, p. 3) desarrollaron un modelo metabólico a escala genómica para *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae* 3841, con el que describieron las características metabólicas de tres estadios de vida: bacterias rizosféricas de vida libre, bacterias no diferenciadas en el interior del nódulo y bacteroides fijadores de nitrógeno. Sus resultados revelaron que la transición desde la vida libre hasta la formación de bacteroides funcionales involucra al menos 603 regiones genéticas esenciales, lo que pone de manifiesto la notable complejidad del proceso de simbiosis. Esta complejidad molecular ha motivado investigaciones orientadas a comprender y, en última instancia, replicar o ampliar la capacidad de fijación de nitrógeno más allá de las leguminosas.

Respecto a la nodulación, la señalización molecular entre la planta huésped y *Rhizobium* está regulada por factores de nodulación (Nod factors) que desencadenan una profunda reprogramación transcriptómica en las células de la raíz. Sinharoy et al. (2024, p. 2) documentaron que factores de transcripción del tipo NF-Y desempeñan roles cruciales en la organogénesis nodular de *Phaseolus vulgaris*, con interacciones específicas como la identificada entre la subunidad NF-YC1 y la proteína quinasa NIPK. Asimismo, la disponibilidad de fósforo en el suelo ejerce efectos reguladores sobre la formación de nódulos mediante la acción del microRNA399 y el gen PHO2, lo que subraya el papel de la nutrición mineral en la eficiencia del proceso simbiótico.

1.2.6. La fijación biológica del nitrógeno

La fijación biológica del nitrógeno (FBN) es el proceso mediante el cual determinados microorganismos procariotas convierten el nitrógeno molecular (N₂) presente en la atmósfera en amoníaco (NH₃) biodisponible para las plantas, gracias a la acción catalítica de la enzima nitrogenasa. Dicha enzima está compuesta por dos metaloproteínas: la dinitrogenasa MoFe (proteína molibdeno-hierro), que actúa como componente catalítico, y la dinitrogenasa reductasa (proteína Fe), que provee los electrones necesarios para la reducción del N₂. Ambas subunidades están codificadas por los genes nif, entre los cuales nifH, nifD y nifK son los más estudiados (Sinharoy et al., 2024, p. 1).

La eficiencia de la FBN depende tanto del genotipo vegetal como de la cepa bacteriana involucrada, así como de factores edafoclimáticos que modulan la actividad nodular. López-Alcocer et al. (2020, pp. 841–842) evaluaron 27 cepas de *Rhizobium* spp. recolectadas en frijol cultivado y silvestre del occidente de México, determinando que los índices de eficiencia en FBN superiores al 83% fueron alcanzados por diversas cepas en simbiosis con la variedad de frijol Cuarenteño. Este hallazgo es de notable relevancia pues demuestra que la selección de cepas nativas altamente eficientes puede sustentar una estrategia de biofertilización capaz de reducir significativamente la dependencia de los fertilizantes nitrogenados sintéticos.

Desde la perspectiva de la sostenibilidad agrícola, la integración de la FBN en los sistemas de producción de frijol contribuye al balance del ciclo del nitrógeno, reduciendo

las pérdidas por lixiviación y volatilización propias del uso excesivo de fertilizantes nitrogenados.

1.2.7. *Propiedades nutritivas y usos del frijol*

El frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) es reconocido a nivel mundial como uno de los alimentos de mayor valor nutricional dentro de las leguminosas de grano, y su importancia se fundamenta tanto en su composición proximal como en la diversidad de compuestos bioactivos que contiene. Uebersax et al. (2023, p. e155) señalan que los nutricionistas caracterizan al frijol como un recurso alimentario excepcional debido a su elevado contenido proteico y a su combinación equilibrada de carbohidratos, fibra dietética y minerales, especialmente hierro y zinc. Esta riqueza nutricional lo posiciona como un alimento de gran relevancia para la seguridad alimentaria, particularmente en regiones de América Latina y África donde constituye una fuente primaria de proteína para poblaciones de bajos ingresos.

En lo que respecta al aporte proteico, el frijol presenta un contenido de proteína en semilla que oscila entre el 17 y el 27% del peso seco, con variaciones significativas en función del genotipo, las condiciones de cultivo y el procesamiento. Rodríguez Madrera et al. (2024) documentaron que los frijoles provenientes de sistemas de producción orgánica presentaron contenidos significativamente superiores de proteína, compuestos fenólicos y microelementos esenciales en comparación con los cultivados de forma convencional. A diferencia de las gramíneas como el maíz “que carecen de los aminoácidos esenciales lisina y triptófano en cantidades adecuadas”, el frijol los provee en proporciones que complementan de manera óptima la dieta humana, aspecto que explica la complementariedad histórica de la combinación maíz-frijol en las culturas mesoamericanas.

En cuanto al aporte de micronutrientes, el frijol es una fuente significativa de minerales esenciales como hierro, zinc, magnesio, potasio, calcio y fósforo. Neupane et al. (2024, p. 1) demostraron que las variedades de frijol cultivadas en zonas de alta altitud en Nepal presentan una notable concentración de compuestos bioactivos y minerales, con efectos protectores contra enfermedades crónicas como el cáncer, las enfermedades cardiovasculares, la obesidad y la diabetes. Por su parte, la ingesta regular de frijol negro ha sido asociada con la reducción de los niveles de colesterol LDL, mejora de la respuesta

glucémica postprandial y modulación positiva de la microbiota intestinal, beneficios atribuibles en parte a su elevado contenido de almidón resistente y fibra soluble.

El frijol también destaca como fuente de compuestos fenólicos de alto valor biológico, especialmente antocianinas, flavonoides y ácidos fenólicos. Meenu et al. (2023, p. 1019) documentaron que las antocianinas presentes en el frijol negro están asociadas con múltiples actividades biológicas, entre ellas propiedades antitrombóticas, cardioprotectoras, vasodilatadoras, antidiabéticas, anticancerígenas, antimicrobianas, neuroprotectoras y antiinflamatorias. Estos compuestos, concentrados principalmente en el tegumento de la semilla, actúan como potentes antioxidantes que reducen el estrés oxidativo celular, mecanismo vinculado con la prevención de enfermedades degenerativas crónicas incluyendo el cáncer de colon, la arteriosclerosis y las patologías inflamatorias intestinales.

El estudio de Campa et al. (2023) realizó un análisis de asociación a nivel genómico (GWAS) del perfil fenólico y el color del tegumento en *Phaseolus vulgaris*, identificando regiones genómicas asociadas con la síntesis de polifenoles. Estos hallazgos abren perspectivas para el mejoramiento genético orientado a incrementar el contenido de compuestos bioactivos en variedades comerciales de frijol, con impacto directo en la calidad nutracéutica del cultivo. En este contexto, Uebersax et al. (2023, p. e155) señalan que algunos compuestos bioactivos del frijol han demostrado capacidad para mitigar enfermedades cardiovasculares, hipertensión, hipercolesterolemia y cáncer, lo que refuerza el valor del frijol no solo como alimento sino como ingrediente funcional en la dieta contemporánea.

Desde una perspectiva de seguridad alimentaria global, el frijol común posee un perfil de producción sostenible que lo diferencia de otras fuentes proteicas. Su capacidad de fijar nitrógeno atmosférico a través de la simbiosis con rizobios reduce su requerimiento de fertilizantes sintéticos y por ende, su huella de carbono, convirtiéndolo en una opción estratégica para los sistemas alimentarios del siglo XXI. Uebersax et al. (2023, p. e155) concluyen que el frijol es un recurso mundial de notable biodiversidad, con dos centros de domesticación (Andes y América Central) y más de diez clases de mercado cultivadas globalmente, cuya integración en sistemas de producción

diversificados ofrece simultáneamente beneficios nutricionales, económicos y ambientales.

1.2.8. Situación actual del frijol

A escala global, la producción de frijol seco ha mostrado un crecimiento sostenido en la última década. De acuerdo con datos de la FAO, en 2020 la producción mundial alcanzó los 27,5 millones de toneladas en una superficie cosechada de aproximadamente 34,8 millones de hectáreas, lo que representa un rendimiento promedio de 0,8 t/ha (Food and Agriculture Organization [FAO], 2022). Los principales países productores en ese año fueron India, Myanmar y Brasil, que concentraron en conjunto cerca del 41 % de la producción mundial, siendo América Latina y el este de África las regiones con mayor volumen acumulado. En el caso de la producción peruana de frijol grano seco “que incluye principalmente las variedades canario, panamito y castilla”, esta alcanzó alrededor de 107 100 t en una superficie cosechada de 92 900 ha, con un rendimiento promedio de 1 200 kg/ha (L. J. Aybar-Peve et al., 2025, p. 2).

A nivel nacional, la distribución de la producción por regiones naturales evidencia un patrón espacial marcado. El análisis de datos históricos señala que la sierra concentra la mayor área sembrada, seguida por la selva y la costa; no obstante, en términos de rendimientos unitarios, la costa supera consistentemente a las otras dos regiones, con promedios que oscilan entre 1 300 y 1 400 kg/ha, frente a los 1 000 a 1 300 kg/ha registrados en la sierra y los 900 a 1 000 kg/ha de la selva (L. J. Aybar-Peve et al., 2025, p. 3). En este contexto, el INIA-MIDAGRI ha identificado variedades de frijol con capacidad de resistencia al estrés hídrico “como el INIA 439 CASTACEN y el Canario Camanejo” que pueden generar rendimientos de hasta 3,5 t/ha bajo condiciones controladas de riego tecnificado, lo que representa un potencial importante para incrementar la productividad en la costa central, norte y sur del país (Vásquez et al., 2023, p. 7).

En cuanto a los precios internos, el mercado del frijol en el Perú muestra una variabilidad regional significativa, con cotizaciones más bajas en zonas de selva y precios más elevados en los mercados de la costa. Esta dinámica refleja no solo los costos de transporte, sino también las diferencias en la demanda y en los patrones de consumo entre regiones. La brecha entre los rendimientos actuales y el potencial productivo tecnificado

constituye uno de los principales retos del sector, que se suma a los impactos del cambio climático, la variabilidad hídrica y las limitaciones en el acceso a semilla certificada (Vásquez et al., 2023, p. 8).

1.2.9. Filogenia y distribución

La familia Leguminosae “también conocida como Fabaceae” es la tercera familia más grande de plantas con flor, con cerca de 643 géneros y más de 18 000 especies distribuidas en ambientes tropicales y templados de todo el mundo. Dentro de ella, la subfamilia Papilionoideae agrupa a las leguminosas de mayor importancia agronómica, organizadas en dos grandes grupos según su adaptación climática: las leguminosas tropicales o faseoloides “que comprenden géneros como *Phaseolus*, *Vigna*, *Glycine* y *Cajanus*” y las leguminosas templadas o galegoideas, que incluyen géneros como *Melilotus*, *Trifolium*, *Medicago*, *Pisum* y *Vicia*, entre otros. La tribu Phaseoleae, que alberga al frijol común (*Phaseolus vulgaris*), al caupí (*Vigna unguiculata*) y a la soya (*Glycine max*), es el grupo económicamente más relevante y representa el 75 % de las legumbres comercializadas en el mundo (Alcázar-Valle et al., 2020, p. 2).

Se ha determinado que el frijol común tiene su origen en progenitores silvestres y no en formas adventicias fugitivas derivadas de cultivos, como ocurre en otras especies domesticadas. Su distribución altitudinal en estado silvestre abarca desde los 700 m s. n. m. en Tucumán (Argentina) hasta los 2 900 m s. n. m. en el Cusco (Perú). Debido a la compleja geografía andina, el hábitat de *P. vulgaris* silvestre se ha fragmentado en los valles interandinos orientales, mientras que en Ecuador y el noroeste de Perú la distribución se extiende hacia la vertiente occidental. Esta distribución fragmentada de más de 8 000 km se refleja directamente en la composición genética del taxón, resultado de sucesivas expansiones y extinciones de poblaciones naturales a lo largo de milenios (Elias et al., 2021, p. 3).

Las evidencias arqueológicas sitúan la presencia de frijol común hace aproximadamente 8 000 años en el Perú, 7 000 años en México y unos 2 000 años en el suroeste de los Estados Unidos. En el Perú se han encontrado restos de la especie en Huaca Prieta con una antigüedad de 2 000 años a. C., así como formas completamente domesticadas en el valle de Nazca con unos 2 500 años a. C. Estas evidencias confirman que el Perú constituye uno de los centros de origen y domesticación del frijol, acervo

genético que hoy se conserva en el Banco de Germoplasma del INIA, que alberga más de 1 794 accesiones de frijol provenientes de regiones andinas, amazónicas y costeras (Vásquez et al., 2023, pp. 9–10).

1.2.10. Clasificación taxonómica

La clasificación taxonómica de *Phaseolus vulgaris* L. se establece dentro del Reino Vegetal, Clase Dicotyledoneae, Subclase Rosidae, Orden Fabales, Familia Leguminosae (Papilionaceae), Subfamilia Litoidea (Papilionoideae), Tribu Phaseoleae, Subtribu Phaseolinae, Género Phaseolus y Especie *Phaseolus vulgaris* L. Esta especie es diploide ($2n = 2x = 22$ cromosomas) y cuenta con un tamaño de genoma estimado en 560,30 Mb, con 29 925 genes codificantes de proteínas según la primera ensambladura telomérica completa disponible (Aybar-Peve et al., 2025, p. 2).

En cuanto a su nomenclatura popular, la especie recibe una diversidad notable de nombres comunes según la región geográfica: frijol, frisol, fréjol, frejol, habichuela, poroto, caraota, chuwi, habilla, judía, alubia, feijao, bean, common bean, snap bean, French bean, garden bean y haricot bean, entre otros. El término 'frijol' es el más extendido desde México hasta Panamá, Cuba y parte del Perú. En el territorio peruano se le denomina también ahuihua, alorba, biik (aguaruna-huambisa), frejol y purutu (en quechua, cocama y ticuna), entre otras denominaciones locales. Esta diversidad de nombres ha generado históricamente confusiones en los registros estadísticos internacionales, ya que en algunos países como Paraguay o Nicaragua el término 'frijol' se aplica indistintamente a *Phaseolus vulgaris* y a *Vigna unguiculata* (frijol castilla), lo que distorsiona las estadísticas de producción de la FAO (Vásquez et al., 2023, p. 11).

1.2.11. Características morfológicas

El frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) es una planta herbácea anual con una morfología que varía considerablemente según el genotipo, el ambiente y el sistema de cultivo. En cuanto al sistema radicular, puede ser fasciculado, fibroso o pivotante, con presencia de cofia y nódulos radiculares producto de la simbiosis con *Rhizobium*. El tallo es herbáceo, erecto, semipostrado o postrado, de sección cilíndrica o angular, subglabro o pubescente, con presencia de pelos uncinulados y coloración verde, rosada o morada; en las variedades de hábito arbustivo no supera 1 m de altura, mientras que en las variedades trepadoras los tallos alcanzan entre 1 y 2 m (Aybar-Peve et al., 2025, p. 3).

Las hojas primarias son simples, opuestas, cordiformes, unifoliadas, auriculadas y acuminadas, con estípulas bífidas. Las hojas verdaderas son compuestas, trifolioladas, alternas, con pecíolo de 4 a 9 cm de largo, folíolos simétricos y acuminados, enteros, de forma ovalada, triangular o cordiforme, glabros o subglabros, con peciolulos de 1,5 a 2,5 mm de largo considerados como pulvínulos, y estípelas de 4 mm ubicadas en la base de los peciolulos. La diversidad morfológica en caracteres foliares “incluyendo longitud y ancho de hoja primaria (LHIP y AHIP), longitud de la estípela y longitud del foliolo lateral (LEPI y LGFL)” muestra alta variabilidad entre accesiones, con coeficientes de variación que pueden superar el 20 %, lo cual refleja la amplia base genética conservada en los bancos de germoplasma del Perú (Vásquez et al., 2023, pp. 14–15).

Las inflorescencias son axilares o terminales, con 1 a 3 flores por pedúnculo, de 0 a 5 cm de largo. Las flores son zigomórficas, con pedicelo glabro o subglabro de 3 a 10 mm, cáliz gamosépalo campanulado y corola pentámera papilionácea con estandarte, alas y quilla; los pétalos son de color blanco, verde, rosado o púrpura. El androceo está formado por 9 estambres diadelfos y 1 libre; el gineceo es súpero, con ovario unilocular comprimido y estigma con pelos en forma de brocha. El fruto es una legumbre dehiscente, glabra o subglabra, de forma muy curvada, encorvada o semilunar. Las semillas son exalbuminosas, de 1 a 1,2 cm de largo, cilíndricas, ovoides o redondeadas, de superficie lisa y coloración diversa, siendo el color y el patrón de la testa uno de los caracteres con mayor variabilidad fenotípica entre accesiones del banco de germoplasma del INIA (Aybar-Peve et al., 2025, pp. 4–5).

1.2.12. Hábitos de crecimiento

El hábito de crecimiento de la planta de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) constituye uno de los rasgos morfológicos fundamentales que determina su comportamiento agronómico, su adaptación a distintos sistemas de producción y su potencial de rendimiento. Este atributo refleja la organización arquitectónica de la planta en el espacio como resultado de su desarrollo ontogénico, condicionado por la interacción entre el genotipo y el ambiente (Camarena et al., 2020, p. 45). En tal sentido, la clasificación de los cultivares según su hábito de crecimiento constituye una herramienta imprescindible para orientar las decisiones técnicas en el manejo agronómico del cultivo.

Desde una perspectiva taxonómica y agronómica, la variabilidad existente en la arquitectura de la planta de frijol común ha sido sistematizada en cuatro tipos principales, siguiendo el sistema de clasificación propuesto por Singh (1982), ampliamente validado y utilizado hasta la actualidad en programas de mejoramiento genético a nivel mundial. Tal como señalan Denning-James et al. (2025), quienes realizaron un estudio de asociación genómica a nivel de genoma completo publicado en la revista *G3: Genes, Genomes, Genetics* (p. 1), las formas silvestres de *P. vulgaris* exhiben un hábito de crecimiento indeterminado y una marcada sensibilidad al fotoperíodo, rasgos que fueron modificados durante la domesticación para generar cultivares adaptados a distintas condiciones de producción.

El **Tipo I** corresponde al hábito determinado erecto o arbustivo. En este tipo, tanto el tallo principal como las ramas laterales concluyen su elongación al diferenciarse en una inflorescencia terminal, lo que detiene el crecimiento de la planta. La altura promedio oscila entre 30 y 50 cm, aunque existen ecotipos enanos que no superan los 25 cm (Camarena et al., 2020, p. 47). Este hábito confiere al cultivo una floración compacta y una madurez sincronizada de las vainas, lo que facilita su cosecha mecanizada y reduce el ciclo vegetativo. Desde el punto de vista genético, Denning-James et al. (2025) identificaron 13 QTL asociados al carácter de determinismo y confirmaron que la determinidad reduce la biomasa aérea y acelera la floración, favoreciendo el cultivo en condiciones de días largos (p. 4).

El **Tipo II** representa el hábito indeterminado erecto arbustivo. Las plantas continúan creciendo durante la etapa de floración, si bien a un ritmo menor, y el tallo principal se prolonga en una guía corta sin aptitud trepadora. Las ramas son más numerosas que en el Tipo I, aunque igualmente cortas. Este tipo presenta un período de floración más extendido y, por consiguiente, una madurez menos uniforme que el Tipo I. Según Aybar-Peve et al. (2025), en un estudio publicado en la revista *Bioagro* (p. 278), las líneas de hábito indeterminado evaluadas en el valle de Chíncha, Perú, manifestaron diferencias fenotípicas significativas en su fenología y componentes de rendimiento, lo que subraya la importancia del genotipo en la expresión del hábito de crecimiento bajo condiciones agroclimáticas específicas.

El **Tipo III** comprende el hábito indeterminado postrado o semitrepador. Las plantas presentan un porte postrado o semipostrado, con un sistema de ramificación ampliamente desarrollado. La altura supera los 80 cm debido al mayor número de nudos en el tallo y las ramas, así como a la mayor longitud de los entrenudos. Este tipo se subdivide en IIIa (plantas completamente postradas) y IIIb (plantas con aptitud trepadora incipiente en el tallo y las ramas). Investigaciones recientes han señalado que el área foliar es significativamente mayor en variedades de hábito indeterminado, como las del Tipo III, indicando una mayor asignación de fotoasimilados hacia tejido fotosintético, lo que puede conferir ventajas en ambientes con alta disponibilidad de recursos (Cavalcante et al., 2020, p. 3).

El **Tipo IV** corresponde al hábito indeterminado trepador fuerte. Las plantas exhiben una marcada capacidad de trepado, desarrollada a partir de la primera hoja trifoliada mediante un mecanismo de doble torsión del tallo. El tallo principal puede alcanzar de 20 a 30 nudos y superar los 2 metros de altura cuando cuenta con soporte adecuado, como tutores o el tallo del maíz en sistemas de asociación. Las ramas son escasas y el período de floración es prolongado, con madurez asincrónica de las vainas. Existen dos subdivisiones: IVa, con distribución uniforme de vainas a lo largo de la planta, y IVb, con concentración de vainas en la parte apical. Como destacan Denning-James et al. (2025), el hábito trepador resulta evolutivamente ventajoso en ambientes con vegetación densa, pues permite a la planta competir eficazmente por luz (p. 2).

1.2.13. Variedades

La clasificación varietal del frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) responde a criterios múltiples de naturaleza agronómica, morfológica y comercial, los cuales permiten caracterizar y seleccionar materiales genéticos en función de las demandas del sistema productivo y los requerimientos del mercado. A continuación, se presentan los principales criterios de clasificación.

En primer lugar, según la **forma de consumo**, es posible distinguir variedades destinadas al consumo como grano seco (tipo alubia, canario, bayo, caraota, panamito, entre otros), como grano tierno o verde (en estado de madurez fisiológica), como vainas verdes (vainita) y como grano tostado o ñuña, que presenta la propiedad de reventar al ser sometido a calor (Camarena et al., 2020, p. 52). Esta diversidad de usos refleja la

amplia variabilidad genética de la especie y su capacidad de adaptación a distintos sistemas alimentarios. González-Román & Jaramillo-Trujillo (2024), en un artículo publicado en la revista Ciencias Agropecuarias (p. 5), destacan que esta diversidad tiene un papel estratégico en la soberanía alimentaria, particularmente en América Latina.

En segundo lugar, la clasificación por **duración del ciclo vegetativo** permite distinguir entre variedades precoces (Tipos I, II y IIIa), con ciclos de 70 a 120 días, y variedades tardías (Tipos IIIb, IVa y IVb), con ciclos que pueden superar los 270 días (Camarena et al., 2020, p. 53). Aybar-Peve et al. (2025) reportaron que, en las condiciones agroclimáticas del valle de Chíncha (Perú), las líneas evaluadas presentaron una correlación negativa significativa entre el peso de 100 granos y los días a madurez de cosecha ($r = -0.56$), lo que evidencia la existencia de compensaciones fisiológicas entre precocidad y tamaño de grano (p. 282).

En tercer lugar, la **reacción al fotoperíodo** constituye un criterio de clasificación de gran relevancia agronómica. El frijol es una planta de día corto (alrededor de 12 horas de luz), aunque se han desarrollado variedades con distinto grado de sensibilidad a este fenómeno. Denning-James et al. (2025) identificaron 10 QTL relacionados con la insensibilidad al fotoperíodo y constataron que este rasgo permite el cultivo de frijol a latitudes más altas y bajo condiciones de días largos, lo que amplía significativamente el rango de adaptación geográfica de la especie (p. 5). La insensibilidad al fotoperíodo fue uno de los rasgos seleccionados durante la domesticación del frijol, lo que explica la gran amplitud de adaptación de los cultivares modernos.

En cuarto lugar, las **características del grano** conforman el criterio de clasificación más relevante desde el punto de vista comercial. Se consideran el tamaño (pequeño, mediano, grande), la forma (redondo, ovalado, cuboide, arriñonado, truncado), el color (blanco, crema, amarillo, pardo, marrón, rosado, rojo, morado y negro) y la combinación de estos atributos en las clases comerciales. Sinkovič et al. (2024), en un estudio publicado en la revista Plants (p. 2), destacaron que la encuesta sobre hábitos de cultivo y características del grano reveló que los consumidores priorizan la ausencia de fibra en la vaina y la resistencia a plagas como criterios de selección, por encima del color o el tamaño del grano.

Entre las principales variedades cultivadas en el Perú se encuentran: Canario Centenario, Canario 2000 INIAA, Canario Centinela INIA, Canario Chinchano, Canario Molinero, Canario Barranquino, Canario CIFAC 90105, Blanco Molinero Alubia, Caballero Peruano, Blanco Larán, Larán Mejorado INIAA, Panamito Molinero, UNAGEMEM 1, Frijol Negro Caraota Molinero, UNAGEMEM 2, Rojo Molinero, Qosqo Poroto INIA, Ñuñas UNALM y Frijol Molinero UG-1 (Camarena et al., 2020, p. 56). En estudios recientes realizados por el INIA en el valle de Chíncha, las líneas Can D8120 y Arbolito destacaron como las más productivas, con rendimientos de 1,402.75 y 1,511.00 kg·ha⁻¹ respectivamente, lo que subraya la importancia de la evaluación continua de materiales genéticos en condiciones locales (Aybar-Peve et al., 2025, p. 283).

1.2.14. Fisiología del frijol

La fisiología del frijol común está determinada por la interacción entre el factor genético y el ambiente, siendo el ciclo vegetativo una expresión directa de dicha interacción. El factor genotípico establece el potencial de desarrollo de la planta, mientras que las condiciones ambientales “principalmente la temperatura, la humedad del suelo, la densidad de siembra y las características edáficas” modulan la expresión fenotípica de ese potencial (Espinoza, 2009, p. 33). Esta plasticidad fenotípica confiere al frijol una notable capacidad de adaptación a distintos agroecosistemas.

La germinación del frijol es un proceso estrechamente dependiente de la temperatura y la humedad del suelo. Temperaturas del suelo entre 18 y 30 °C favorecen una germinación rápida y homogénea, mientras que valores inferiores a 10 °C o superiores a 35 °C pueden comprometer la viabilidad del proceso. Cavalcante et al. (2020) en un estudio publicado en la revista *Annals of Applied Biology* (p. 4), determinaron mediante la escala BBCH que la germinación del frijol requiere una suma térmica específica, cuya acumulación es el principal regulador del tránsito entre las etapas fenológicas del cultivo.

Un aspecto fisiológico de especial relevancia para la agricultura sostenible es la capacidad del frijol de establecer una simbiosis efectiva con bacterias del género *Rhizobium*, particularmente con *Rhizobium phaseoli*, mediante la formación de nódulos radiculares donde se lleva a cabo la fijación biológica de nitrógeno atmosférico (FBN). Este proceso constituye un mecanismo ecológico y agronómico de primer orden, pues

reduce la dependencia del cultivo de fertilizantes nitrogenados de síntesis. Investigaciones recientes han demostrado que la inoculación con cepas nativas eficientes de *Rhizobium* mejora significativamente la nodulación, la actividad fotosintética y la productividad del frijol. En un ensayo publicado en BMC Plant Biology (Geleta et al., 2024, p. 2), se reportó que el empleo de cepas nativas de *Rhizobium* bajo condiciones de secano incrementó la eficiencia de la FBN en comparación con cepas no nativas, lo que confirma la relevancia de la adaptación local de los microorganismos simbióticos.

Adicionalmente, la actividad de la FBN está fuertemente modulada por las condiciones edafo-climáticas, especialmente la temperatura y el estado hídrico del suelo. Condiciones de estrés hídrico en etapas críticas del ciclo reducen la eficiencia de la nitrogenasa y, por ende, la provisión de nitrógeno a la planta, con repercusiones directas en el rendimiento. Así lo corroboran los resultados reportados por Aybar-Peve et al. (2025), quienes encontraron variaciones significativas en el comportamiento fenológico y productivo de líneas de frijol bajo las condiciones agroclimáticas del valle de Chincha, evidenciando la sensibilidad del cultivo a las variaciones ambientales (p. 280).

1.2.15. Etapas del desarrollo de la planta

El ciclo biológico de la planta de frijol común se estructura en dos grandes fases sucesivas: la fase vegetativa y la fase reproductiva. Cada una de estas fases comprende etapas específicas que se suceden de manera ordenada, con inicio definido por un evento morfológico o fisiológico determinado. La duración de cada etapa está condicionada fundamentalmente por dos factores: el genotipo “que incluye el hábito de crecimiento y la precocidad de la variedad” y el ambiente “particularmente la temperatura y la disponibilidad de luz, cuyo aumento generalizado tiende a acortar los ciclos vegetativos” (Camarena et al., 2020, p. 61).

En la fase vegetativa se incluyen las etapas de germinación, emergencia, desarrollo de hojas primarias y expansión de los primeros nudos trifoliados. Cavalcante et al. (2020), mediante la aplicación de la escala BBCH en cultivares de hábito Tipo II y Tipo III, determinaron con precisión la suma de grados-día acumulados en cada etapa vegetativa y reproductiva (p. 6). Este enfoque ha permitido modelar el desarrollo del cultivo en función de variables térmicas, lo que facilita la toma de decisiones agronómicas en diferentes ambientes de producción.

La fase reproductiva comprende las etapas de prefloración, floración, formación de vainas, llenado de vainas, madurez fisiológica y madurez de cosecha. La transición de la fase vegetativa a la reproductiva está influenciada por la interacción entre el genotipo y el fotoperíodo, siendo esta dependencia más pronunciada en cultivares de hábito indeterminado. Al respecto, Denning-James et al. (2025) constataron que los días a floración presentaron distribuciones bimodales según la longitud del día, con valores que oscilaron entre 42 y 54 días en condiciones de días largos, y entre 70 y 90 días bajo días cortos, evidenciando el peso del fotoperíodo en la regulación del inicio de la fase reproductiva (p. 6).

Por su parte, el estrés hídrico durante la transición vegetativa-reproductiva puede alterar significativamente el número de días a floración, dependiendo del potencial genético de cada variedad para tolerar o escapar de dicho estrés. Investigaciones publicadas en BMC Plant Biology (Geleta et al., 2024, p. 4) reportaron que distintas variedades de frijol respondieron de manera diferencial a niveles variables de humedad del suelo durante la inducción floral, corroborando la complejidad de las interacciones genotipo-ambiente en la regulación del desarrollo fenológico.

Finalmente, es importante destacar que la correcta identificación y caracterización de las etapas fenológicas del frijol representa un insumo técnico fundamental para optimizar las prácticas agronómicas “como la fertilización, el riego, el control fitosanitario y la cosecha” en coherencia con los estadios de desarrollo del cultivo. La integración de herramientas como la escala BBCH y los modelos de sumas térmicas en los sistemas de monitoreo y planificación agrícola contribuye significativamente a mejorar la eficiencia productiva y la adaptación del cultivo frente a la variabilidad climática creciente.

1.2.16. Factores ambientales que inciden en la producción

a. Temperatura

El frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) es una especie leguminosa de ciclo anual con amplia distribución geográfica; sin embargo, su productividad se encuentra estrechamente condicionada por las variaciones térmicas del entorno. La investigación científica reciente ha demostrado que el estrés por calor representa una de las amenazas más severas para este cultivo, especialmente en el contexto del cambio climático global.

En este sentido, Vargas et al. (2021) realizaron una caracterización fisiológica y genética del efecto del estrés térmico en una población de líneas recombinantes endogámicas de *P. vulgaris*, concluyendo que las temperaturas elevadas afectan múltiples procesos reproductivos, desde la inducción floral hasta la calidad del grano, lo que reduce significativamente los componentes del rendimiento, incluidos el número de vainas por planta y el peso de semilla. Estos autores señalan que el estrés térmico es un factor abiótico de primer orden que limita la productividad del cultivo, especialmente en regiones tropicales donde se prevé un incremento sostenido de las temperaturas (p. 3).

En una investigación más reciente llevada a cabo en Costa Rica bajo condiciones de trópico húmedo, Diédhiou et al. (2025) evaluaron la respuesta de dos variedades locales de frijol ante el incremento pasivo de temperatura mediante cámaras de tope abierto (OTC). Los resultados indicaron que el estrés calórico redujo el rendimiento de grano en más del 80% “de 0,15 a 0,03 t ha⁻¹” y disminuyó de forma significativa el índice de cosecha, confirmando la extrema vulnerabilidad reproductiva del cultivo ante aumentos moderados de temperatura del orden de 2,29 °C en la temperatura máxima diaria (p. 1). Estos hallazgos refuerzan la necesidad de considerar rangos térmicos precisos para el manejo agronómico del cultivo.

Por su parte, Prado-García et al. (2025) identificaron genotipos de frijol común tolerantes al estrés combinado de sequía terminal y alta temperatura, evaluando 100 genotipos bajo tres condiciones ambientales contrastantes en las que la temperatura natural superó los 35 °C durante la etapa reproductiva. Los autores encontraron que la respuesta a estreses múltiples es más compleja que la suma de respuestas individuales, y que la selección de genotipos con mecanismos adaptativos diferenciados constituye una estrategia prioritaria para la seguridad alimentaria en escenarios de cambio climático (p. 1).

La evidencia científica contemporánea confirma que las temperaturas óptimas para el desarrollo del cultivo de frijol se sitúan entre 18 y 24 °C, que las temperaturas inferiores a 13 °C retrasan el crecimiento y la germinación, y que las temperaturas nocturnas elevadas, superiores a 25–28 °C, provocan la abscisión de flores, el llenado deficiente de vainas y la reducción drástica del rendimiento. Asimismo, los cultivares de grano negro y rojo muestran diferente comportamiento según el rango térmico

predominante, aspecto que debe orientar la selección varietal en función de la zona de producción.

b. Humedad

La disponibilidad hídrica es un factor determinante en la productividad del frijol común, dado que las plantas son altamente sensibles tanto al déficit como al exceso de agua, con respuestas que varían según la etapa fenológica en que se presentan dichas condiciones.

Investigaciones recientes han profundizado en los mecanismos fisiológicos que subyacen a la tolerancia a la sequía en *P. vulgaris*. En particular, Belal et al. (2025) evaluaron el efecto de bioestimulantes novedosos sobre la tolerancia al estrés hídrico en condiciones de riego deficitario al 60% de la evapotranspiración del cultivo (ETc), demostrando que el tratamiento con lixiviado de boniato deshidratado al 4% incrementó significativamente la eficiencia fotosintética, el contenido relativo de agua foliar, los niveles de osmoprotectores y la actividad antioxidante, así como el rendimiento en vaina verde bajo condiciones de déficit hídrico (p. 5). Este estudio, publicado en *Botanical Studies*, pone de manifiesto la importancia de estrategias de manejo que reduzcan el impacto de la sequía sin incrementar los costos de producción.

Complementariamente, Zamani et al. (2024) aplicaron inoculación con *Bacillus velezensis* combinada con ácido acetilsalicílico en condiciones de riego pleno (100% ETc) y riego deficitario (70% ETc), obteniendo el mayor rendimiento de grano bajo riego pleno con el tratamiento combinado (3.270 kg ha⁻¹), equivalente a un incremento del 56% respecto al control. Bajo riego deficitario, el mismo tratamiento incrementó el rendimiento aproximadamente en un 30%, evidenciando que las rizobacterias promotoras del crecimiento y los inductores de resistencia pueden mitigar sustancialmente los efectos negativos de la sequía sobre *P. vulgaris* (p. 3).

Desde una perspectiva agronómica general, Guerrero-Domínguez et al. (2023) analizaron el comportamiento de plantas de frijol común sometidas a dos regímenes de riego, determinando que la reducción de la disponibilidad hídrica desde el inicio de la floración y la formación de vainas disminuye el crecimiento vegetativo, el rendimiento de semilla y la eficiencia en el uso del agua. Los autores enfatizan que el índice de área

foliar es una variable de alta sensibilidad al déficit hídrico y que su reducción compromete la absorción de la radiación solar, la fotosíntesis y, en última instancia, la producción de materia seca (p. 6).

En términos cuantitativos, la literatura científica señala que el frijol requiere entre 400 y 700 mm de lámina de agua bien distribuida durante su ciclo vegetativo, siendo las etapas de floración y llenado de grano las de mayor sensibilidad al déficit hídrico. Una condición de humedad del suelo en torno al 70% de la capacidad de campo se considera óptima para el crecimiento radicular y la fijación biológica de nitrógeno. Tanto el encharcamiento como la sequía prolongada tienen efectos negativos sobre la producción, debiendo evitarse riegos abundantes que saturen el perfil del suelo y favorezcan el desarrollo de patógenos radiculares.

c. Luminosidad

La luz solar constituye uno de los recursos fundamentales para el crecimiento y desarrollo del frijol, al ser el insumo energético primario del proceso fotosintético. La eficiencia con que la planta intercepta y utiliza la radiación fotosintéticamente activa (RFA) determina en gran medida la productividad del cultivo.

El frijol común requiere aproximadamente 12 horas de luz diaria para completar su ciclo de crecimiento de forma normal, aunque existen cultivares mejorados genéticamente con insensibilidad al fotoperíodo que se adaptan satisfactoriamente a condiciones de días más largos. El índice de área foliar (IAF) “definido como la relación entre el área total de hojas y la superficie del suelo que ocupa el cultivo” es un indicador de referencia para conocer la capacidad fotosintética disponible. Una arquitectura foliar adecuada evita el auto-sombreado de las hojas inferiores y maximiza la captación de la RFA.

En el contexto del manejo agronómico, los sistemas de producción en monocultivo con densidades de siembra apropiadas favorecen la distribución uniforme de la luz en el dosel, mientras que los sistemas asociados o de alta densidad pueden inducir competencia intraespecífica por radiación, afectando negativamente el rendimiento de vainas y granos. Asimismo, Jaleta et al. (2025) en un experimento de parcela dividida en condiciones de trópico subhúmedo caliente en Etiopía, demostraron que tanto el cultivar

como la tasa de fertilización nitrogenada-fosfórica afectaron significativamente el índice de área foliar (IAF) de *P. vulgaris*, lo que refuerza la interacción entre el manejo nutricional y la capacidad de la planta para aprovechar la radiación solar disponible (p. 4).

La mayoría de los cultivares andinos y mesoamericanos que se cultivan en las serranías de México, América Central y los Andes son sensibles a fotoperíodos largos y altas temperaturas, por lo que no podrían completar su ciclo reproductivo bajo dichas condiciones. Esta particularidad debe tenerse en cuenta al seleccionar variedades para zonas con marcada variación estacional de la longitud del día.

d. Suelo

Las propiedades físicas y químicas del suelo condicionan el desarrollo radicular, la absorción de agua y nutrientes, y la capacidad de albergar microorganismos benéficos que favorecen la nutrición de la planta. El frijol se adapta a una amplia gama de suelos; no obstante, exhibe mejores resultados en suelos franco-arenosos, bien drenados, profundos y con adecuado contenido de materia orgánica.

El pH óptimo para el cultivo de *P. vulgaris* se sitúa entre 5,5 y 7,0. Valores inferiores a 5,0 pueden inducir toxicidad por aluminio y manganeso, afectando el sistema radicular y la nodulación simbiótica, mientras que valores superiores a 7,5 limitan la disponibilidad de micronutrientes como el hierro y el zinc. El frijol es altamente susceptible a la salinidad del suelo, especialmente cuando esta se expresa en forma de cloruro sódico, lo que reduce el potencial osmótico de la solución del suelo y restringe la absorción hídrica por las raíces.

Desde el punto de vista nutricional, Rivero-Herrada et al. (2020) evaluaron la influencia de diferentes sistemas agroecológicos sobre los indicadores químicos de suelos cultivados con frijol en México, concluyendo que el sistema de producción tiene una repercusión importante en el estado nutricional del suelo, especialmente en las variables pH, materia orgánica y disponibilidad de fósforo, calcio y magnesio. El sistema de siembra directa con incorporación de plantas de cobertura favoreció la conservación de nutrientes y la actividad microbiana del suelo en comparación con la preparación convencional (p. 735).

En cuanto a los requerimientos nutricionales del cultivo, se estima que un cultivo de frijol de 100 a 120 días con un rendimiento de 2.500 kg ha⁻¹ extrae del suelo entre 60 y 80 kg de nitrógeno y aproximadamente 40 kg ha⁻¹ de fósforo. La fertilización nitrogenada debe aplicarse con moderación, dado que el exceso puede incrementar el desarrollo vegetativo a expensas del rendimiento en grano y predisponer a la planta al ataque de plagas y enfermedades. La respuesta al fósforo suele ser positiva en la mayoría de los suelos agrícolas; mientras que la respuesta al potasio varía según el contenido preexistente en el suelo.

1.2.17. Sanidad del cultivo

a. Malezas

Las malezas representan uno de los principales factores bióticos que limitan la productividad del cultivo de frijol, debido a la competencia que ejercen por luz, agua y nutrientes durante las etapas críticas del desarrollo. A diferencia de cereales como el maíz o el sorgo, el frijol exhibe un crecimiento inicial lento que lo hace particularmente vulnerable a la interferencia de especies arvenses.

McKenzie-Gopsill et al. (2020) investigaron el efecto de la duración de la presencia de malezas sobre la eficiencia fotosintética y el rendimiento de *P. vulgaris* L. bajo condiciones de campo en Canadá, demostrando que la presencia de malezas indujo la respuesta de evasión de sombra “mediada por cambios en la relación rojo:rojo lejano de la luz reflejada” y redujo significativamente la eficiencia del fotosistema II. Los autores concluyeron que períodos de convivencia con malezas superiores a tres semanas después de la emergencia comprometían de forma irreversible la recuperación fotosintética y el rendimiento final del cultivo (p. 5).

Estudios previos en contextos mediterráneos e italianos han establecido que la interferencia de malezas durante toda la temporada puede reducir el rendimiento en vaina de hasta 60–65% en frijol verde (*P. vulgaris*), y que el período crítico de control de malezas (PCCM) en esta especie varía entre los 20 y los 68 días después de la emergencia (considerando un umbral de pérdida de rendimiento aceptable del 5%). Este umbral implica que las labores de control de malezas deben iniciarse como máximo en la tercera semana después de la emergencia y mantenerse al menos hasta las cinco o seis semanas siguientes, para garantizar el máximo rendimiento del cultivo.

Las malezas más frecuentes en el cultivo del frijol en condiciones de costa y valles interandinos comprenden especies de los géneros *Cyperus* spp. (coquito), *Amaranthus* spp., *Bidens pilosa* (amor seco), *Sorghum halepense* (grama china) y *Solanum nigrum* (hierba mora), entre otras. El control integrado de malezas “que combina medidas culturales, mecánicas y, cuando es estrictamente necesario, el uso de herbicidas selectivos” constituye la estrategia más sostenible y eficaz para minimizar las pérdidas de rendimiento sin comprometer la salud del suelo y del agroecosistema.

b. Plagas

Las plagas de insectos representan una amenaza permanente para la producción de frijol, con pérdidas económicas que varían en función de las condiciones climáticas, la variedad cultivada, la época de siembra y el manejo agronómico aplicado. En general, los daños más severos se registran en condiciones de alta temperatura y baja altitud, como ocurre en los valles costeros del Perú.

La cigarrita verde (*Empoasca kraemeri* Ross & Moore) es considerada la plaga picadora-chupadora de mayor importancia en el frijol en el Perú y en toda Latinoamérica. Li et al. (2023) realizaron un estudio de dinámica poblacional de plagas y enemigos naturales en diferentes cultivares de frijol, determinando que factores climáticos como la temperatura y la humedad relativa se correlacionan significativamente con las densidades poblacionales de insectos plaga clave, lo que subraya la necesidad de implementar monitoreos continuos articulados con las condiciones meteorológicas locales (p. 2). *Empoasca kraemeri* se alimenta succionando la savia de las hojas durante todo el período vegetativo, ocasionando amarillamiento de sus bordes (síntoma conocido como “hopperburn”) y deformación de vainas. En condiciones de alta temperatura y sequía, sus poblaciones aumentan de forma considerable y pueden ocasionar pérdidas totales de la cosecha.

Entre las plagas de importancia secundaria pero de impacto creciente destacan: el barrenador de brotes (*Epinotia aporema* Wals.), cuyas larvas atacan durante todo el período del cultivo dañando brotes, flores y vainas, deteniendo el crecimiento de la planta; el barrenador de vainas (*Laspeyresia leguminis* Busck), cuyos estados larvales perforan las vainas verdes y se alimentan directamente de los granos; la mosca minadora (*Liriomyza huidobrensis* Blanchard), que produce galerías en el parénquima foliar

reduciendo la actividad fotosintética; y los gusanos cortadores (*Feltia experta*, *Agrotis ypsilon*, *Spodoptera frugiperda*), que atacan el cuello de las plántulas recién emergidas generando focos de daño en el campo.

El manejo integrado de plagas (MIP) constituye la estrategia más recomendada para controlar estos organismos nocivos, articulando el monitoreo sistemático, el uso de umbrales económicos de daño, la selección de variedades resistentes o tolerantes, las prácticas culturales que reducen la presión de plagas (rotación de cultivos, fechas de siembra adecuadas, buena preparación del suelo) y el empleo racional de insecticidas selectivos cuando los niveles poblacionales superan los umbrales establecidos.

c. Enfermedades

Las enfermedades del cultivo de frijol son causadas por agentes patógenos de diversa naturaleza hongos, bacterias, virus y nematodos, cuya incidencia y severidad dependen de las condiciones ambientales, las prácticas de manejo y la susceptibilidad del material genético utilizado.

Enfermedades fúngicas. La roya del frijol, causada por *Uromyces appendiculatus* (Pers.) Unger, es una de las enfermedades de mayor impacto económico en la producción mundial de frijol. Tsegaye et al. (2024) realizaron un estudio de campo en el sur de Etiopía que reveló que el 90% de los campos de frijol evaluados presentaban infección por *U. appendiculatus*, con incidencias medias de hasta 59,2% y severidades superiores al 35%, lo que evidencia el potencial destructivo de este patógeno en condiciones ambientales favorables “temperaturas entre 17 y 25 °C con humedad relativa superior al 95%” (p. 3). El patógeno se disemina con extraordinaria eficiencia a través del viento, lo que le permite colonizar rápidamente campos adyacentes. En variedades susceptibles, los ataques iniciados antes de la floración pueden ocasionar pérdidas de rendimiento superiores al 40%.

Makhumbila et al. (2025) profundizaron en la respuesta molecular de *P. vulgaris* a la infección por *U. appendiculatus* mediante secuenciación de ARN (RNA-seq), identificando genes de respuesta al estrés “proteínas de choque térmico, quinasas tipo receptor e hidroxilasas del citocromo P450” que se expresan diferencialmente en

variedades susceptibles y resistentes. Estos hallazgos contribuyen al desarrollo de marcadores moleculares para la selección asistida de genotipos resistentes a la roya (p. 8).

Las pudriciones radiculares, causadas principalmente por *Fusarium solani* f. sp. *phaseoli*, *Rhizoctonia solani* y *Pythium* spp., constituyen otro complejo patogénico de gran relevancia, especialmente en suelos con problemas de drenaje, siembras profundas o antecedentes de monocultivo continuo. Estos hongos producen la pudrición de la raíz y el tallo de las plántulas recién emergidas, ocasionando su muerte y la formación de focos de campo que reducen el stand de plantas. La pudrición gris (*Botrytis* sp.) afecta preferentemente a las vainas en contacto con el suelo, siendo más frecuente en condiciones de alta humedad y temperaturas frescas.

Enfermedades bacterianas. La marchitez bacteriana común (*Xanthomonas campestris* pv. *phaseoli*) es la enfermedad bacterial más importante del frijol a nivel mundial, afecta todos los órganos aéreos de la planta y puede transmitirse a través de la semilla. En cultivares susceptibles puede ocasionar pérdidas de rendimiento superiores al 40%.

Enfermedades virales. El virus del mosaico común del frijol (BCMV) es de distribución amplia y se transmite principalmente por áfidos de manera no persistente. Las variedades resistentes constituyen la herramienta de manejo más efectiva y económicamente viable frente a esta enfermedad.

Nematodos. Los nematodos del nudo de la raíz (*Meloidogyne* spp., especialmente *M. incognita*) causan daños significativos en el sistema radicular, formando agallas o abultamientos que limitan la capacidad de la planta para absorber agua y nutrientes. Los síntomas incluyen amarillamiento foliar con quemado de los bordes y raquitismo general de las plantas. *Meloidogyne incognita* es la especie de mayor distribución en la costa peruana, lo que requiere especial atención en la selección de suelos para el cultivo y en la rotación de cultivos.

1.2.18. Frijol canario

a. Características agronómicas

El frijol canario (*Phaseolus vulgaris* L.) es la variedad de mayor importancia comercial en la costa peruana, reconocida por su grano de color amarillo intenso y su amplia aceptación en los mercados nacionales e internacionales. Según la información técnica del Instituto Nacional de Innovación Agraria [INIA] (2004), sus principales características agronómicas son las siguientes:

- Hábito de crecimiento : Arbusto determinado (tipo I b)
- Altura promedio de planta : 54 cm
- Color de alas de la flor : Lila claro
- Días a la floración : 50
- Días a la madurez fisiológica : 90
- Días a la cosecha : 125
- Color de grano : Amarillo intenso
- Tamaño de grano : Grande
- Peso promedio de 100 semillas : 54 g
- Número de granos por vaina : 4
- Rendimiento promedio : 1.500 – 2.000 kg ha⁻¹ de grano seco
- Rendimiento máximo alcanzado : 2.595 kg ha⁻¹
- Aceptación comercial : Muy buena
- N° de cromosomas : 2n = 2x = 22

b. Reacción a enfermedades y plagas

Agente biótico	: Reacción
Virus del mosaico común (BCMV)	: Resistente
Roya (<i>Uromyces appendiculatus</i>)	: Resistente
Nematodos del nudo de la raíz (<i>Meloidogyne</i> spp.)	: Susceptible
Mosca minadora (<i>Liriomyza huidobrensis</i>)	: Tolerante

c. Adaptación

La variedad frijol canario se adapta a los valles de la costa subtropical y a los valles interandinos de temperatura moderada del Perú. Las épocas de siembra principal corresponden a los meses de marzo a junio en la costa, y a septiembre-octubre en los valles interandinos.

d. Manejo del cultivo

Suelo. Se recomienda seleccionar suelos franco-arenosos, sin problemas de salinidad ni de infestación por nematodos, con buena preparación previa y humedad adecuada al momento de la siembra.

Sistema de siembra. En monocultivo, se siembra en surcos simples a 0,70–0,80 m entre sí, o en hileras pares con 0,40 m entre hileras y 0,80 m entre pares de hileras.

Densidad de siembra. Se utilizan 15 a 20 semillas por metro lineal en siembra mecanizada, y 3 semillas por golpe cada 20 cm en siembra manual, con una cantidad de 100 kg ha⁻¹ y 80 kg ha⁻¹, respectivamente.

e. Fertilización

Prevía la realización de un análisis de suelo, la fórmula promedio recomendada es de 60–80–20 kg ha⁻¹ de N–P₂O₅–K₂O, aplicada a la siembra o a más tardar a los 15 días después de la misma.

f. Riegos

Se recomiendan de 3 a 5 riegos ligeros a intervalos de aproximadamente 20 días. Es fundamental evitar el riego en la etapa de plena floración, pues provoca caída de flores. Los riegos no deben ser abundantes ni pesados, ya que causan amarillamiento y muerte de plantas por asfixia radicular y favorecen el desarrollo de pudriciones.

g. Cultivos y deshierbes

La primera labor de cultivo debe realizarse después del primer riego. El campo debe mantenerse libre de malezas durante al menos los primeros 45 días, período que coincide con la etapa de mayor sensibilidad del cultivo a la competencia arvense. Deben evitarse las labores de cultivo y deshierbe durante la floración, para no ocasionar daños mecánicos que reduzcan el cuajado de vainas.

h. Cosecha y trilla

La cosecha se realiza cuando la mayoría de las vainas han comenzado a secarse. Las plantas se arrancan y se llevan a una era o se dejan en el campo por algunos días para acelerar el secado. La trilla puede realizarse de forma manual o mecánica con trilladora o tractor.

1.2.19. Frijol castilla – Frijol caupí (*Vigna unguiculata* L. Walp.)

a. Características Agronómicas

El frijol castilla o caupí (*Vigna unguiculata* L. Walp.) es una leguminosa de grano de gran importancia nutricional y agronómica, reconocida por su elevada tolerancia a condiciones de calor y sequía en comparación con otras especies de leguminosas de grano. De acuerdo con la información técnica del Instituto Nacional de Innovación Agraria [INIA] (2007) sus principales características agronómicas son:

- Hábito de crecimiento : Arbustivo (tipo II b)
- Altura promedio de planta : 80–90 cm
- Color de alas de la flor : Blanco liláceo
- Días a la floración : 40–45
- Color de grano : Crema con hilum negro
- Tamaño de grano : Mediano
- Peso promedio de 100 semillas : 20–22 g
- Número de granos por vaina : 12
- Número de vainas por planta : 12–14
- Rendimiento comercial : 2.000 kg ha⁻¹
- Rendimiento potencial : 2.500–2.800 kg ha⁻¹
- Período vegetativo en verano : 75–85 días
- Período vegetativo en invierno : 105–120 días
- Reacción a enfermedades : Susceptible a oídio
- N° de cromosomas : 2n = 2x = 22

Desde el punto de vista nutricional y farmacológico, Sardar et al. (2024) revisaron de forma exhaustiva el potencial terapéutico y nutritivo de *V. unguiculata*, destacando su riqueza en proteínas, carbohidratos complejos, minerales como el hierro y el zinc, vitaminas del grupo B y compuestos fitoquímicos de acción antioxidante. Los autores concluyen que el caupí representa un cultivo estratégico para la seguridad alimentaria y la nutrición de poblaciones vulnerables en países en desarrollo, justificando la inversión en investigación para mejorar su manejo agronómico y su productividad (p. 4).

b. Adaptación

El frijol castilla se adapta principalmente a los valles de la costa norte del Perú (La Libertad, Lambayeque y Piura) y también a la selva alta y baja. En Tumbes y Piura

se puede sembrar durante todo el año; en Lambayeque y La Libertad, los mejores resultados se obtienen entre octubre y marzo.

c. Manejo del cultivo

Suelo. El caupí prefiere suelos de textura franco-arenosa con materia orgánica. La conductividad eléctrica no debe superar los 2 mmhos cm^{-1} y los suelos deben estar bien drenados.

Sistema de siembra. Puede cultivarse en monocultivo, en rotación con otros cultivos “con precaución ante *Rhizoctonia solani* y *Fusarium* sp. cuando rota con arroz” o asociado con frutales u otros cultivos.

Densidad y modalidad de siembra. Se recomienda una densidad de 250.000 plantas ha^{-1} . En surcos simples: distancia entre surcos 0,60 m, distancia entre golpes 0,20 m y 3 plantas por golpe. En surcos dobles o mellizos: distancia entre líneas de siembra 0,40–0,45 m, distancia entre pares de líneas 0,80–0,90 m y 3 semillas por golpe. En siembra mecanizada se utilizan 20–25 semillas por metro lineal, con un consumo promedio de 50 kg de semilla ha^{-1} .

d. Fertilización

De acuerdo con el análisis de suelo, se recomienda aplicar por hectárea: 60 kg de urea (o 133 kg de sulfato de amonio), 87 kg de fosfato diamónico y 120 kg de sulfato de potasio (o 270 kg de sulfomag). El 100% de los fertilizantes debe aplicarse a la siembra o dentro de los primeros 10 días posteriores.

e. Riegos

Los riegos deben planificarse en función de la textura del suelo. Se recomienda sembrar con humedad adecuada y aplicar un riego ligero posterior para facilitar la disolución y aprovechamiento de los fertilizantes. Dos riegos son indispensables: uno antes de la floración y otro para el llenado del grano. La cantidad de agua con riego por gravedad alcanza los 4.000 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ por campaña, reduciéndose a aproximadamente 3.000 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ con riego por goteo.

f. Deshierbo

Se realiza preferentemente durante los primeros 30 días del cultivo, de forma manual o mediante el pase de cultivadora. Esta etapa coincide con el período de mayor

sensibilidad del caupí a la competencia de malezas, por lo que la oportunidad del control es determinante para preservar el rendimiento.

g. Plagas

En orden de importancia económica, las principales plagas del frijol castilla son:

- Cigarrita (*Empoasca* spp.)
- Mosca blanca (*Bemisia tabaci*)
- Barrenador de brotes (*Epinotia aporema*)
- Barrenador de vainas (*Laspeyresia leguminis*)
- Mosca minadora (*Liriomyza huidobrensis*)
- Gorgojos (*Zabrotes subfasciatus*)
- Comedores de hoja (*Diabrotica decolor*, *Cerotoma fascialis*)
- Gusano picador (*Elasmopalpus lignosellus*)

h. Enfermedades

En orden de importancia, las principales enfermedades del frijol castilla son:

- Oídium (*Erysiphe polygoni*)
- Pudriciones radiculares (*Rhizoctonia solani*, *Fusarium* sp., *Phyium* sp.)

i. Cosecha

La cosecha se realiza cuando el 90% de las vainas están secas. Se procede entonces a arrancar las plantas e iniciar la labor de azote, venteo y ensacado del grano.

1.2.20. Fertilización

Desde una perspectiva integral, Xing & Wang (2024) señalan que las tecnologías de aplicación precisa de agua y fertilizantes han emergido como innovaciones cruciales para la agricultura sostenible, ya que permiten adecuar la provisión de nutrientes a los requerimientos específicos del suelo y el cultivo, evitando el desperdicio, la lixiviación y la acidificación edáfica que acompañan a las prácticas convencionales de fertilización excesiva (p. 3). En este sentido, la fertilización racional no solo incrementa el rendimiento por unidad de superficie, sino que también mejora la calidad del producto cosechado, reduce los costos de producción por unidad de fertilizante aplicado y maximiza el beneficio económico global de la explotación agrícola.

Complementariamente, Adzawla et al. (2024) evaluaron la eficiencia de uso de fertilizantes y la viabilidad económica en sistemas de producción de maíz en Ghana, demostrando que el incremento en el uso de fertilizantes se justifica plenamente cuando la respuesta del rendimiento, la eficiencia de uso y la viabilidad económica son elevadas. Los autores concluyen que la optimización de las dosis de fertilizantes permite alcanzar rendimientos sosteniblemente altos, siempre que se integre con el conocimiento del potencial productivo del suelo y con las condiciones climáticas locales (p. 2). Estas consideraciones son igualmente aplicables al cultivo del frijol, donde la fertilización balanceada determina en gran medida la expresión del potencial genético de la variedad y la eficiencia global del sistema productivo.

a. Importancia del nitrógeno

Ostria-Gallardo et al. (2024) destacan en su revisión editorial sobre el metabolismo del nitrógeno en cultivos que este macronutriente influye en una vasta gama de procesos fisiológicos, moleculares y metabólicos, desempeñando un papel determinante en el crecimiento vegetal, el rendimiento de los cultivos y la sostenibilidad ambiental. Señalan, además, que el uso excesivo o ineficiente de los fertilizantes nitrogenados ha generado preocupaciones por la degradación ambiental, incluyendo la acidificación del suelo y la lixiviación del nitrógeno hacia los cuerpos de agua superficiales y subterráneos (p. 1). Esta advertencia subraya la necesidad de gestionar el nitrógeno no solo como un insumo productivo, sino también como un elemento con implicaciones ecológicas de primer orden.

Desde el punto de vista estructural y funcional, el nitrógeno es un componente fundamental de los aminoácidos “unidades constitutivas de las proteínas”, de los ácidos nucleicos (ADN y ARN) que gobiernan la expresión genética y la síntesis proteica, de la molécula de clorofila que convierte la energía lumínica en energía química durante la fotosíntesis, y de las coenzimas NAD y NADP que participan activamente en los procesos de oxidación-reducción del metabolismo energético. Asimismo, el nitrógeno se encuentra en purinas y pirimidinas, que constituyen la base estructural de los ácidos nucleicos, y en los anillos de porfirina presentes en las clorofilas y en los citocromos del sistema de transporte de electrones.

En línea con lo anterior, Javed et al. (2022) señalan que el nitrógeno incrementa el área foliar y el índice de área foliar (IAF), promoviendo la síntesis de proteínas involucradas en el desarrollo y proliferación celular, así como en el desarrollo de la pared celular y el citoesqueleto. Además, a través de su papel en la molécula de clorofila, el nitrógeno permite a la planta absorber la energía solar mediante la fotosíntesis, combustible fundamental del crecimiento vegetal y de la acumulación de biomasa (p. 3).

Por su parte, Akhtar et al. (2024) profundizan en los aspectos moleculares del metabolismo del nitrógeno en plantas, indicando que estas absorben el nitrógeno predominantemente en forma de nitrato (NO_3^-), el cual es posteriormente asimilado en aminoácidos mediante las enzimas glutamina sintetasa (GS), nitrato reductasa (NR), glutamato deshidrogenasa (GDH) y glutamato sintasa (GOGAT). Estos aminoácidos constituyen la materia prima para la síntesis de proteínas, que a su vez se convierten en los principales constituyentes de la biomasa vegetal a través de procesos de clasificación, modificación, transporte y almacenamiento (p. 4).

En el suelo, el nitrógeno se encuentra bajo dos grandes formas: el nitrógeno orgánico “mayoritario, ligado a la materia orgánica del suelo y no directamente asimilable por las plantas” y el nitrógeno inorgánico, que incluye el ion amonio (NH_4^+), adsorbido sobre los coloides del suelo, y los iones nitrato (NO_3^-) y nitrito (NO_2^-), que se encuentran libres en la solución del suelo y representan las formas directamente absorbibles por las raíces. Aunque el nitrógeno inorgánico representa apenas el 2% del nitrógeno total del suelo, su importancia agrícola es fundamental, pues es precisamente el nitrógeno absorbido por las plantas en las etapas de mayor demanda fisiológica.

La deficiencia de nitrógeno en los cultivos se manifiesta de manera característica mediante una clorosis progresiva que se inicia en las hojas más viejas y avanza hacia las más jóvenes, como resultado de la movilización del nitrógeno desde los tejidos senescentes hacia los meristemos activos. Esta sintomatología refleja la alta movilidad del nitrógeno en el floema y su protagonismo en la determinación del rendimiento de los cultivos. Por ello, el nitrógeno aplicado como fertilizante produce, en términos generales, la mayor respuesta en términos de incremento del rendimiento, siendo el elemento cuya gestión precisa mayores cuidados en cuanto a la forma, dosis, momento y método de aplicación.

b. Importancia del fósforo

Liu (2021) señala en una revisión publicada en el *Journal of Integrative Plant Biology* que el fósforo es un macronutriente esencial para el crecimiento y desarrollo radicular de las plantas, y que la arquitectura del sistema radicular afecta decisivamente la capacidad de la planta para obtener fosfato “la forma predominante de fósforo asimilable por las raíces” del suelo. La deficiencia de fósforo induce respuestas adaptativas en la arquitectura radicular, como el incremento de la longitud y densidad de los pelos absorbentes, la proliferación de raíces laterales y la exudación de ácidos orgánicos y fosfatasas que solubilizan el fósforo inorgánico retenido en los coloides del suelo (p. 2).

Desde el punto de vista bioquímico, el fósforo es un componente estructural de los ácidos nucleicos (ADN y ARN), los fosfolípidos de membrana, las coenzimas NAD y NADP, y “de manera especialmente relevante” el adenosín trifosfato (ATP), la molécula universal del intercambio energético en la célula viva. El ATP participa activamente en la fotosíntesis, la glucólisis, la respiración celular, la síntesis de ácidos grasos y numerosas otras rutas metabólicas. Wang et al. (2021) enfatizan que el potasio y el fósforo son macronutrientes esenciales para el crecimiento, el desarrollo y el rendimiento de los cultivos, y que sus mecanismos de transporte y señalización en la planta están estrechamente interconectados, siendo ambos absorbidos principalmente por las raíces y redistribuidos mediante sistemas de transportadores específicos de membrana (p. 3).

En los tejidos meristemáticos, donde ocurre el crecimiento activo por división celular, se encuentran las mayores concentraciones de fósforo, cuya presencia resulta indispensable para la síntesis de nucleoproteínas y el correcto desarrollo del ciclo celular. Asimismo, los fosfolípidos son constituyentes esenciales de las membranas celulares, donde regulan la selectividad en el transporte de iones y moléculas entre el interior y el exterior celular. Esta dualidad estructural y funcional confiere al fósforo un carácter insustituible en la fisiología vegetal.

Las plantas absorben el fósforo principalmente en forma de fosfato monoácido (H_2PO_4^-) en condiciones de pH neutro a ligeramente ácido, y como fosfato diácido (HPO_4^{2-}) en suelos de reacción alcalina. En suelos con exceso de calcio (suelos calizos)

o de hierro y aluminio (suelos ácidos), el fósforo tiende a precipitar formando compuestos insolubles, lo que reduce drásticamente su disponibilidad para las raíces. Esta fijación del fósforo en el suelo es una de las principales causas de su baja eficiencia de uso, que en condiciones no gestionadas puede ser inferior al 20% del fósforo aplicado como fertilizante.

La deficiencia de fósforo provoca un desarrollo débil tanto del sistema radicular como de la parte aérea, con hojas de menor tamaño, retraso en la madurez del fruto y reducción del rendimiento de la cosecha. En algunos cultivos, la deficiencia severa de fósforo se manifiesta por una coloración morada o purpúrea en hojas y tallos, como resultado de la acumulación de antocianinas en respuesta al impedimento de la síntesis de azúcares que requieren fósforo para su movilización. Dado que el fósforo es relativamente inmóvil en la planta “a diferencia del nitrógeno”, la deficiencia se manifiesta preferentemente en los órganos más jóvenes, aunque en condiciones severas puede observarse en toda la planta.

c. Importancia del potasio

Islam et al. (2025) señalan que el potasio es un macronutriente esencial con papeles significativos en la osmorregulación, la regulación del potencial de membrana, el cotransporte de azúcares, la adaptación al estrés y el crecimiento vegetal. La regulación estomática mediada por el potasio es quizás su función fisiológica más conocida: la apertura de los estomas depende del flujo de iones K^+ hacia las células guarda, incrementando su presión de turgencia y permitiendo el intercambio gaseoso necesario para la fotosíntesis y la transpiración (p. 4).

Wang et al. (2021) destacan que el potasio participa en más de 60 reacciones enzimáticas dentro del sistema vegetal, actuando como activador e incluso como componente estructural de numerosas enzimas relacionadas con el metabolismo de carbohidratos, la síntesis de proteínas y la fijación fotosintética del carbono. La deficiencia de potasio reduce la actividad fotosintética neta “al comprometer la apertura estomática y la síntesis de ATP en los cloroplastos” y repercute negativamente sobre la translocación de fotoasimilados desde las hojas fuente hacia los órganos de almacenamiento (p. 5).

Desde el punto de vista agronómico, el potasio ejerce un conjunto de funciones que afectan directamente la productividad y la calidad de los cultivos. En primer lugar, interviene activamente en la fotosíntesis, favoreciendo la síntesis de glúcidos en la hoja y su posterior acumulación en los órganos de reserva. En segundo lugar, participa en la formación de proteínas, lo que justifica la necesidad de un abonado potásico equilibrado para maximizar la eficiencia del fertilizante nitrogenado. En tercer lugar, reduce la transpiración al regular el cierre estomático, lo que mejora la eficiencia en el uso del agua y confiere mayor resistencia a la sequía. Asimismo, el potasio eleva el contenido en elementos minerales de la savia, incrementando la resistencia de las plantas a las heladas. Finalmente, en combinación con el fósforo, favorece el desarrollo radicular y aumenta la consistencia de los tejidos, mejorando la resistencia mecánica de los tallos.

Las plantas con nutrición potásica deficiente son generalmente más susceptibles al ataque de plagas y enfermedades, dado que el potasio es necesario para el mantenimiento de la integridad de las membranas celulares y para la síntesis de compuestos de defensa. La carencia de potasio se manifiesta externamente por el tono verde oscuro de las hojas, seguido de una decoloración bronceada en los bordes foliares que progresa hacia la necrosis, comenzando por las hojas más viejas dada la alta movilidad del potasio en el floema.

d. Importancia de la materia orgánica

Kačergius et al. (2025) señalan en su revisión sobre la salud del suelo que la materia orgánica es la base de la vida microbiana en el suelo: los microorganismos no solo se nutren de ella sino que también establecen relaciones simbióticas con las plantas que favorecen la absorción de nutrientes y aumentan la resistencia vegetal ante condiciones adversas. Además, los autores destacan que la actividad microbiana promueve la acumulación de carbono orgánico en el suelo, y que algunos microorganismos contribuyen aproximadamente el 46% a la formación de la materia orgánica del suelo a través de su necromasa (p. 3). Estas afirmaciones evidencian que la gestión de la materia orgánica y la de la microbiota del suelo son dimensiones inseparables de cualquier estrategia de fertilidad sostenible.

d.1. En las propiedades físicas

Kumar et al. (2025) demostraron que las prácticas de agricultura de conservación “que incluyen la incorporación de residuos de cultivo y la siembra directa” pueden incrementar el contenido de materia orgánica del suelo entre un 50% y un 56% en relación con la labranza convencional, mejorando la estabilidad estructural de los agregados del suelo, la actividad enzimática y el estado de micronutrientes en el perfil edáfico (p. 5). Estos resultados corroboran que la materia orgánica incrementa la capacidad de retención de agua del suelo “actuando como una esponja de alta capacidad de absorción”, lo que reduce la vulnerabilidad de los cultivos ante períodos de sequía y optimiza el aprovechamiento del agua de riego.

Asimismo, la materia orgánica otorga color oscuro al suelo, lo que favorece la absorción de energía solar y eleva la temperatura superficial, acelerando la germinación de las semillas y el crecimiento inicial de las plántulas. El color oscuro es, por lo tanto, un indicador fenotípico de alta fertilidad biológica del suelo.

d.2. En las propiedades químicas

Desde el punto de vista químico, la materia orgánica desempeña funciones de extraordinaria relevancia para la nutrición mineral de las plantas. En primer lugar, incrementa la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo, lo que amplía la reserva de nutrientes disponibles para las raíces al retener cationes como NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} sobre su superficie cargada negativamente, reduciendo su pérdida por lixiviación.

Balík et al. (2025) en un estudio de larga duración sobre los efectos de diferentes fertilizaciones orgánicas y minerales en suelos agrícolas de Luvisol, demostraron que el contenido y la calidad de la materia orgánica del suelo son los fundamentos de la fertilidad edáfica y contribuyen de manera significativa al secuestro de carbono en el suelo. Sus resultados muestran que la aplicación continuada de enmiendas orgánicas mejora tanto la cantidad como la calidad de la materia orgánica, con efectos positivos sobre las propiedades de tampón del suelo y la capacidad de regulación del pH (p. 4). El poder tampón de la materia orgánica “es decir, su capacidad para resistir cambios bruscos de pH” protege a las plantas de los trastornos que generarían variaciones abruptas en la reacción del suelo.

d.3. En las propiedades biológicas

Xu et al. (2024) demostraron que la eficiencia de uso del carbono por los microorganismos del suelo es positivamente correlacionada con la acumulación de carbono orgánico, y que suelos con altos contenidos de materia orgánica albergan comunidades microbianas más diversas, activas y funcionalmente eficientes. Según Xu et al. (2024) las estrategias de vida microbiana y la dinámica poblacional de los microorganismos activos son factores determinantes de la eficiencia de uso del carbono en el suelo, con implicaciones directas para la formación y estabilización de la materia orgánica (p. 6).

La materia orgánica también actúa como fuente o activadora de compuestos de crecimiento vegetal, como ácidos húmicos y fúlvicos, que estimulan directamente el metabolismo de la planta al mejorar la absorción de nutrientes a través de la membrana celular de las raicillas. Se ha documentado que en presencia de humus las plantas pueden absorber de una solución nutritiva mayor cantidad de elementos fertilizantes que en su ausencia, lo que confirma el efecto potenciador de la materia orgánica sobre la eficiencia de la fertilización mineral.

1.2.21. Guano de las islas

Agrorural (2022) señala que el guano se extrae de 22 islas y 8 puntas del litoral peruano, administradas bajo criterios de aprovechamiento racional y sostenible, con periodos de recuperación no menores a cinco años entre cada extracción. Dicha característica lo posiciona no solo como un recurso de alto valor agronómico, sino también como un insumo renovable coherente con los principios de la agricultura sostenible.

La formación del guano de las islas responde a una conjunción precisa de condiciones geológicas, climáticas y biológicas. Según Britannica Editors (2025) las aves marinas predominantes en la producción de este fertilizante son los cormoranes, pelícanos y piqueros, cuya alimentación basada en anchoveta (*Engraulis ringens*) les permite acumular elevados niveles de nitrógeno y fósforo en sus excrementos. La intersección de la Corriente de Humboldt con la Corriente Ecuatorial propicia una excepcional concentración de biomasa marina en las costas peruanas y del norte de Chile, lo cual sostiene poblaciones densas de aves guaneras. La aridez extrema de la región costera

impide la lixiviación de nutrientes, favoreciendo la acumulación de capas que pueden superar los 30 metros de espesor. Bajo estas condiciones, la actividad microbiana transforma paulatinamente las macromoléculas orgánicas en compuestos más simples y asimilables, a través de reacciones de oxidación y mineralización que liberan nutrientes en formas iónicas disponibles para las plantas (Schnug et al., 2018, p. 4).

a. Propiedades del guano de las islas

Las propiedades del guano de las islas han sido objeto de investigación sistemática en las últimas décadas, evidenciándose que su valor agronómico supera al de la mayoría de los fertilizantes orgánicos convencionales. Agrorural (2022) destaca que se trata de un fertilizante natural y completo que contiene todos los macronutrientes y micronutrientes indispensables para el desarrollo vegetal, siendo además un producto ecológico que no contamina el ambiente y es completamente biodegradable. En este sentido, la investigación de Cosme et al. (2020) confirmó que la aplicación de guano de isla a dosis de 2110 kg ha^{-1} , fraccionada en un 75% a la siembra y un 25% al aporque, incrementó significativamente el rendimiento del cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en suelos degradados, alcanzando productividades de hasta $4,232 \text{ kg ha}^{-1}$ en la variedad INIA-433, valores notoriamente superiores a los obtenidos sin aplicación de este abono (p. 3).

En cuanto a sus propiedades físico-químicas y microbiológicas sobre el suelo, la literatura científica reciente es consistente en señalar que la incorporación de fertilizantes orgánicos, incluido el guano, mejora de manera integral la estructura del suelo. Cao et al. (2025) reportaron que los fertilizantes orgánicos incrementan la estabilidad de los agregados del suelo, promueven la clatización, reducen la pérdida de partículas de arcilla limosa y amplían la capacidad de intercambio catiónico (CIC) (p. 6). En paralelo, la revisión de Chen et al. (2025) indicó que la sustitución parcial de fertilizantes químicos por orgánicos reduce la densidad aparente del suelo, mejora la porosidad, aumenta la capacidad de retención de agua y regula el pH, generando condiciones edáficas favorables para la actividad microbiana y la absorción radicular de nutrientes. Estos hallazgos son consistentes con la propiedad sinérgica descrita por Agrorural (2022) validada ahora con mayor rigor experimental en condiciones de campo.

Desde el punto de vista de la actividad microbiológica, el guano de las islas aporta microorganismos benéficos que enriquecen la microflora del suelo. Geng et al. (2026) demostró que la fertilización orgánica incrementa significativamente la abundancia de bacterias del filo Pseudomonadota, involucradas en el metabolismo del carbono y el nitrógeno, así como de Myxococcota, asociadas al ciclaje del carbono y la transformación del nitrógeno. Asimismo, se observó un aumento en genes funcionales clave como el *gltB*, que codifica el glutamato sintasa, enzima central en la asimilación del nitrógeno orgánico. Esto confirma la antigua afirmación de que el guano confiere al suelo la propiedad de 'organismo vivo', actualizada ahora con evidencia molecular y metagenómica.

b. Contenido de nutrientes del guano de las islas

La composición química del guano de las islas lo distingue de otros fertilizantes orgánicos por su elevada concentración de macronutrientes esenciales. De acuerdo con Agrorural (2022), este insumo contiene nitrógeno (N) en concentraciones de 10 a 14%, fósforo (P_2O_5) entre 10 y 12%, y potasio (K_2O) de 2 a 3%, constituyendo una proporción NPK excepcionalmente balanceada para las necesidades de la mayoría de cultivos andinos. Estos rangos son corroborados por Britannica (2025), que reporta contenidos de N entre 11 y 16%, ácido fosfórico de 8 a 12% y potasa de 2 a 3% para el guano de aves marinas, siendo estos valores superiores a los del guano de murciélago y de foca.

En cuanto a los elementos secundarios, el guano de las islas aporta calcio (CaO) en torno al 8%, magnesio (MgO) aproximadamente 0.5% y azufre (S) alrededor de 1.5%. Adicionalmente, contiene micronutrientes en concentraciones de 20 a 320 ppm, entre los que destacan hierro, zinc, cobre, manganeso y boro (Agro Rural, 2018, p. 2). La presencia de esta diversidad de microelementos es especialmente relevante en suelos degradados o de alta altitud, donde las deficiencias de micronutrientes constituyen un factor limitante del rendimiento agrícola. De conformidad con lo señalado por Rutoms (2025) el guano de aves marinas contiene más del 40% de materia orgánica, lo que lo distingue como fuente de carbono orgánico adicional que favorece la agregación del suelo y la retención hídrica a largo plazo.

c. Disponibilidad de nutrientes del guano de las islas

La disponibilidad inmediata de nutrientes representa una de las ventajas comparativas más relevantes del guano de las islas frente a otros fertilizantes orgánicos. Según Agrorural (2018, p. 3), del nitrógeno total contenido en el guano, el 35% se encuentra en forma disponible: 33% como nitrógeno amoniacal (NH_4^+) y 2% como nitrógeno nítrico (NO_3^-), mientras que el 65% restante permanece en forma orgánica y continúa mineralizándose progresivamente durante el ciclo del cultivo. Con respecto al fósforo, el 56% es soluble en agua y se encuentra disponible para absorción inmediata, en tanto que el 44% restante se encuentra en forma orgánica.

Esta característica de liberación bifásica “una fracción de disponibilidad inmediata y otra de liberación lenta” ha sido confirmada y ampliada por investigaciones recientes. La investigación publicada en *Nutrient Cycling in Agroecosystems* (editado por Springer) determinó que el guano libera más del 90% de su contenido de nitrógeno a la solución acuosa en un periodo de 10 días, con una proporción del 85% en forma amoniacal ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), lo cual eleva el pH de la solución de 7.0 a valores superiores a 8.5. Este comportamiento fisicoquímico tiene implicaciones prácticas para el manejo del fertirriego en sistemas de riego tecnificado, especialmente en cultivos hortícolas y frutícolas. Asimismo, la fracción orgánica continúa la mineralización durante el desarrollo del cultivo, aportando nutrientes de manera sostenida y reduciendo la necesidad de aplicaciones adicionales.

La actividad de las bacterias nitrificantes “específicamente *Nitrosomonas*, que transforma el amonio en nitrito, y *Nitrobacter*, que oxida el nitrito a nitrato” constituye un componente esencial del ciclo del nitrógeno inducido por el guano. Geng et al. (2026) reportó que la fertilización orgánica aumenta la abundancia de genes relacionados con la desnitrificación (*norB*, *nosZ*) y la nitrificación, optimizando los flujos de nitrógeno en el sistema suelo-planta. Estas bacterias nitrificantes, presentes de manera natural en el guano de las islas, son las mismas que facilitan que el nitrógeno sea absorbido preferentemente en forma de nitrato (NO_3^-) por la mayoría de las especies cultivadas.

d. Tipos y recomendaciones de abonamiento con guano de las islas

Existe un único tipo de guano de las islas de origen natural, cuya composición puede variar en función de la especie de ave predominante, la isla de procedencia, la

antigüedad del depósito y las condiciones climáticas locales (Schnug et al., 2018, p. 7). A efectos prácticos, la variabilidad composicional implica que las dosis de aplicación deben ajustarse siempre a partir de los resultados de análisis de suelo y a los requerimientos nutricionales específicos de cada cultivo, siguiendo el principio de que la fórmula de abonamiento es función del grado de fertilidad del suelo, el requerimiento del cultivo, la producción esperada, la calidad de la semilla y las condiciones climáticas (Agrorural, 2018, p. 4).

Las dosis recomendadas para los principales cultivos de la sierra peruana oscilan entre 500 kg ha⁻¹ para cultivos de menor demanda nutricional, como frijol y cebada, hasta 1,500–1,700 kg ha⁻¹ para el cultivo de papa (*Solanum tuberosum*), siendo este último uno de los que mayores rendimientos exhibe ante la aplicación de este insumo. Cabe destacar que, al aplicar el 100% de la dosis recomendada de guano de las islas, se cubre la totalidad del requerimiento de nitrógeno y fósforo, mientras que el potasio requerido deberá complementarse con otra fuente mineral (Agrorural, 2018, p. 4). Este aspecto es de especial importancia para el diseño de planes de fertilización integrada en sistemas de producción orgánica y convencional.

Investigaciones recientes han validado el efecto sinérgico del guano con otros insumos orgánicos. El estudio de Parco-Quispe et al. (2022) evidenció que la aplicación de guano de isla en el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) en la selva central peruana contribuye a recuperar la fertilidad de suelos degradados por cosechas continuas sin restitución de nutrientes, señalando que 'los suelos fértiles mejoran el rendimiento de la cosecha e influyen directamente en los ingresos económicos de los agricultores' (p. 3).

1.2.22. Agroforestería

La agroforestería se define actualmente como un sistema de manejo sostenible de la tierra que integra componentes leñosos perennes (árboles, arbustos, palmas) con cultivos agrícolas y/o animales en un mismo espacio, generando interacciones ecológicas y económicas beneficiosas (Visser et al., 2024, p. 2). Esta definición actualizada supera las aproximaciones meramente descriptivas del pasado al enfatizar el carácter intencional de estas interacciones. En este sentido, investigaciones recientes han demostrado que los sistemas agroforestales potencian significativamente la actividad biológica del suelo y las funciones ecosistémicas asociadas, particularmente en regiones montañosas de América

Latina, donde se ha observado un incremento en la captura de carbono, la provisión de nutrientes y el control de la erosión en comparación con sistemas convencionales sin árboles (Visser et al., 2024, p. 5). Asimismo, estudios a escala global han identificado que estos sistemas albergan aproximadamente 1,180 especies arbóreas con usos documentados para el ser humano, lo que representa más de una décima parte de las especies leñosas aprovechadas a nivel mundial (Cook-patton et al., 2025, p. 2). Desde una perspectiva funcional, la agroforestería constituye una estrategia de adaptación climática que contribuye simultáneamente a la seguridad alimentaria, la conservación de la biodiversidad y el sustento de comunidades rurales, particularmente en ecosistemas vulnerables como los Andes y la Amazonía (Pauletto et al., 2025, p. 4).

1.2.23. Clasificación agroforestal

a. Sistemas, tecnologías y prácticas agroforestales

La clasificación agroforestal contemporánea mantiene una estructura jerárquica que diferencia tres niveles conceptuales: sistemas, tecnologías y prácticas, aunque con refinamientos metodológicos significativos incorporados desde la última década. Según Torquebiau & Balaguer (2022) persiste una diversidad terminológica entre instituciones a nivel global, lo que ha motivado esfuerzos hacia una estandarización clasificatoria.

b. Sistema agroforestal

Constituyen el nivel más amplio de clasificación y se definen como asociaciones donde coexisten componentes leñosos, no leñosos y animales en configuraciones espacio-temporales específicas. Investigaciones recientes en la Unión Europea han documentado que los sistemas silvopastoriles representan la tipología más extendida, cubriendo aproximadamente 119,100 km², lo que equivale al 29% del área agroforestal total del territorio europeo (Rubio-Delgado et al., 2025, p. 7). Por su parte, los sistemas silvoagrícolas y agrosilvopastoriles presentan distribuciones más localizadas, siendo predominantes en regiones mediterráneas y tropicales respectivamente. Un hallazgo relevante es que los sistemas agroforestales con elementos leñosos pequeños (setos, árboles en linderos, franjas riparias) ocupan 3.3 veces más superficie que los sistemas agroforestales comunes en Europa, lo que sugiere la necesidad de reconsiderar la importancia de estas configuraciones lineales en los inventarios nacionales (Rubio-Delgado et al., 2024, p. 3).

c. Tecnología agroforestal

Corresponden a arreglos específicos de componentes con disposiciones particulares en espacio y tiempo. Las investigaciones mediante teledetección han permitido identificar tres categorías principales de tecnologías agroforestales a escala global: cultivo en callejones (*alley cropping*), sistemas dispersos y setos o barreras vivas, con precisiones clasificatorias que alcanzan hasta el 81% de exactitud cuando son interpretadas por personal capacitado (Tahiri et al., 2025, p. 1). No obstante, persisten desafíos en la diferenciación entre cultivos en callejones y huertos frutales intensivos, así como entre sistemas dispersos y bosques naturales, lo que evidencia la necesidad de complementar la clasificación estructural con criterios funcionales y de manejo.

d. Práctica agroforestal

Constituyen el nivel más detallado de especificidad local. En este ámbito, investigaciones desarrolladas en la costa occidental de India han propuesto un sistema de codificación alfanumérica (ej. B1iii) que integra 78% de aceptación entre agricultores capacitados, facilitando la transferencia tecnológica y el monitoreo participativo (Deshmukh et al., 2025, p. 4). Este enfoque combina criterios estructurales (combinación árbol-cultivo-ganado), funcionales (tradicional versus único) y socioeconómicos (subsistencia versus mercado), demostrando la viabilidad de clasificaciones multidimensionales adaptadas a contextos locales.

1.2.24. Criterios de clasificación agroforestal

a. Criterio estructural

Este criterio analiza la naturaleza biológica de los componentes y su acomodo espacio-temporal. En cuanto a los **tipos de componentes**, investigaciones recientes han desarrollado herramientas como el *Agroforestry Species Switchboard*, que integra información de 107,269 especies vegetales con potencial para uso agroforestal, facilitando la selección de especies según características funcionales y adaptaciones ecofisiológicas (Kindt et al., 2025, p. 1). Esta base de datos global representa un avance significativo respecto a clasificaciones previas que se limitaban a categorías genéricas (leñosas, no leñosas, animales). En relación con el **acomodo espacial**, estudios mediante fotointerpretación de imágenes satelitales han demostrado que los arreglos zonales (filas, fajas) presentan mayor detectabilidad que los sistemas mezclados, con tasas de error de omisión tan bajas como 2% para setos, mientras que los sistemas dispersos alcanzan

errores de comisión de hasta 19% debido a confusión con árboles naturales (Tahiri et al., 2025, p. 2). El **acomodo temporal** ha sido refinado mediante análisis de dinámica de cambio de uso de suelo, documentando que los sistemas secuenciales y de relevo están disminuyendo en intensidad en Europa (tasa de pérdida de -36% entre 2012-2022), mientras que los sistemas simultáneos en huertos familiares se han expandido en 24% durante el mismo período (Rubio-Delgado et al., 2025, p. 5).

b. Criterio funcional

El criterio funcional distingue entre tecnologías agroforestales productivas (orientadas a bienes comercializables) y de servicios (enfocadas en funciones ecosistémicas). Investigaciones recientes en América Latina han cuantificado que los sistemas silvopastoriles incrementan la provisión de servicios ecosistémicos asociados al suelo en comparación con pastizales sin árboles, particularmente en términos de secuestro de carbono y provisión de nutrientes, aunque los sistemas forestales naturales proveen niveles aún superiores de biodiversidad y funciones ecológicas (Visscher et al., 2024, p. 6). En cuanto a la funcionalidad productiva, el meta-análisis revela que los rendimientos de cultivos en sistemas silvoagrícolas varían según el tipo de cultivo: mientras que café y cacao presentan rendimientos superiores bajo sombra, los cereales muestran respuestas variables dependiendo de condiciones climáticas y edáficas (Visscher et al., 2024, p. 7). Esta evidencia sugiere que la clasificación funcional debe incorporar especificidades de cultivo y contexto ecológico.

c. Criterio ambiental

El criterio ambiental evalúa el potencial de las tecnologías agroforestales para la conservación de recursos estratégicos. A escala de la Unión Europea, se han identificado áreas prioritarias para la introducción de sistemas agroforestales basadas en la acumulación de presiones ambientales: 30.4% de la superficie agrícola europea presenta alta concentración de presiones relacionadas con suelo, biodiversidad, agua y cambio climático, siendo Francia, España y Rumania los países con mayor superficie objetivo (Gabourel-Landaverde et al., 2025, p. 2). En el bioma amazónico, los sistemas agroforestales han demostrado contribuir a la conservación de la agrobiodiversidad, destacándose los huertos familiares como sistemas multifuncionales que albergan alta riqueza de especies y permiten experimentación continua con variedades locales (Pauletto et al., 2025, p. 5). Estos hallazgos confirman el valor de este criterio para planificar

intervenciones territoriales orientadas a la restauración ecológica y la adaptación climática.

d. Criterio socioeconómico

Este criterio clasifica las tecnologías agroforestales según su escala de operación y orientación de mercado, distinguiendo entre sistemas principalmente comerciales y principalmente campesinos. Investigaciones en la Amazonía indican que los sistemas comerciales (monocultivos forestales, sistemas intensivos de cultivo en callejones) tienden a presentar menor diversidad de especies que los sistemas campesinos, particularmente huertos familiares que integran hasta 25 especies por parcela y son manejados con mano de obra familiar (Pauletto et al., 2025, p. 6). La adopción de tecnologías agroforestales campesinas está influenciada por factores como disponibilidad de mano de obra, preferencias personales, demandas del mercado y, críticamente, el nivel educativo y género del agricultor principal (Pauletto et al., 2025, p. 7). En Europa, las regiones que enfrentan mayores desafíos socioeconómicos (bajos ingresos, envejecimiento poblacional, limitada capacitación agrícola) también presentan mayor acumulación de presiones ambientales, lo que sugiere la necesidad de políticas diferenciadas que aborden simultáneamente las dimensiones social y ecológica (Gabourel-Landaverde et al., 2025, p. 4).

1.2.25. Caracterización de tecnologías agroforestales

La caracterización agroforestal contemporánea integra métodos participativos y herramientas geoespaciales para describir las características biotécnicas y socioeconómicas de los sistemas en relación con condiciones locales y regionales. Investigaciones recientes han documentado que la caracterización debe abordar al menos cuatro dimensiones interrelacionadas: (1) composición y estructura, incluyendo inventarios de especies leñosas y no leñosas, densidades y arreglos espaciales; (2) funciones y servicios, evaluando tanto productos obtenidos (alimentos, leña, madera, forraje, medicinas) como servicios ecosistémicos (regulación hídrica, captura de carbono, conservación de suelos, hábitat para biodiversidad); (3) manejo y dinámica, documentando prácticas de establecimiento, poda, cosecha, incorporación de nutrientes y rotaciones; y (4) contexto socioeconómico y cultural, incluyendo tenencia de tierra, acceso a mercados, organización social, conocimientos tradicionales y género (Pauletto et al., 2025, p. 8).

Un avance metodológico significativo es el uso de bases de datos estandarizadas como LUCAS (Land Use/Cover Area Frame Survey) en la Unión Europea, que permite caracterizar y monitorear sistemáticamente la extensión, distribución y dinámica de tecnologías agroforestales a escala continental, diferenciando entre sistemas comunes (silvopastoriles, silvoagrícolas, agrosilvopastoriles) y sistemas asociados a elementos leñosos pequeños (setos, árboles en linderos, franjas riparias) (Rubio-Delgado et al., 2024, p. 5). Este enfoque ha revelado que, contrariamente a lo supuesto, los sistemas con elementos lineales ocupan mayor superficie que los sistemas agroforestales convencionales, lo que tiene implicaciones relevantes para políticas de incentivos y programas de monitoreo ambiental.

El estudio de Deshmukh et al. (2025) documentó que, tras un proceso de caracterización participativa con 252 agricultores en India, el 78% de los participantes logró utilizar un sistema de clasificación codificado para seleccionar tecnologías apropiadas según sus condiciones específicas de suelo, topografía, disponibilidad de agua y acceso a mercados, lo que resultó en incrementos significativos de productividad e ingresos en sistemas que recibieron acompañamiento institucional (p. 5). Esta evidencia subraya la importancia de procesos de caracterización que integren conocimientos locales con herramientas técnicas estandarizadas.

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

2.1. Ubicación del experimento

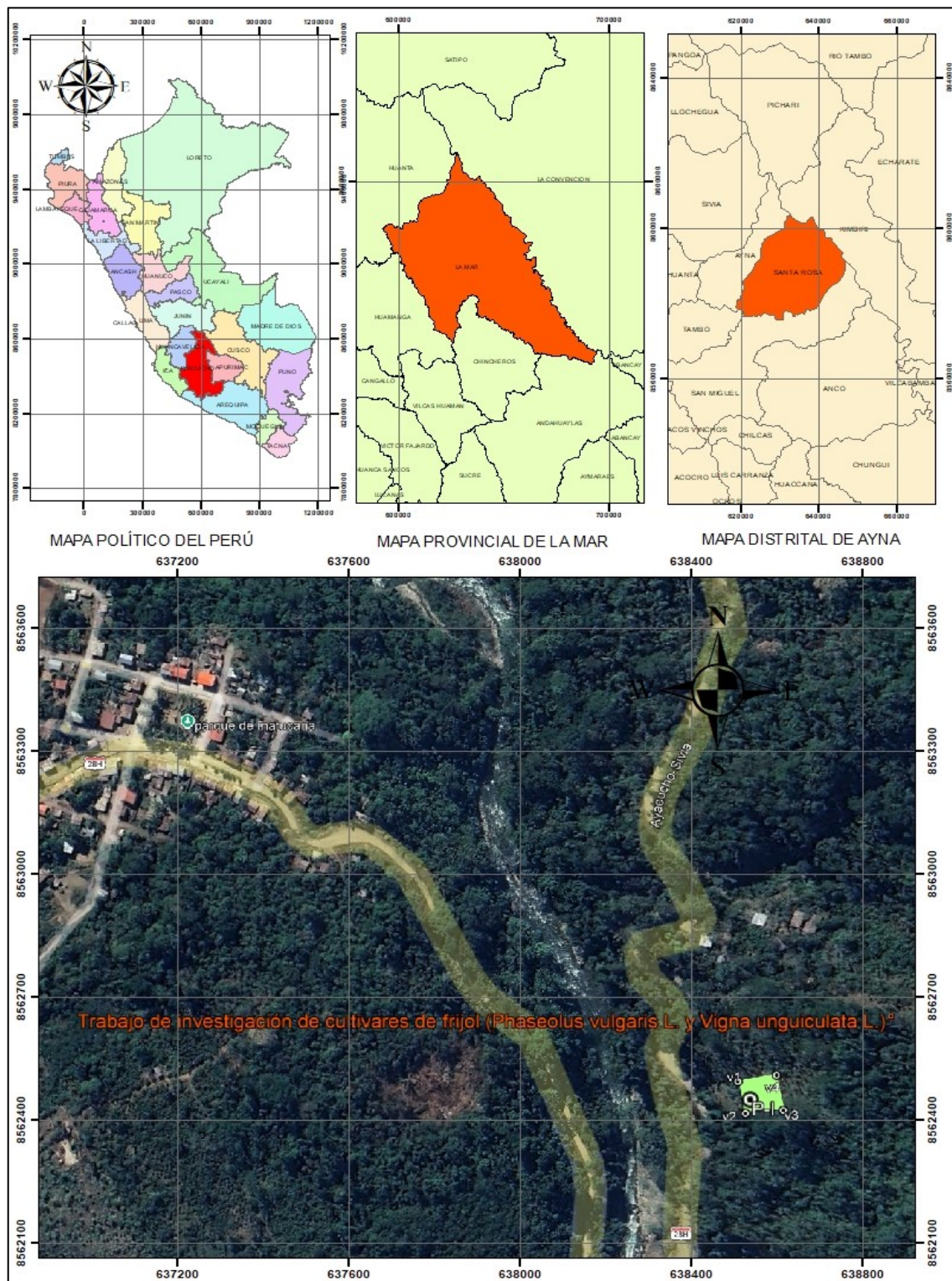
El desarrollo de la fase experimental se localizó en la localidad de Rosario, perteneciente al distrito de Ayna, provincia de La Mar, en la región de Ayacucho. Geográficamente, el área de investigación se sitúa a una altitud media de 590 m s. n. m., delimitada por las coordenadas UTM84-18S 625001.68 m E y 8605879.57 m S.

2.1.1. Ubicación ecológica

Desde una perspectiva macroecológica, la investigación se consolidó en el entorno de la selva tropical peruana. Bajo los criterios de clasificación jerárquica propuestos por Aragón & Chuspe (2018) la zona se adscribe al bioma de Bosques Húmedos Tropicales y Subtropicales de Hoja Ancha, situándose de forma específica dentro de la ecorregión de los Bosques Húmedos de la Amazonía Suroccidental (pp. 17-27). En esta línea, la localidad de Rosario se emplaza en una faja de transición ecológica y altitudinal de la selva alta, un sector clave del piedemonte andino-amazónico que converge elementos bióticos de las Yungas peruanas y de la vertiente oriental, propiciando escenarios de alta diversidad biológica (Aragón & Chuspe, 2018, pp. 20-67). Esta unidad bioclimática destaca por sus regímenes de alta humedad relativa y temperaturas cálidas estables, variables ambientales determinantes que regulan la respuesta fenológica y optimizan el rendimiento de los cultivos establecidos en esta región.

Figura 1

Ubicación política del trabajo de investigación – EPIAF-PICHARI



2.2. Antecedentes del terreno experimental

Antes del inicio de las actividades experimentales, el terreno de 1000 m² de extensión albergó una comunidad vegetal sucesional integrada por matorrales locales y

especies forestales con una alta densidad relativa de pinos. La adecuación fitosanitaria y estructural del predio demandó una fase inicial de limpieza mecánica-manual, en la cual se emplearon machetes para la eliminación del sotobosque. Acto seguido, se ejecutó el picado fino del material leñoso y herbáceo cortado, lo que aseguró la remoción de obstáculos físicos y permitió la correcta delimitación de las parcelas experimentales.

2.3. Características edáficas del terreno experimental

A fin de determinar las propiedades físico-químicas del área de estudio, se efectuó un muestreo edáfico representativo recolectando submuestras a una profundidad homogénea de 0.20 m mediante técnicas convencionales de campo. El volumen compuesto, con una masa aproximada de un kilogramo, se acondicionó y trasladó al Laboratorio de Análisis de Suelos y Aguas del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA - Perla del VRAEM). Dicha entidad analítica se encuentra emplazada en la localidad de Samaniato, dentro del distrito de Kimbiri, provincia de La Convención (Cusco), donde se procedió con la ejecución de los ensayos analíticos correspondientes.

Tabla 1

Análisis físico-químico de la muestra de suelo del predio de la localidad de Rosario-Ayna

Componentes	Valor	Interpretación
pH	6.2	Moderadamente ácido
M.O. (%)	8.40	Muy alto
N (%)	3.02	Muy alto
C.I.C. (Cmol(+).kg ⁻¹)	21.50	Alto
K disponible (mg/kg)	143.50	Medio
P disponible (mg/kg)	3.47	Bajo
Arena (%)	46	—
Limo (%)	35	Franco
Arcilla (%)	19	—

Fuente: Laboratorio del INIA-Perla del VRAEM, setiembre 2025.

2.4. Características climatológicas del lugar experimental

Los datos meteorológicos empleados en la presente investigación corresponden al año 2024 y fueron registrados por la Estación Meteorológica de San Francisco, ubicada en el distrito de Ayna, provincia de La Mar, región Ayacucho. Dichos registros fueron considerados como valores de referencia, dado que las condiciones climáticas

documentadas durante ese período presentaron características similares a las observadas en el año 2025, lo que permitió establecer una base técnica sólida y representativa para el análisis desarrollado en este estudio.

Tabla 2

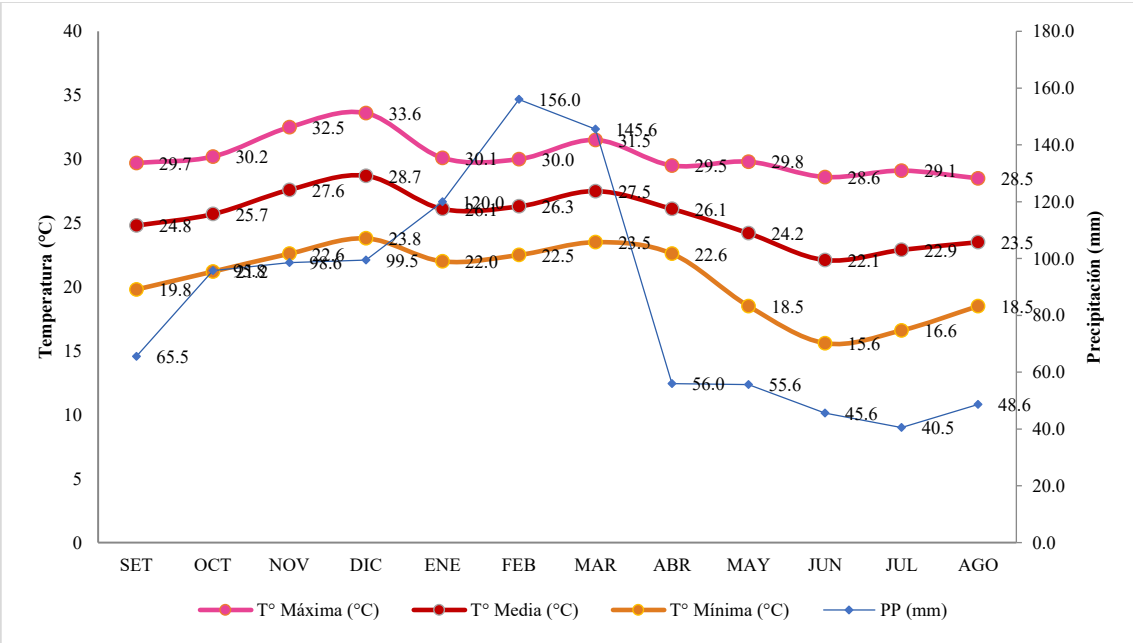
Datos climáticos de temperatura, máxima, mínima, media, precipitación y balance hídrico, campaña 2024. Estación meteorológica San Francisco – Ayacucho

AÑO	2024												Total	Prom
MESES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC		
T° Máx (°C)	30.1	30.0	31.5	29.5	29.8	28.6	29.1	28.5	29.7	30.2	32.5	33.6		30.3
T° Mín (°C)	22.0	22.5	23.5	22.6	18.5	15.6	16.6	18.5	19.8	21.2	22.6	23.8		20.6
T° Med (°C)	26.1	26.3	27.5	26.1	24.2	22.1	22.9	23.5	24.8	25.7	27.6	28.7		25.4
Factor	4.96	4.64	4.96	4.80	4.96	4.80	4.96	4.96	4.84	4.96	4.80	4.96		
ETP (mm)	129.2	121.8	136.4	125.0	119.8	106.1	113.3	116.6	119.8	127.5	132.2	142.4	1490.1	0.69
PP (mm)	120.0	156.0	145.6	56.0	55.6	45.6	40.5	48.6	65.5	95.8	98.6	99.5	1027.3	
ETP Ajust. (mm)	67.2	63.3	70.9	65.0	62.3	55.2	58.9	60.6	62.3	66.3	68.8	74.0		
H suelo (mm)	52.8	92.7	74.7	-9.0	-6.7	-9.6	-18.4	-12.0	3.2	29.5	29.8	25.5		
Déficit (mm)				-9.0	-6.7	-9.6	-18.4	-12.0						
Exceso (mm)	52.8	92.7	74.7						3.2	29.5	29.8	25.5		

Fuente: Estación Meteorológica de San Francisco, Ayna, La Mar, Ayacucho.

Figura 2

Diagrama Ombrotérmico de la temperatura vs precipitación correspondiente a la campaña agrícola 2024, registrado en la Estación Meteorológica San Francisco-Ayacucho



Fuente: Estación Meteorológica de San Francisco, Ayna, La Mar, Ayacucho.

Los registros climáticos obtenidos a lo largo del ciclo productivo del frijol, tal como se detalla en la Tabla 2 y figura 2 en el diagrama ombrotérmico, permitieron caracterizar con claridad las condiciones ambientales que prevalecieron durante el período experimental de setiembre a diciembre de 2025. En ese intervalo, los valores térmicos mostraron un comportamiento relativamente estable: la temperatura máxima promedio se situó en 30,3 °C, mientras que la temperatura media alcanzó los 25,4 °C y la mínima se mantuvo en torno a los 20,6 °C, condiciones que resultaron adecuadas para el desarrollo normal de los cultivares evaluados. Respecto a las lluvias, la precipitación acumulada a lo largo del período de estudio sumó 1 027,30 mm, aportando un volumen de agua considerablemente superior a las exigencias hídricas del cultivo. Esta situación quedó corroborada mediante el análisis del balance hídrico, el cual arrojó un excedente de humedad de 88 mm, evidenciando que las precipitaciones registradas superaron consistentemente el umbral de evapotranspiración potencial del suelo; ello se explicó, conforme al criterio ombrotérmico de Gaussen, por el hecho de que los valores mensuales de lluvia sobrepasaron en todo momento el doble de la temperatura media del mes correspondiente, lo que definió a los cuatro meses de la campaña agrícola como un período predominantemente húmedo y favorable para el establecimiento y crecimiento vegetativo del cultivo.

2.5. Factores en estudio

a) Cultivares de Frijol (c)

c₁: frijol Castilla (*Vigna unguiculata* L.)

c₂: frijol Canario (*Phaseolus vulgaris* L.)

b) Dosis de guano de isla (d)

d₀: 0 ton. ha⁻¹

d₁: 1.0 ton. ha⁻¹

d₂: 1.5 ton. ha⁻¹

d₃: 2.0 ton. ha⁻¹

d₄: 2.5 ton. ha⁻¹

2.6. Tratamientos de estudio

Los tratamientos de estudio fueron el resultado de la combinación de los dos factores en estudio (2 cultivares de frijol x 5 dosis de abonamiento con guano de las islas), haciendo un total de 10 tratamientos, los mismos que se presentan en la tabla 3.

Tabla 3*Tratamientos y combinaciones de los factores a estudiar*

Tratamientos	Código	Descripción
T1	d0 x c1	0 t ha ⁻¹ G.I. x frijol castilla
T2	d0 x c2	0 t ha ⁻¹ G.I. x frijol canario
T3	d1 x c1	1.0 t ha ⁻¹ G.I. x frijol castilla
T4	d1 x c2	1.0 t ha ⁻¹ G.I. x frijol canario
T5	d2 x c1	1.5 t ha ⁻¹ G.I. x frijol castilla
T6	d2 x c2	1.5 t ha ⁻¹ G.I. x frijol canario
T7	d3 x c1	2.0 t ha ⁻¹ G.I. x frijol castilla
T8	d3 x c2	2.0 t ha ⁻¹ G.I. x frijol canario
T9	d4 x c1	2.5 t ha ⁻¹ G.I. x frijol castilla
T10	d4 x c2	2.5 t ha ⁻¹ G.I. x frijol canario

2.7. Diseño experimental

El estudio fue conducido utilizando el Diseño de Bloque Completo Randomizado (DBCR) con arreglo factorial 2C*5D con tres repeticiones, haciendo un total de 30 unidades experimentales; siendo el Modelo Aditivo Lineal el siguiente:

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

Donde:

Y_{ijk} : Variable de respuesta de la i-ésima variedad, en el j-ésima densidad de plantas en el k-ésimo bloque.

μ : Media general

α_i : Efecto de la i-ésima cultivar de frijol

β_j : Efecto del j-ésima dosis de abonamiento

γ_k : Efecto del k-ésimo bloque

$(\alpha\beta)_{ij}$: Efecto de la interacción de la i-ésima cultivar de frijol en la j-ésima dosis de abonamiento

ε_{ijk} : Error experimental

2.8. Análisis estadístico

En base a los datos de campo obtenidos, se realizó un análisis correspondiente que incluye análisis de varianza (ANVA) y prueba de contraste de Tukey (0,05) para cada variable evaluado.

2.9. Características del campo experimental

a) Bloques

Número de bloques del experimento	: 03
Largo del bloque	: 50 m
Ancho de bloque	: 6.0 m
Área del bloque	: 300 m ²

b) Calles

Largo de calle	: 50 m
Ancho de calle	: 1.5 m
Número de calles principales	: 2

c) Unidad experimental

Número de parcelas por repetición	: 10
Largo de cada parcela	: 6 m
Ancho de parcela	: 3.2 m
Área de cada parcela	: 19.2 m ²
Número de surcos / parcela	: 4
Distancia entre surcos	: 0.80 m
Distancia entre golpes	: 0.20 m
Longitud del surco	: 6.0 m
Número de golpes por surco	: 30
Número de semillas por golpe	: 3

d) Área total del experimento

Área total de las calles principales	: 150 m ²
Área total de bloques	: 600 m ²
Área total del ensayo	: 750 m ²

2.10. Croquis experimental de los tratamientos

El croquis del campo experimental se presenta en la figura 3.

Figura 3

El croquis del campo experimental

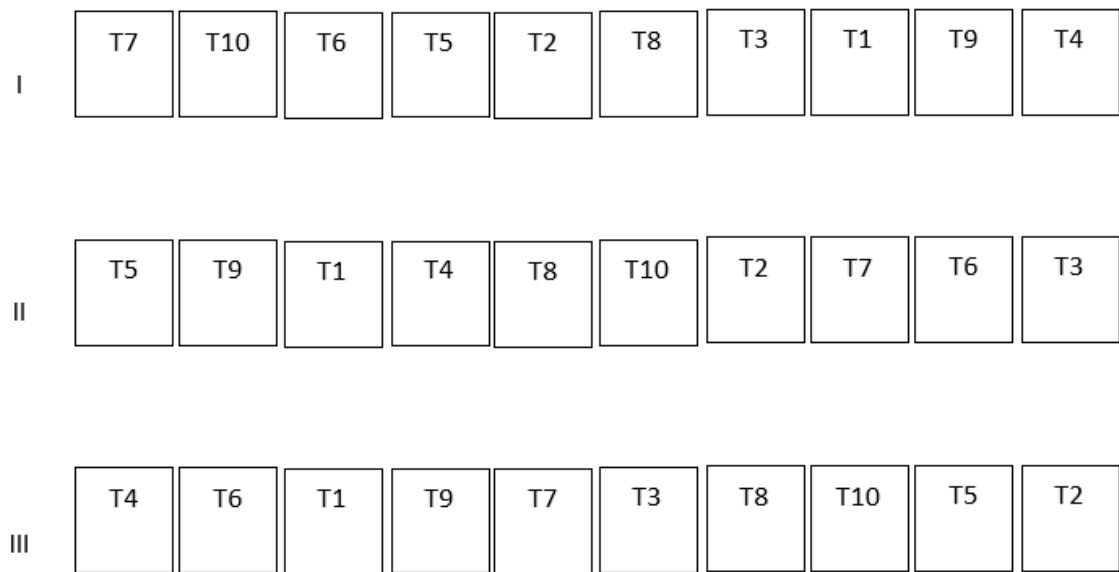
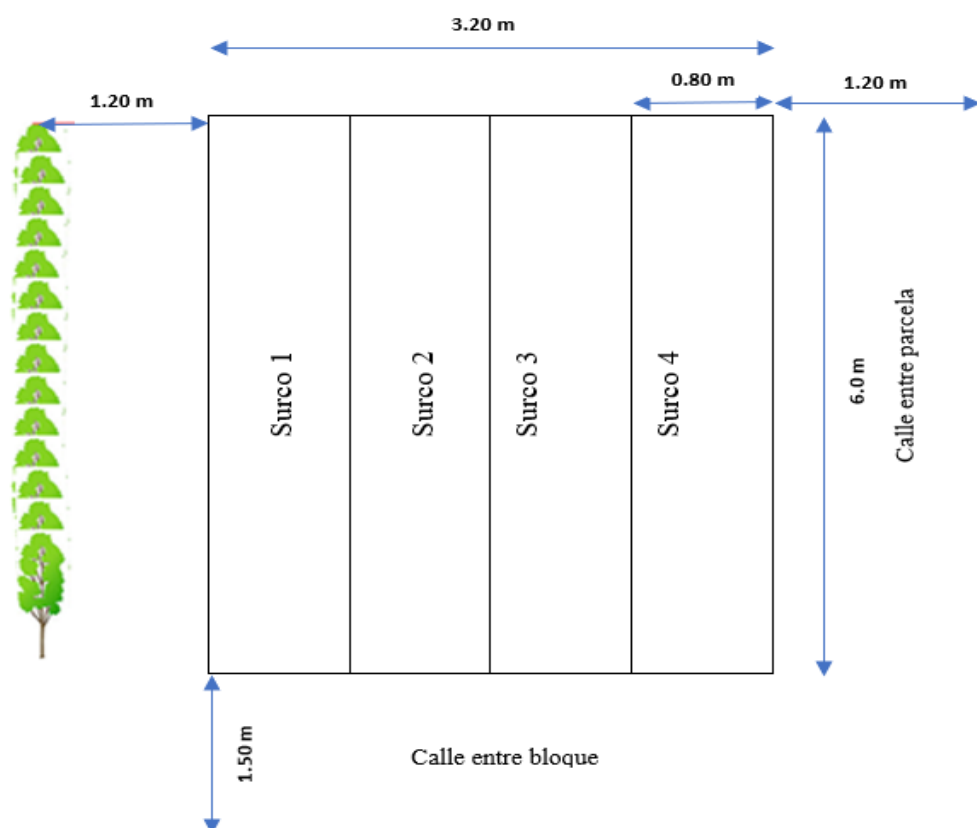


Figura 4

Croquis de la Unidad Experimental



2.11. Variables de evaluación

2.11.1. Variables de precocidad

Se realizó una evaluación de las fases del ciclo fenológico de los cultivares en análisis, desde la emergencia hasta la madurez de cosecha, expresados en número de días después de la siembra.

a) Días a la emergencia

Se evaluó el periodo de tiempo desde la siembra hasta que más del 50% de plántulas hayan emergido en la superficie del terreno experimental.

b) Días a la floración

Se consideró los días después de la siembra hasta que se observaron flores en más del 50% de las plantas sembradas en cada parcela experimental.

c) Días a la formación de vainas

Es el tiempo que transcurrió desde la siembra hasta la aparición de las primeras vainas en más del 50% de las plantas en cada parcela.

d) Días a la madurez de cosecha

Se consideró el período de días desde la siembra hasta que se verifique que más del 50 % de las vainas sean aptas para la cosecha, situación que sucede cuando estas vainas están bien estructuradas, sin restricciones claras entre las semillas, las cuales deben ser pequeñas e inmaduras.

2.11.2. Variables de rendimiento

Se eligió aleatoriamente 10 plantas en cada parcela, en las que se llevaron a cabo diversas evaluaciones programadas durante el proceso de investigación.

a) Altura de planta a la madurez fisiológica (cm)

Esta evaluación se realizó al momento de la de madurez fisiológica, para la cual se utilizó una cinta métrica, midiéndose desde el cuello de la planta hasta el ápice de la planta.

b) Número de vainas por planta (Nº. vainas / planta)

Se contabilizó el número de vainas, durante el proceso de cosecha en cada parcela, se eligieron 10 plantas representativas.

c) Longitud de vainas (cm)

Se evaluó en cada parcela durante la madurez fisiológica, para lo que se empleó un instrumento de medición (cinta métrica). Se tomaron un total de 10 vainas representativas de cada unidad experimental.

d) Número de semillas por vaina (Nº. granos / vaina)

Se registró el número de granos existentes de 10 vainas seleccionadas de forma aleatoria en cada una de las unidades experimentales. Después se calculó los promedios que se utilizaron como resultado.

e) Peso de 1000 semillas (g)

Se contabilizó 1000 semillas representativas para luego pesarlos utilizando una balanza de precisión.

f) Rendimiento (kg. ha⁻¹)

Se registró la cosecha de vainas en la etapa de madurez comercial de cada una de las unidades experimentales cosechadas en tres ocasiones, con el objetivo de conseguir la cosecha total de vainas por parcela, y posteriormente se extrapolar a una hectárea. expresado en kg. ha⁻¹.

2.12. Instalación y conducción del experimento

La instalación y su manejo se llevó a cabo considerando las distintas tareas agronómicas, enfocándose principalmente en la preparación del terreno, siembra, riego, desmalezado, aporque, control de plagas y enfermedades, según las necesidades del cultivo. Asimismo, se realizaron las evaluaciones pertinentes en el momento adecuado.

a) Limpieza de terreno

La actividad consistió en la eliminación de especies arbustivas, estos fueron reducidos en tamaño y llevados hacia el borde del área de trabajo planteado. Esta tarea se llevó a cabo el 01 y 02 de setiembre del 2025. Cabe señalar que al rededor del campo

experimental se mantuvo especies de pino radiata de aproximadamente 7 años para fines de ver su influencia en el trabajo en estudio.

b) Preparación de terreno

Tras la limpieza del campo, se llevó a cabo el preparado, rastrillado, surcado y la nivelación del campo, esta actividad se desarrolló el 03 y 04 de setiembre del 2025. Antes de esta preparación, se tomó la muestra de suelo, para fines de análisis y caracterizarlo adecuadamente.

c) Demarcación y estacado del terreno

Utilizando la cinta métrica, cordel y estacas se procedió a marcar el área por bloques y tratamientos en base al diseño experimental. Esta actividad se llevó a cabo el 05 y 06 de setiembre del 2025, días antes de la siembra.

d) Abonamiento

El abonamiento se realizó, a 20 dds, según los niveles de guano de isla, para ello se utilizó una balanza con precisión gramera. Siendo el único momento de abonamiento hasta la cosecha, actividad realizada el 29 de setiembre del 2025.

e) Desinfección de semillas

Se seleccionó las semillas considerando su tamaño, color uniforme, forma y la ausencia de daños por plagas y enfermedades. Luego, se llevó a cabo la desinfección el día 07 de setiembre del 2025, utilizando el fungicida Vitavax (Oxanthina + Dicarboximido), aplicando seis gramos por cada kilogramo de semilla.

f) Siembra

La siembra se realizó de manera manual el 08 de setiembre del 2025, colocando tres semillas por hoyo. La densidad de plantas en cada unidad experimental se ajustó de acuerdo con los tratamientos estudiados.

g) Raleo

La labor de cultivo se realizó cuando las plantas alcanzaron una altura de aproximadamente 15 a 20 cm. En esta etapa, se dejaron dos plantas por golpe, eliminando

las restantes para asegurar un crecimiento adecuado y optimizar el rendimiento del cultivo, dicha actividad se realizó el 17 de setiembre del 2025.

h) Riego

Se llevó a cabo el riego tras finalizar la siembra. La frecuencia y el tiempo de riego se ajustaron a la demanda del cultivo, así como por la contribución hídrica con el agua de lluvias ocasionales.

i) Control de malezas

El desmalezado se llevó a cabo de manera manual utilizando un azadón. El primer desmalezado a 30 dds, el segundo y tercer desmalezado a 45 y 70 dds.

j) Control fitosanitario

Para fines preventivos contra chupadera por *Fusarium*, *Phytium* o *Rhizoctonia*, en la emergencia de las plantas, se utilizó un fungicida agrícola Vitavax 300WP, en una concentración de 350 g por hectárea.

Durante el desarrollo y crecimiento del cultivo, se detectaron daños directos en las hojas del cultivo causados por masticadores de hoja, como *Diabrotica sp.* Siendo necesario controlarlo con un insecticida (Cyberklin 25 CE) con una dosificación de 250 ml/200L. Actividad realizada el 04 de octubre del 2025.

k) Aporque

Este trabajo se realizó a los 40 dds, con la finalidad de dar mejor sostenibilidad a las plantas y contribuir a su vigor, con la ayuda de un azadón. Actividad realizada el 18 de octubre del 2025.

l) Cosecha

La cosecha se llevó a cabo de manera progresiva y escalonada, conforme a la madurez de cosecha, según cultivar. Cabe señalar que el frijol castilla fue el primero en ser cosechado (10 y 12 de diciembre del 2025), luego de dos semanas el frijol canario (28 y 30 de diciembre del 2025).

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Variables de precocidad

Las variables fenológicas se evaluaron conforme a la escala de desarrollo del cultivo, expresando los datos en días después de la siembra (dds). Los tratamientos correspondieron a cinco niveles de guano de isla ($d_0 = 0$, $d_1 = 1.0$, $d_2 = 1.5$, $d_3 = 2.0$ y $d_4 = 2.5 \text{ t ha}^{-1}$) aplicados a dos cultivares: frijol castilla o caupí (*Vigna unguiculata* L.) y frijol canario (*Phaseolus vulgaris* L.), bajo las condiciones edafoclimáticas de la localidad de Ayna, a 590 msnm.

3.1.1. Días a la emergencia

Tabla 4

Emergencia (dds). Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm.

Bloque	Castilla (c1)					Canario (c2)				
	Niveles de guano de isla					Niveles de guano de isla				
	d0	d1	d2	d3	d4	d0	d1	d2	d3	d4
I	3	3	3	4	3	6	5	5	5	5
II	3	3	3	4	3	5	6	6	5	6
III	4	3	4	3	3	5	6	5	6	5
Sumatoria	10	9	10	11	9	16	17	16	16	16
Prom. d	3.33	3.00	3.33	3.67	3.00	5.33	5.67	5.33	5.33	5.33
Prom. c	3.27					5.40				

Nota. $d_0 = 0 \text{ t ha}^{-1}$; $d_1 = 1.0 \text{ t ha}^{-1}$; $d_2 = 1.5 \text{ t ha}^{-1}$; $d_3 = 2.0 \text{ t ha}^{-1}$; $d_4 = 2.5 \text{ t ha}^{-1}$ de guano de isla.

El período comprendido entre la siembra y la emergencia de plántulas varió entre 3.27 dds en el cultivar frijol Castilla y 5.40 dds en el cultivar frijol Canario. Las dosis de guano de isla no ejercieron influencia apreciable en esta variable, con rangos internos mínimos dentro de cada cultivar (c1: 3.00–3.67 dds; c2: 5.33–5.67 dds).

La mayor velocidad de emergencia de *V. unguiculata* (3.27 dds) refleja los rasgos fenotípicos de precocidad documentados por Paudel et al. (2021) en la colección mini-núcleo de caupí de la Universidad de California-Riverside, quienes, mediante un estudio de asociación del genoma completo (GWAS), identificaron variantes genéticas que modulan la respuesta fotoperiódica y la velocidad de germinación, determinando que los genotipos insensibles al fotoperiodo exhiben emergencia más temprana bajo temperaturas superiores a 24 °C. Murga-Orrillo et al. (2024) confirmaron que accesiones de *V. unguiculata* en la Amazonía peruana (Yurimaguas) registran ciclos vegetativos cortos, con rendimientos de 1.2 a 2.5 t ha⁻¹, atribuidos a la combinación de temperatura elevada y alta fertilidad natural del suelo. Para el cultivar Canario, González et al. (2021) demostraron que el control genético del período inicial del ciclo de *P. vulgaris* involucra múltiples QTL con interacciones epistáticas y ambientales, siendo la temperatura y el fotoperiodo los factores que principalmente determinan el período siembra-emergencia en cultivares de origen andino cultivados en pisos ecológicos de baja altitud.

3.1.2. Días a la floración

Tabla 5

Floración (dds). Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm

Bloque	Castilla (c1)					Canario (c2)				
	Niveles de guano de isla					Niveles de guano de isla				
	d0	d1	d2	d3	d4	d0	d1	d2	d3	d4
I	35	35	35	35	35	47	44	45	44	44
II	34	36	34	36	36	46	47	46	47	47
III	35	36	35	35	34	44	44	44	46	45
Sumatoria	104	107	104	106	105	137	135	135	137	136
Prom. d	34.67	35.67	34.67	35.33	35.00	45.67	45.00	45.00	45.67	45.33
Prom. c	35.07					45.33				

Nota. La variación interbloque en c2 (Canario) fue levemente mayor, indicando sensibilidad fotoperiódica de la especie bajo las condiciones del ensayo.

La floración se produjo entre los 35.07 dds (Castilla) y los 45.33 dds (Canario). Las dosis de guano de isla no modificaron sustancialmente esta variable, con variaciones reducidas dentro de cada cultivar (c1: 34.67–35.67 dds; c2: 45.00–45.67 dds).

La precocidad a la floración de *V. unguiculata* (35.07 dds) es congruente con los parámetros fenotípicos descritos por Dareus et al. (2021) al caracterizar la colección mini-núcleo de caupí de UC-Riverside en Florida, donde identificaron amplia diversidad en días a floración y destacaron que los genotipos tipo grano exhiben ciclos reproductivos más cortos. Dicho estudio señala que la heredabilidad de los días a floración en *V. unguiculata* es alta, lo que implica que la fertilización orgánica no altera sustancialmente esta etapa, en concordancia con los resultados del presente trabajo. Para el cultivar Canario (45.33 dds), Cavalcante et al. (2020) al describir los estadios fenológicos de *P. vulgaris* mediante la escala BBCH en condiciones tropicales de Brasil, reportaron que el inicio de la floración (estadio BBCH 60) requiere entre 380 y 490 grados-día acumulados desde la siembra, valor consistente con los 45 dds observados bajo la temperatura media de Ayna (590 msnm), y confirmaron que la fertilización no altera la fecha de floración sino la intensidad reproductiva posterior.

3.1.3. Días a la formación de vainas

Tabla 6

Formación de vainas (dds). Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm

Bloque	Castilla (c1)					Canario (c2)				
	Niveles de guano de isla					Niveles de guano de isla				
	d0	d1	d2	d3	d4	d0	d1	d2	d3	d4
I	42	42	44	42	42	48	50	48	48	48
II	43	44	43	43	44	51	48	49	51	50
III	42	42	42	42	43	48	50	48	48	49
Sumatoria	127	128	129	127	129	147	148	145	147	147
Prom. d	42.33	42.67	43.00	42.33	43.00	49.00	49.33	48.33	49.00	49.00
Prom. c	42.67					48.93				

Nota. La diferencia entre cultivares (~6.3 días) se mantuvo estable a través de las dosis, reflejando su base genética interespecífica.

La formación de vainas se inició en promedio a los 42.67 dds (frijol Castilla) y 48.93 dds (frijol Canario). La diferencia entre cultivares (~6.3 días) es consistente con la detectada en la floración, indicando un período antesis-cuajado uniforme en ambas especies bajo las condiciones del ensayo.

Murga-Orrillo et al. (2023) evaluaron el caupí con guano de isla como fuente orgánica en Yurimaguas (Perú, 145 msnm) y reportaron que las diferencias entre fuentes de fertilización se expresaron principalmente en variables de rendimiento y biomasa, no en las etapas fenológicas de cuajado temprano, en plena concordancia con los datos del presente trabajo. Maquén-Perleche et al. (2023) en un ensayo con biofertilizante a base de residuos de pescado en *V. unguiculata* en el Perú, observaron igualmente que el inicio de la formación de vainas no difirió estadísticamente entre tratamientos de abonamiento, confirmando que esta etapa está regulada principalmente por factores genéticos. En cuanto a *P. vulgaris*, Thu et al. (2023) al evaluar fertilizantes orgánicos en frijol arbustivo en Vietnam, encontraron que la fertilización orgánica afectó los componentes del rendimiento sin modificar la duración de las etapas fenológicas reproductivas tempranas, incluido el inicio del cuajado de vainas.

3.1.4. Días a la madurez

Tabla 7

Madurez (dds). Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm.

Bloque	Castilla (c1)					Canario (c2)				
	Niveles de guano de isla					Niveles de guano de isla				
	d0	d1	d2	d3	d4	d0	d1	d2	d3	d4
I	65	65	67	68	65	96	97	99	96	96
II	67	66	65	65	67	98	96	96	99	97
III	65	65	64	67	65	96	96	99	99	96
Sumatoria	197	196	196	200	197	290	289	294	294	289
Prom. d	65.67	65.33	65.33	66.67	65.67	96.67	96.33	98.00	98.00	96.33
Prom. c	65.73					97.07				

Nota. La diferencia de ≈ 31 días en el ciclo total entre cultivares es de naturaleza interespecífica e independiente de la fertilización orgánica aplicada.

La madurez fisiológica osciló entre 65.73 dds (Castilla) y 97.07 dds (Canario). Esta diferencia de aproximadamente 31 días confirma la marcada precocidad del caupí frente al frijol Canario bajo las condiciones evaluadas.

El ciclo de 65.73 dds del cultivar Castilla es consistente con los ciclos cortos documentados en la Amazonía peruana. Murga-Orrillo et al. (2024) caracterizaron 20 accesiones promisorias de *V. unguiculata* en Yurimaguas y reportaron ciclos de 60 a 80 días con rendimientos de 1.2 a 2.5 t ha⁻¹, destacando la precocidad como atributo adaptativo clave a las condiciones tropicales de baja altitud. Danso et al. (2025) confirmaron que el potencial productivo del caupí (≈ 2.5 t ha⁻¹) se logra en genotipos de ciclo corto con adecuada gestión de la fertilidad, y señalaron que la deficiencia de N extiende el ciclo y reduce el rendimiento. Para el cultivar Canario (97.07 dds), González et al. (2021) demostraron que el control genético del tiempo a la madurez en frijol andino involucra múltiples QTL de efecto aditivo y epistático, con ciclos de 85 a 110 días en entornos de fotoperiodo corto, rango dentro del cual se ubican los 97.07 dds del presente estudio.

3.2. Variables de rendimiento

Para cada variable de rendimiento se aplicó el Análisis de Varianza (ANOVA) procesado con InfoStat 2020. Ante la detección de diferencias estadísticas significativas, se procedió a la prueba de comparaciones múltiples de Tukey ($\alpha = 0.05$) para la identificación de los grupos estadísticamente distintos entre tratamientos.

3.2.1. Altura de planta

Tabla 8

Análisis de varianza de la altura de planta (m). Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm

Variable: Altura (m)	N = 30	R ² = 1.00	CV = 1.81%		
F.V.	gl	SC	CM	F	p-valor
Modelo	9	0.50	0.06	500.91	< 0.0001**
Cultivar (c)	1	0.49	0.49	4491.67	< 0.0001**
Dosis (d)	4	0.0016	0.0004	3.59	0.0231*
c × d	4	0.00023	0.00	0.53	0.7149
Error	20	0.00	0.00	—	—
Total	29	0.50	—	—	—

Nota. F.V. = fuente de variación; SC = suma de cuadrados; gl = grados de libertad; CM = cuadrado medio. CV = 1.81 %; * = significativo ($p \leq 0.05$); ** = altamente significativo ($p \leq 0.01$), la interacción c × d no significativa.

Tabla 9

Prueba de Tukey – efectos simples para altura de planta (m). Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm

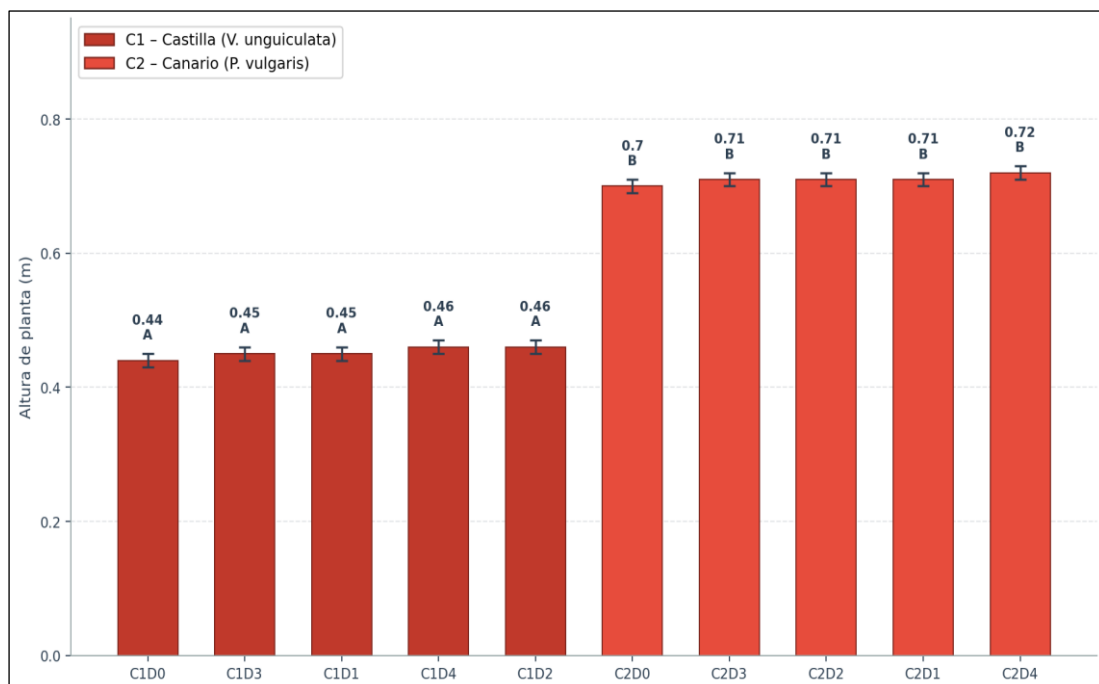
Error: 0.0001 gl: 20			
c × d	Media	A	B
c1 × d0	0.44	A	
c1 × d3	0.45	A	
c1 × d1	0.45	A	
c1 × d4	0.46	A	
c1 × d2	0.46	A	
c2 × d0	0.70		B
c2 × d3	0.71		B
c2 × d2	0.71		B
c2 × d1	0.71		B
c2 × d4	0.72		B

Medias con letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Nota. E.E. = error estándar. c1 = V. unguiculata (Castilla); c2 = P. vulgaris (Canario). d0–d4 = dosis crecientes de guano de isla.

Figura 5

Prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$) – Altura de planta (m). Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm.



El ANOVA (Tabla 8) detectó diferencias altamente significativas entre cultivares ($F = 4491.67$; $p < 0.0001$) y entre dosis de guano de isla ($F = 3.59$; $p = 0.0231$), sin que la interacción $c \times d$ resultara significativa ($p = 0.7149$). El CV de 1.81 % confirma la alta homogeneidad experimental. La prueba de Tukey (Tabla 9 y Figura 5) estableció dos grupos estadísticos exclusivos: el cultivar Castilla (grupo A: 0.44–0.46 m) y el cultivar Canario (grupo B: 0.70–0.72 m).

La diferencia en altura entre cultivares es de naturaleza interespecífica. Murga-Orrillo et al. (2023) evaluando el caupí con guano de isla y otros abonos orgánicos en Yurimaguas (Perú), registraron que los tratamientos con fertilización orgánica produjeron plantas significativamente más altas que el testigo sin abonamiento, y que el guano de isla indujo incrementos de biomasa aérea estadísticamente superiores al control. El efecto significativo de las dosis sobre la altura del cultivar Castilla (0.44 a 0.46 m; $p = 0.0231$) es coherente con dicho resultado. Para *P. vulgaris*, Kaur et al. (2024) demostraron que la aplicación integrada de fertilizante orgánico con biofertilizantes incrementó la actividad de dehidrogenasa y fosfatasa alcalina del suelo, mejorando la disponibilidad de N, P y K, factores que potencian el crecimiento en altura de las leguminosas.

3.2.2. Número de vainas por planta

Tabla 10

Análisis de varianza del número de vainas por planta. Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm.

Variable: N° vainas planta ⁻¹ N = 30 R ² = 0.95 CV = 8.84%					
F.V.	gl	SC	CM	F	p-valor
Modelo	9	263.33	29.26	46.20	< 0.0001**
Cultivar (c)	1	246.53	246.53	389.26	< 0.0001**
Dosis (d)	4	8.33	2.08	3.29	0.0317*
$c \times d$	4	8.47	2.12	3.34	0.0300*
Error	20	12.67	0.63	—	—
Total	29	276.00	—	—	—

Nota. La interacción $c \times d$ significativa ($F = 3.34$; $p = 0.0300$) indica que el efecto de las dosis sobre el número de vainas difiere cualitativamente entre cultivares.

Tabla 11

Prueba de Tukey – efectos simples para número de vainas por planta. Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm

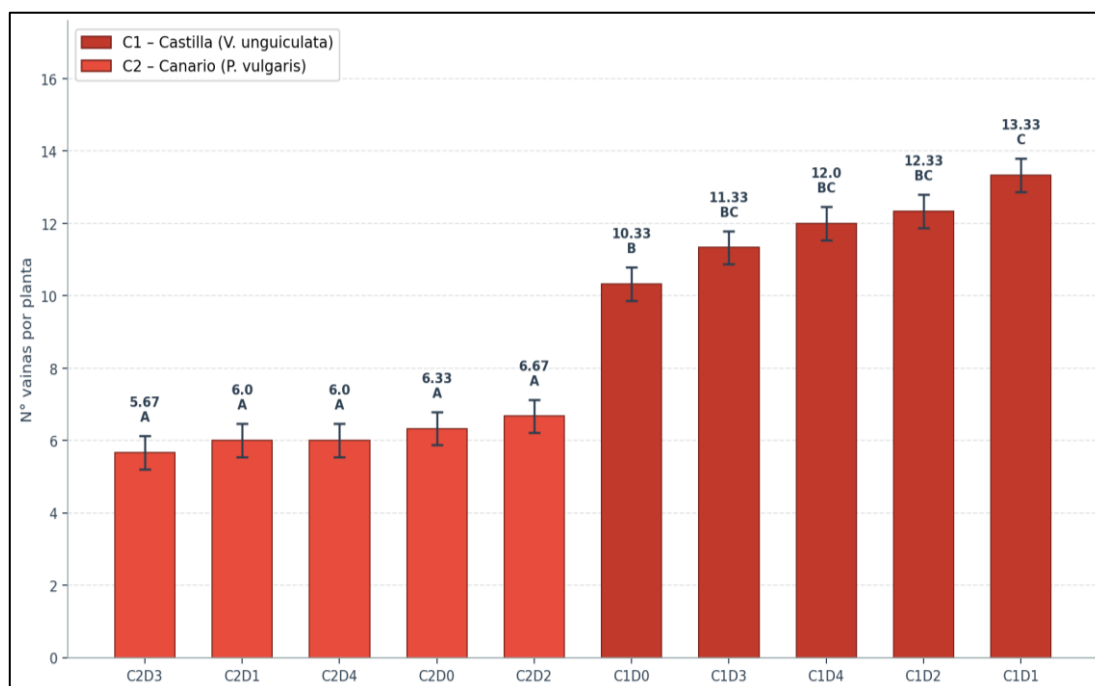
Error: 0.633 gl: 20				
c × d	Media	A	B	C
c2 × d3	5.67	A		
c2 × d1	6.00	A		
c2 × d4	6.00	A		
c2 × d0	6.33	A		
c2 × d2	6.67	A		
c1 × d0	10.33		B	
c1 × d3	11.33		B	C
c1 × d4	12.00		B	C
c1 × d2	12.33		B	C
c1 × d1	13.33			C

Medias con letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Nota. El tratamiento c1d1 (13.33 vainas planta⁻¹) fue el más productivo. La dosis d1 (1.0 t ha⁻¹) de guano de isla optimizó este componente en el cultivar Castilla.

Figura 6

Prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$) – Número de vainas por planta. Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm



El ANOVA (Tabla 10) evidenció diferencias altamente significativas entre cultivares ($F = 389.26$; $p < 0.0001$), entre dosis ($F = 3.29$; $p = 0.0317$) y en la interacción $c \times d$ ($F = 3.34$; $p = 0.0300$), con CV de 8.84 %. La prueba de Tukey (Figura 6) definió tres grupos: el grupo C fue exclusivo de c1d1 (13.33 vainas), el grupo A agrupó todos los tratamientos de c2 (5.67–6.67), y el grupo B los tratamientos restantes del cultivar Castilla.

La superioridad de *V. unguiculata* en número de vainas (10.33–13.33 vs. 5.67–6.67 en *P. vulgaris*) es coherente con los hallazgos en la Amazonía peruana. Murga-Orrillo et al. (2023) constataron que el guano de isla incrementó significativamente los componentes reproductivos del caupí en Yurimaguas, mientras que Danso et al. (2025) demostraron que aplicaciones moderadas de N (equivalentes a la proporcionada por 1.0 t ha⁻¹ de guano de isla al 10–14 % de N) maximizaron la fijación biológica de N y el número de vainas en *V. unguiculata*, en tanto que dosis superiores tendieron a inhibir la nodulación por retroalimentación negativa, explicando por qué c1d1 superó a las dosis mayores. Para *P. vulgaris*, Thu et al. (2023) reportaron que la fertilización orgánica mejoró el número de vainas frente al testigo sin fertilizar, aunque las diferencias entre dosis intermedias no fueron significativas, patrón consistente con los grupos homogéneos A observados en el cultivar Canario del presente estudio.

3.2.3. Longitud de vainas

Tabla 12

Análisis de varianza de la longitud de vainas (cm). Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm.

Variable: longitud de vainas (cm)	N = 30	R ² = 0.98	CV = 5.01%		
F.V.	gl	SC	CM	F	p-valor
Modelo	9	408.97	45.44	113.60	< 0.0001**
Cultivar (c)	1	381.63	381.63	954.08	< 0.0001**
Dosis (d)	4	15.47	3.87	9.67	0.0002**
$c \times d$	4	11.87	2.97	7.42	0.0008**
Error	20	8.00	0.40	—	—
Total	29	416.97	—	—	—

Nota. R² = 0.98: el modelo explica el 98 % de la variación total en longitud de vainas. Todos los efectos son altamente significativos

Tabla 13

Prueba de Tukey – efectos simples para longitud de vainas (cm). Niveles de guano de isla en dos cultivos de frijol, Ayna, 590 msnm.

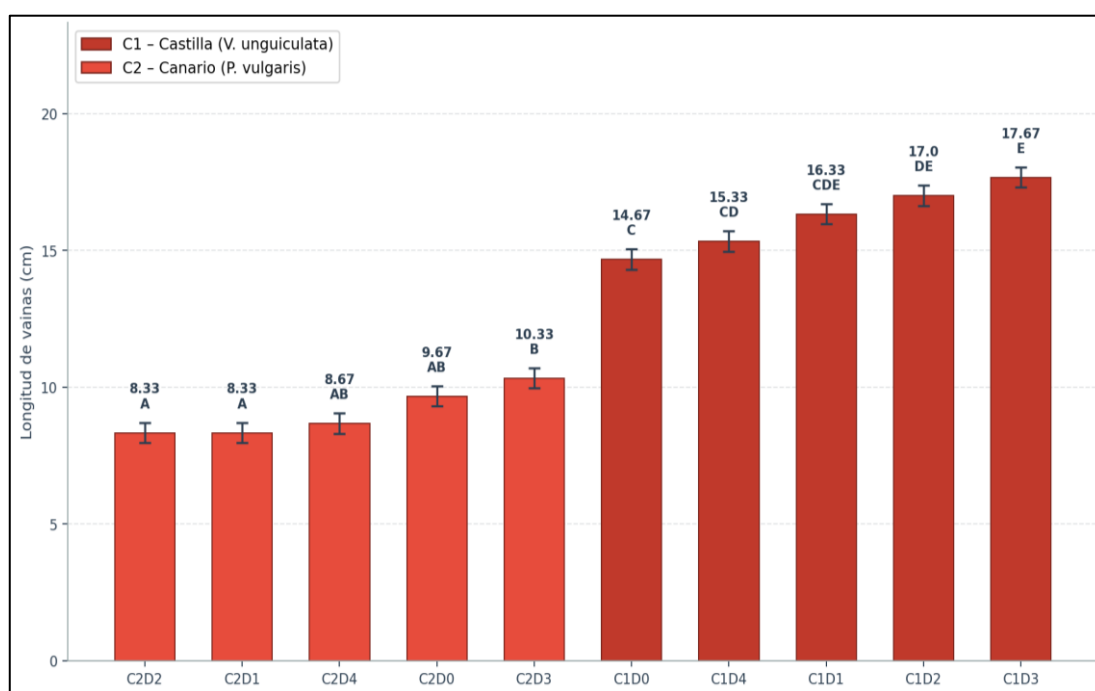
Error: 0.4000 gl: 20						
c × d	Media	A	B	C	D	E
c2 × d2	8.33	A				
c2 × d1	8.33	A				
c2 × d4	8.67	A	B			
c2 × d0	9.67	A	B			
c2 × d3	10.33		B			
c1 × d0	14.67			C		
c1 × d4	15.33			C	D	
c1 × d1	16.33			C	D	E
c1 × d2	17.00				D	E
c1 × d3	17.67					E

Medias con letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Nota. Se aprecia gradiente positiva en c1: a mayor dosis de guano de isla, mayor longitud de vaina.

Figura 7

Prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$) – Longitud de vainas (cm). Niveles de guano de isla en dos cultivos de frijol, Ayna, 590 msnm.



El análisis estadístico (Tabla 12) detectó diferencias altamente significativas para cultivar ($F = 954.08$; $p < 0.0001$), dosis ($F = 9.67$; $p = 0.0002$) e interacción ($F = 7.42$; $p = 0.0008$). La Figura 7 muestra cinco grupos estadísticos; el valor máximo correspondió a c1d3 (17.67 cm) y el mínimo a c2d1 y c2d2 (8.33 cm, grupo A).

La longitud de vainas del cultivar Castilla (14.67–17.67 cm) responde a la morfología característica de *V. unguiculata*. Pan et al. (2023) en un análisis genómico a escala cromosómica que identificó genes candidatos para longitud y anchura de vaina en *V. unguiculata*, confirmaron que la arquitectura genética de este rasgo es multigénica y que los factores ambientales, incluida la fertilización, pueden modular la expresión del rasgo dentro del rango genético del genotipo. La respuesta positiva de c1d3 (17.67 cm) frente a c1d0 (14.67 cm) sugiere que dosis de 2.0 t ha^{-1} de guano de isla optimizan el desarrollo del pericarpio al incrementar la disponibilidad de K y P durante el llenado de vainas. Para *P. vulgaris*, Diatta et al. (2024) encontraron, en un ensayo en Senegal, que la materia orgánica incrementó los componentes de rendimiento de manera no lineal con el máximo en dosis intermedias, patrón análogo al observado en c2d3 (10.33 cm) del presente estudio.

3.2.4. Número de semillas por vaina

Tabla 14

Análisis de varianza del número de semillas por vaina. Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm.

Variable: N° semillas vaina ⁻¹	N = 30	R ² = 0.97	CV = 6.73%		
F.V.	gl	SC	CM	F	p-valor
Modelo	9	183.47	20.39	67.95	< 0.0001**
Cultivar (c)	1	172.80	172.80	576.00	< 0.0001**
Dosis (d)	4	6.13	1.53	5.11	0.0053**
c × d	4	4.53	1.13	3.78	0.0191*
Error	20	6.00	0.30	—	—
Total	29	189.47	—	—	—

Nota. La alta significancia del cultivar ($F = 576.00$; $p < 0.0001$) confirma la diferencia interespecífica como factor dominante sobre la fertilización orgánica.

Tabla 15

Prueba de Tukey – efectos simples para número de semillas por vaina. Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm.

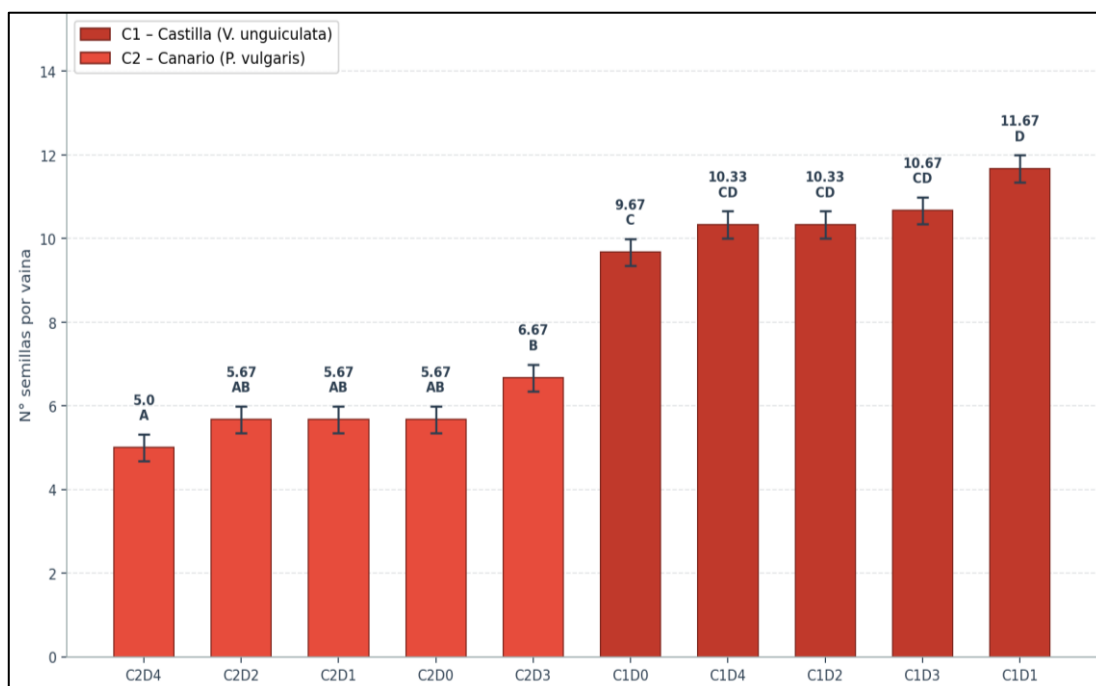
Error: 0.3000 gl: 20					
c × d	Media	A	B	C	D
c2 × d4	5.00	A			
c2 × d2	5.67	A	B		
c2 × d1	5.67	A	B		
c2 × d0	5.67	A	B		
c2 × d3	6.67		B		
c1 × d0	9.67			C	
c1 × d4	10.33			C	D
c1 × d2	10.33			C	D
c1 × d3	10.67			C	D
c1 × d1	11.67				D

Medias con letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Nota. c1d1 registró el mayor número de semillas por vaina (11.67), siendo estadísticamente superior a todos los tratamientos del cultivar Canario.

Figura 8

Prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$) – Número de semillas por vaina. Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm.



El ANOVA (Tabla 14) reveló diferencias altamente significativas para cultivar ($F = 576.00$; $p < 0.0001$), dosis ($F = 5.11$; $p = 0.0053$) e interacción ($F = 3.78$; $p = 0.0191$). La Figura 8 muestra cuatro grupos estadísticos; el tratamiento c1d1 (11.67) ocupó el grupo D de mayor valor, y c2d4 (5.00) el grupo A de menor rendimiento.

El rango de semillas por vaina de *V. unguiculata* (9.67–11.67) es consistente con los datos de accesiones promisorias en la Amazonía peruana. Murga-Orrillo et al. (2024) reportaron valores entre 8 y 14 semillas por vaina en 20 accesiones de *V. unguiculata* en Yurimaguas, señalando que la fertilización orgánica incrementó este componente en genotipos de alta fijación biológica de N. El resultado óptimo de c1d1 (11.67) se explica por el umbral de respuesta descrito por Danso et al. (2025): dosis moderadas de N (45 kg N ha⁻¹, equivalentes a ≈ 1.0 t ha⁻¹ de guano de isla) maximizaron la fijación biológica de N y los componentes del rendimiento del caupí, mientras que dosis superiores tendieron a inhibir la nodulación. Para *P. vulgaris* (5.00–6.67 semillas por vaina), Kaur et al. (2024) demostraron que la combinación de fertilizante orgánico y biofertilizante incrementó los parámetros de rendimiento de leguminosas al activar la actividad microbiana del suelo que acelera la mineralización de P y K durante el llenado de grano.

3.2.5. *Peso de 1000 semillas*

Tabla 16

Análisis de varianza del peso de 1000 semillas (g). Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm.

Variable: Peso 1000 semillas (g) N = 30 R ² = 1.00 CV = 0.68%					
F.V.	gl	SC	CM	F	p-valor
Modelo	9	15946.03	1771.78	793.33	< 0.0001**
Cultivar (c)	1	3921.63	3921.63	1755.96	< 0.0001**
Dosis (d)	4	8569.87	2142.47	959.31	< 0.0001**
c × d	4	3454.53	863.63	386.70	< 0.0001**
Error	20	44.67	2.23	—	—
Total	29	15990.70	—	—	—

Nota. CV = 0.68 %: mayor precisión experimental. Todos los efectos son altamente significativos ($p < 0.0001$), incluida la interacción c × d.

Tabla 17

Prueba de Tukey – efectos simples para peso de 1000 semillas (g). Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm.

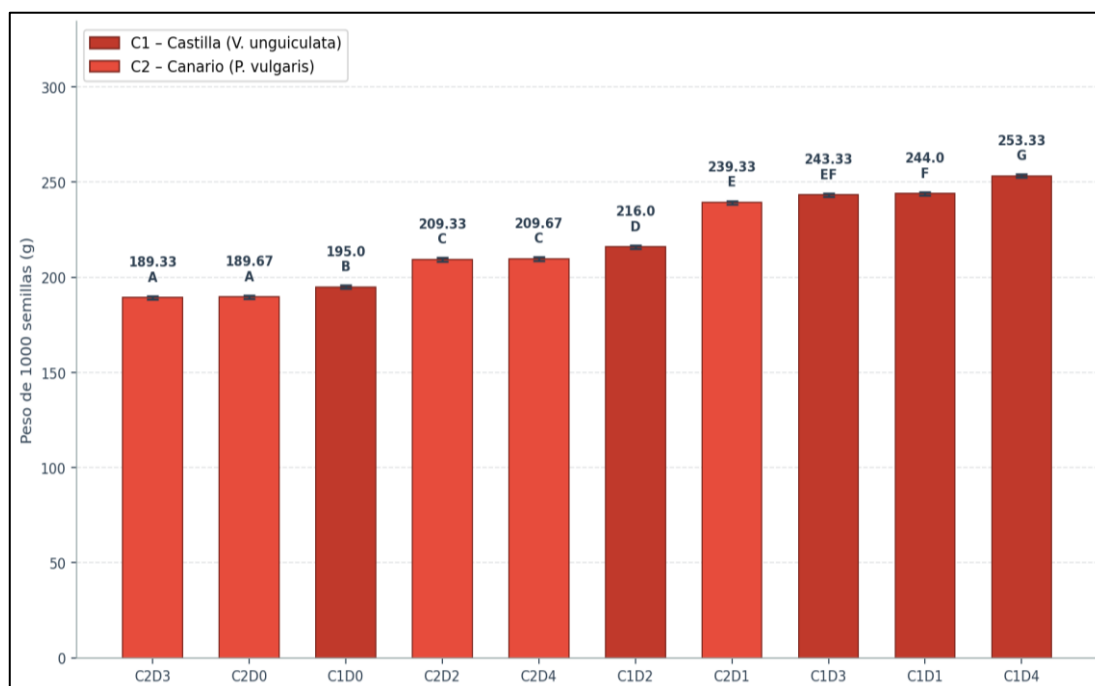
Error: 0.2333 gl: 20								
c × d	Media	A	B	C	D	E	F	G
c2 × d3	189.33	A						
c2 × d0	189.67	A						
c1 × d0	195.00		B					
c2 × d2	209.33			C				
c2 × d4	209.67			C				
c1 × d2	216.00				D			
c2 × d1	239.33					E		
c1 × d3	243.33					E	F	
c1 × d1	244.00						F	
c1 × d4	253.33							G

Medias con letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Nota. Se distinguen 7 grupos estadísticos (A–G). El tratamiento c1d4 (253.33 g) es el único en el grupo G, superior a todos los demás.

Figura 9

Prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$) – Peso de 1000 semillas (g). Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm.



El peso de 1000 semillas presentó la mayor resolución estadística del ensayo con siete grupos diferenciados (A–G). El tratamiento c1d4 (253.33 g) constituyó el único integrante del grupo G. Los menores pesos correspondieron a c2d3 y c2d0 (189.33 y 189.67 g, grupo A).

La respuesta positiva y progresiva del cultivar Castilla (195.00 g en d0 → 253.33 g en d4) está relacionada con la dinámica de mineralización del guano de isla. Geisseler et al. (2021) en su revisión sobre mineralización de N en fertilizantes orgánicos, incluyendo guano de ave marina, demostraron que la liberación de N, P y K del guano sigue una cinética de primer orden con tasas de 50–80 % en las primeras 8 semanas, período que coincide con el llenado de grano en leguminosas; ello explica los incrementos observados en el peso de semillas a mayor dosis en c1. Para el cultivar Canario, el comportamiento no lineal (mínimo en d3 y d0; máximo en d1) concuerda con Diatta et al. (2024) quienes encontraron en cowpea que dosis medias de materia orgánica optimizan el llenado de grano al tiempo que dosis elevadas desvían asimilados al crecimiento vegetativo.

3.2.6. Rendimiento en kg ha^{-1}

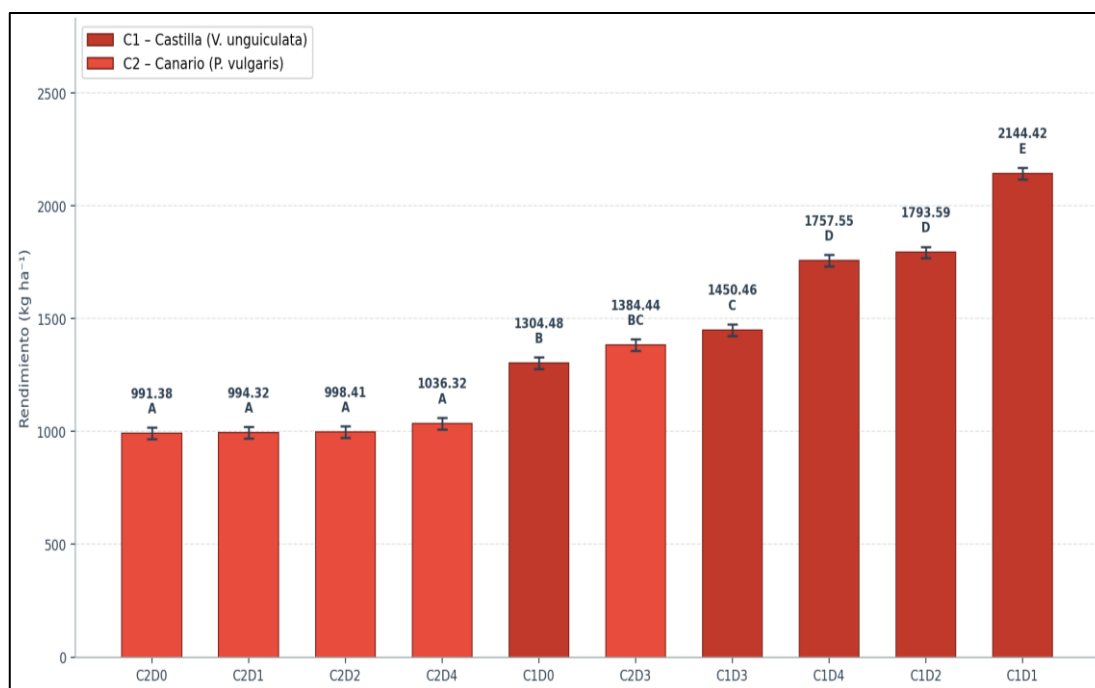
Tabla 18
Análisis de varianza del rendimiento en kg ha^{-1} . Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm.

Variable: Rendimiento (kg ha^{-1})					
	N = 30	R ² = 0.99	CV = 3.18%		
F.V.	gl	SC	CM	F	p-valor
Cultivar (c)	1	2782746.45	2782746.45	1435.08	< 0.0001**
Dosis (d)	4	549046.59	137261.65	70.79	< 0.0001**
c × d	4	1083651.99	270913.00	139.71	< 0.0001**
Error	20	38781.73	1939.09	—	—
Total	29	4454226.76	—	—	—

Nota. La interacción c × d es de gran magnitud (F = 139.71; p < 0.0001), indicando que el efecto de las dosis sobre el rendimiento es cualitativamente diferente para cada cultivar.

Figura 10

Prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$) – Rendimiento en kg ha^{-1} . Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm.



El ANOVA (Tabla 18) evidenció diferencias altamente significativas en todos los efectos evaluados ($p < 0.0001$). El CV de 3.18 % valida la confiabilidad de los datos. La prueba de Tukey (Figura 10) diferenció cinco grupos, siendo el tratamiento c1d1 (2144.42 kg ha^{-1} , grupo E) estadísticamente superior a todos los demás.

El rendimiento máximo de c1d1 (2144.42 kg ha^{-1}) supera el promedio nacional de *V. unguiculata* en el Perú (1376 kg ha^{-1} , reportado por Murga-Orrillo et al. (2023) con base en FAOSTAT y se sitúa dentro del rango de 1.2 a 2.5 t ha^{-1} documentado por Murga-Orrillo et al. (2024) para accesiones promisorias en la Amazonía peruana. Danso et al. (2025) señalaron que el potencial productivo del caupí ($\approx 2.5 \text{ t ha}^{-1}$) requiere adecuada gestión de la fertilidad del suelo, y que aplicaciones equivalentes a 1.0 t ha^{-1} de guano de isla maximizan la fijación biológica de N y el rendimiento, mientras que dosis superiores tienden a inhibir la nodulación, lo que explica el decremento relativo del rendimiento del cultivar Castilla a partir de d2.

Para el cultivar Canario, el mayor rendimiento correspondió a c2d3 (1384.44 kg ha^{-1}), valor coherente con los hallazgos de Maquén-Perleche et al. (2023) quienes

evaluaron biofertilizantes orgánicos en leguminosas en el Perú y encontraron que la fertilización orgánica incrementó significativamente el rendimiento frente al testigo en suelos de la selva amazónica. El rol del guano de isla como fertilizante orgánico completo, con macronutrientes N (10–14 %), P_2O_5 (10–12 %) y K_2O (2–3 %) según Agrorural (2022) ha sido confirmado en sus mecanismos de acción por Geisseler et al. (2021) quienes demostraron que la mineralización progresiva de N del guano de ave durante el ciclo del cultivo garantiza un suministro continuo de nutrientes que favorece las etapas de floración y llenado de grano. Kaur et al. (2024) aportaron evidencia complementaria al demostrar que la materia orgánica activa la microbiología del suelo “en particular la actividad de dehidrogenasa y fosfatasa alcalina”, mejorando la nutrición y productividad de las leguminosas, efecto particularmente relevante en los suelos ácidos de la selva alta del VRAEM donde los niveles naturales de P disponible suelen ser limitantes para el cultivo del frijol Canario.

CONCLUSIONES

1. La aplicación de guano de isla incidió significativamente ($p < 0,05$) en las variables de rendimiento. La dosis óptima para frijol Castilla (*Vigna unguiculata* L.) fue $1,0 \text{ t ha}^{-1}$, registrando el máximo rendimiento de $2\ 144,42 \text{ kg ha}^{-1}$ (c1d1, grupo E; $F = 139,71$; $p < 0,0001$), el mayor número de vainas por planta (13,33; c1d1, grupo C), el mayor número de semillas por vaina (11,67; c1d1) y, con $2,5 \text{ t ha}^{-1}$, el mayor peso de 1000 semillas (253,33 g; c1d4, grupo G). La longitud de vainas fue máxima con $2,0 \text{ t ha}^{-1}$ (c1d3 = 17,67 cm). Para frijol Canario (*Phaseolus vulgaris* L.), la dosis de $2,0 \text{ t ha}^{-1}$ produjo el mayor rendimiento (c2d3 = $1384,44 \text{ kg ha}^{-1}$), mientras que los tratamientos sin fertilización orgánica registraron los valores más bajos en ambas especies (c2d0 = $991,38 \text{ kg ha}^{-1}$; c1d0 = $1\ 304,48 \text{ kg ha}^{-1}$). La interacción cultivar $\times$ dosis fue altamente significativa en todas las variables de rendimiento ($p < 0,0001$ a $p = 0,0191$), confirmando respuestas diferenciadas según el material genético frente a la fertilización orgánica.
2. El cultivar frijol Castilla (*Vigna unguiculata* L.) presentó mayor precocidad y rendimiento. La emergencia ocurrió a los 3,27 dds en c1 frente a 5,40 dds en c2; la floración a 35,07 y 45,33 dds; la formación de vainas a 42,67 y 48,93 dds; y la madurez fisiológica a 65,73 y 97,07 dds, respectivamente, diferencia de ≈ 31 días de naturaleza interespecífica no modificada por las dosis de fertilización. En componentes del rendimiento, c1 superó estadísticamente a c2 en vainas por planta (10,33–13,33 vs. 5,67–6,67; $F = 389,26$; $p < 0,0001$), longitud de vainas (14,67–17,67 cm vs. 8,33–10,33 cm; $F = 954,08$; $p < 0,0001$), semillas por vaina (9,67–11,67 vs. 5,00–6,67; $F = 576,00$; $p < 0,0001$) y rendimiento en grano (1304,48–2144,42 vs. 991,38–1384,44 kg ha^{-1} ; $F = 1435,08$; $p < 0,0001$). El cultivar Canario registró mayor altura de planta (0,70–0,72 m vs. 0,44–0,46 m; $F = 4491,67$; $p < 0,0001$), rasgo determinado genéticamente. El peso de 1000 semillas fue superior en c1 con dosis crecientes (195,00–253,33 g) respecto a c2 (189,33–239,33 g), siendo la interacción $c \times d$ altamente significativa ($F = 386,70$; $p < 0,0001$).

RECOMENDACIONES

- Se recomienda a los productores de este cultivo aprovechar en la producción el frijol Castilla (*Vigna unguiculata* L.) por responder mejor en el rendimiento progresivo de peso de 1000 semillas (195,00 g en d0 a 253,33 g en d4).
- Se recomienda su inclusión como especie prioritaria en los programas de fomento agrícola de la selva alta de Ayacucho al frijol Castilla (*Vigna unguiculata* L.); asimismo, se sugiere ampliar la evaluación con otras variedades mejoradas disponibles en el banco de germoplasma del INIA para identificar materiales de mayor potencial productivo en sistemas similares.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adzawla, W., Setsoafia, E. D., Setsoafia, E. D., Amoabeng-Nimako, S., Atakora, W. K., Camara, O., Jemo, M., & Bindraban, P. S. (2024). Fertilizer use efficiency and economic viability in maize production in the Savannah and transitional zones of Ghana. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8(February), 1–19. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1340927>
- Agro Rural. (2018). Manual de Abonamiento con Guano de las Islas. In *Ministerio de Agricultura y Riego* (Vol. 3). [https://www.agrorural.gob.pe/wp-content/uploads/transparencia/dab/material/MANUAL DE ABONAMIENTO CON G.I..pdf](https://www.agrorural.gob.pe/wp-content/uploads/transparencia/dab/material/MANUAL_DE_ABONAMIENTO_CON_G.I..pdf)
- Agrorural. (2022). *Guano de las islas: el poderoso fertilizante natural que potencia la productividad de los cultivos*. Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. <https://www.gob.pe/institucion/agrorural/noticias/585985>
- Akhtar, K., Ain, N. ul, Prasad, P. V. V., Naz, M., Aslam, M. M., Djalovic, I., Riaz, M., Ahmad, S., Varshney, R. K., He, B., & Wen, R. (2024). Physiological, molecular, and environmental insights into plant nitrogen uptake, and metabolism under abiotic stresses. *Plant Genome*, 17(2), 1–22. <https://doi.org/10.1002/tpg2.20461>
- Alcázar-Valle, M., Lugo-Cervantes, E., Mojica, L., Morales-Hernández, N., Reyes-Ramírez, H., Enríquez-Vara, J. N., & García-Morales, S. (2020). Bioactive Compounds, Antioxidant Activity, and Antinutritional Content of Legumes: A Comparison between Four Phaseolus Species. *Molecules*, 25(15), 3528. <https://doi.org/10.3390/molecules25153528>
- Aragón, J. I., & Chuspe, M. E. (2018). *ECOLOGÍA GEOGRÁFICA DEL CUSCO*. https://www.researchgate.net/publication/327172888_Ecologia_Geografica_del_Cusco
- Aybar-Peve, L., Cervantes-Zamudio, R., Camargo-Cobeñas, M., Chihuan-Palomino, E., Rojas-Meza, M., & Terán-Rojas, J. (2025). Fenología, crecimiento y rendimiento de nueve líneas de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) en condiciones agroclimáticas de chincha, Perú. *Bioagro*, 37(3), 277–288. <https://doi.org/10.51372/bioagro373.3>
- Aybar-Peve, L. J., Medina-Portilla, N. F., Camargo-Cobeñas, M. A., Chihuan-Palomino, E., & Terán-Rojas, J. A. (2025). CARACTERIZACIÓN AGROMORFOLÓGICA Y DIVERSIDAD FENOTÍPICA DE FRIJOL COMÚN

- DE PERÚ. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 28(2).
<https://doi.org/10.56369/tsaes.5897>
- Balík, J., Suran, P., Černý, J., Sedlář, O., Kulhánek, M., & Procházková, S. (2025). Changes in soil organic matter content and quality after application of different organic and mineral fertilisers in 27 years long-term field experiments on luvisol. *Frontiers in Soil Science*, 5(March), 1–17.
<https://doi.org/10.3389/fsoil.2025.1540137>
- Belal, H. E. E., Elkelish, A., Zaid, M. M., Alhudhaibi, A., El-Roby, M. S. A., Abd Elmohsen, Y. H., Abeed, A. H. A., Ukozehasi, C., Rady, M. M., & Sayed, A. A. S. (2025). Novel biostimulants-mediate tolerance to drought stress in *Phaseolus vulgaris* plants by optimizing osmoprotectants and antioxidant defense systems. *Botanical Studies*, 66(1). <https://doi.org/10.1186/s40529-025-00483-x>
- Benavente, M. (2025). *Efecto de abono foliar orgánico en la producción de tres variedades de frijol canario (Phaseolus vulgaris L.) en el sector de Quitasol, Abancay – Apurímac, 2023* [Tesis de pregrado, Universidad Tecnológica de los Andes] Repositorio Institucional de la UTEA].
<https://repositorio.utea.edu.pe/server/api/core/bitstreams/86df8cf2-ef84-4424-adf9-a6fe652a1b9d/content>
- Britannica Editors. (2025). *guano*. Encyclopedia Britannica.
<https://www.britannica.com/science/guano>
- Camarena, M. F., Huaranga, J. A., & Mostacero, N. E. (2020). *Innovación tecnológica para el incremento de la producción de frijol común (Phaseolus vulgaris L.)*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Campa, A., Rodríguez Madrera, R., Jurado, M., García-Fernández, C., Suárez Valles, B., & Ferreira, J. J. (2023). Genome-wide association study for the extractable phenolic profile and coat color of common bean seeds (*Phaseolus vulgaris* L.). *BMC Plant Biology*, 23(1), 158. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04177-z>
- Cao, J., Qu, H., Li, R., Wang, P., & Chen, M. (2025). Effects of returning organic fertilizer and biochar to soil on surface electrochemical properties and nutrients. *BioResources*, 21(1), 67–80. <https://doi.org/10.15376/biores.21.1.67-80>
- Catarcione, G., Paolacci, A. R., Alicandri, E., Gramiccia, E., Taviani, P., Rea, R., Costanza, M. T., De Lorenzis, G., Puccio, G., Mercati, F., & Ciaffi, M. (2023). Genetic Diversity and Population Structure of Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Landraces in the Lazio Region of Italy. *Plants*, 12(4), 744.

<https://doi.org/10.3390/plants12040744>

- Cavalcante, A. G., Lemos, L. B., Meirelles, F. C., Cavalcante, A. C. P., & de Aquino, L. A. (2020). Thermal sum and phenological descriptions of growth stages of the common bean according to the BBCH scale. *Annals of Applied Biology*, 176(3), 342–349. <https://doi.org/10.1111/aab.12571>
- Centeno, R. (2024). *Niveles de guano de isla en el rendimiento de frijol castilla (Vigna unguiculata L. Walp), Pichari, Cusco, 2023* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Cristobal de Huamanga] Repositorio Institucional de la UNSCH]. <https://repositorio.unsch.edu.pe/handle/20.500.14612/7321>
- Chen, Q., Xie, J., Li, L., Khan, K. S., Wang, L., Chang, L., & Du, C. (2025). Partial substitution of chemical fertilizer with organic fertilizer: a promising circular economy approach for improvement soil physical and chemical properties and sustainable crop yields. *Frontiers in Plant Science*, 16(May), 1–17. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1565081>
- Cid-Gallegos, M. S., Gómez y Gómez, Y. de las M., Corzo-Ríos, L. J. C.-R., Sanchez-Chino, X. M., Moguel-Concha, D., Borges-Martínez, E., & Jiménez-Martínez, C. (2023). Potencial nutricional y bioactivo de frijol (*Phaseolus vulgaris*) en la salud humana. *Investigación y Desarrollo En Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 8(1), 309–318. <https://doi.org/10.29105/idcyta.v8i1.42>
- Cook-patton, S. C., Wiltshire, S., Atwood, L. W., Beillouin, D., Russell, D., Fargione, J., Garcia, E., Griffey, V., Hart, D. T., & Michael, G. (2025). Unpacking global agroforestry diversity and configurations: A data-driven analysis for natural climate solutions. *World Congress on Agroforestry*. https://www.researchgate.net/publication/396465471_Unpacking_Global_Agroforestry_Diversity_and_Configurations_A_Data-Driven_Analysis_for_Natural_Climate_Solutions
- Cosme, R. C., Reynoso, A. F., & Sanabria, S. (2020). Effect of island guano on the yield of two varieties of Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) on degraded soil. *Agroindustrial Science*, 10(2), 191–198. <https://doi.org/10.17268/agroind.sci.2020.02.10>
- Danso, J., Ulzen, J., Ahenkan, M., Ulzen, O. O., Asei, R., Sarkodie-Addo, J., & Appiah-Agyei, C. (2025). Growth and yield response of cowpea [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] to nitrogen fertilizer and inoculant application. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 8(4), 1–17. <https://doi.org/10.1002/agg2.70237>

- Dareus, R., Acharya, J. P., Paudel, D. R., Lopes De Souza, C. H., Tome Gouveia, B., Chase, C. A., DiGennaro, P., Mulvaney, M. J., Koenig, R., & Rios, E. F. (2021). Phenotypic diversity for phenological and agronomic traits in the UC-Riverside cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) mini-core collection. *Crop Science*, 61(5), 3551–3563. <https://doi.org/10.1002/csc2.20544>
- de Freitas, I. C., Ferreira, E. A., Alves, M. A., de Oliveira, J. C., & Frazão, L. A. (2023). Growth, nodulation, production, and physiology of leguminous plants in integrated production systems. *Agrosystems, Geosciences and Environment*, 6(1), 1–14. <https://doi.org/10.1002/agg2.20343>
- Denning-James, K. E., Chater, C., Cortés, A. J., Blair, M. W., Peláez, D., Hall, A., & De Vega, J. J. (2025). Genome-wide association mapping dissects the selective breeding of determinacy and photoperiod sensitivity in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *G3: Genes, Genomes, Genetics*, 15(6), 1–16. <https://doi.org/10.1093/g3journal/jkaf090>
- Deshmukh, H. S. K., Tandel, M. B., Dobriyal, M. J., Gunaga, R., Kunwar, R., Thakur, N. S., Huse, S. A., Acharya, R. P., Ramesh, K. R., Harne, S. S., Shambharkar, V. B., Mevada, R. J., & Saini, V. (2025). A new framework and classification scheme to indicate best-fit agroforestry systems: a locally adapted approach in the western coast of India. *Agroforestry Systems*, 99(8), 270. <https://doi.org/10.1007/s10457-025-01367-6>
- Diatta, A. A., Kanfany, G., Camara, B., Bassène, C., Manga, A. G. B., Seleiman, M., Mbow, C., & Schillaci, C. (2024). Compost as an Alternative to Inorganic Fertilizers in Cowpea [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] Production. *Legume Science*, 6(3). <https://doi.org/10.1002/leg3.247>
- Diédhiou, I., Otero, J. A., Navarrete, O., Arguedas-Flatts, Y. N., Jauregui, J. A. A., & Ramírez-Tobias, H. M. (2025). Responses to Induced Passive Heat in Two Local Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Varieties Under Humid Tropical Field Conditions in Costa Rica. *Plants*, 14(22), 1–20. <https://doi.org/10.3390/plants14223489>
- Duran Mera, C., Aurea Jurado, M., Barcos Arias, M., & Sánchez Campoverde, L. (2025). Rendimiento del cultivo de fréjol (*Phaseolus vulgaris* L.) en respuesta de la aplicación de niveles de nitrógeno. *REVISTA CIENTÍFICA ECOCIENCIA*, 12(2), 139–153. <https://doi.org/10.21855/122.1000>
- Elias, J. C. F., Gonçalves-Vidigal, M. C., Ariani, A., Valentini, G., Martiniano-Souza, M.

- da C., Vaz Bisneta, M., & Gepts, P. (2021). Genome-Environment Association Analysis for Bio-Climatic Variables in Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) from Brazil. *Plants*, 10(8), 1572. <https://doi.org/10.3390/plants10081572>
- Espinoza, N. (2009). *Fisiología de cultivos: leguminosas de grano*. Editorial Universitaria.
- Espinoza, J. y Castillo F. (2024). Manual técnico para el manejo agronómico del cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris*). Universidad Nacional Agraria, Nicaragua.
- Fiore, M. C., Raimondo, F. M., Mercati, F., Digangi, I., Sunseri, F., & Scialabba, A. (2020). Preserving Biodiversity in Marginal Rural Areas: Assessment of Morphological and Genetic Variability of a Sicilian Common Bean Germplasm Collection. *Plants*, 9(8), 989. <https://doi.org/10.3390/plants9080989>
- Food and Agriculture Organization [FAO]. (2022). *FAOSTAT: Crops and livestock products*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
- Gabourel-Landaverde, V. A., Schnabel, S., Lavado-Contador, J. F., Smith, J., & Palma, J. H. N. (2025). Identifying target areas for agroforestry in European agricultural landscapes based on environmental pressures and socioeconomic contexts. *Trees, Forests and People*, 21(July). <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2025.100961>
- Geisseler, D., Smith, R., Cahn, M., & Muramoto, J. (2021). Nitrogen mineralization from organic fertilizers and composts: Literature survey and model fitting. *Journal of Environmental Quality*, 50(6), 1325–1338. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20295>
- Geleta, R. J., Roro, A. G., & Terfa, M. T. (2024). Phenotypic and yield responses of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) varieties to different soil moisture levels. *BMC Plant Biology*, 24(1), 1–15. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-04856-5>
- Geng, S., Shi, X., Zhang, Q., Yang, J., Yang, C., & Yang, L. (2026). *Organic fertilizer enhances microbial functional genes related to nitrogen and phosphorus cycling in rubber tree (Hevea brasiliensis) rhizosphere*. April. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2026.1833968>
- Ghafoor, A. Z., Javed, H. H., Karim, H., Studnicki, M., Ali, I., Yue, H., Xiao, P., Asghar, M. A., Brock, C., & Wu, Y. (2024). Biological Nitrogen Fixation for Sustainable Agriculture Development Under Climate Change—New Insights From a Meta-Analysis. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 210(5). <https://doi.org/10.1111/jac.12754>
- Gioia, T., Logozzo, G., Marzario, S., Spagnoletti Zeuli, P., & Gepts, P. (2019). Evolution

- of SSR diversity from wild types to U.S. advanced cultivars in the Andean and Mesoamerican domestications of common bean (*Phaseolus vulgaris*). *PLOS ONE*, *14*(1), e0211342. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0211342>
- González-Román, R. D., & Jaramillo-Trujillo, S. (2024). Diversidad de frijoles (*Phaseolus* spp.) y su papel estratégico en la soberanía, autonomía y seguridad alimentaria. *Ciencias Agropecuarias*, *10*(2), 3–13. <https://doi.org/10.36436/24223484.747>
- González, A. M., Yuste-Lisbona, F. J., Weller, J., Vander Schoor, J. K., Lozano, R., & Santalla, M. (2021). Characterization of QTL and Environmental Interactions Controlling Flowering Time in Andean Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Frontiers in Plant Science*, *11*(January), 1–16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.599462>
- Guerrero-Domínguez, L., Leydis González-Pérez, B., Iván Jerez-Mompie, E., Morales-Guevara, D., Dell'amico-Rodríguez, J., Arasay, I., & Cruz-Suárez, S. (2023). Comportamiento de plantas de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) sometidas a dos regímenes de riego. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, *32*(4). <https://cu-id.com/2177/v32n4e06>
- Instituto Nacional de Innovación Agraria [INIA]. (2004). *Frijol canario: Características agronómicas*. Ministerio de Agricultura del Perú.
- Instituto Nacional de Innovación Agraria [INIA]. (2007). *Frijol castilla (caupí): Características agronómicas*. Ministerio de Agricultura del Perú.
- Islam, M. M., Li, L., He, J., Naznin, A., Huda, S., Ahemd, T., Tissue, D., & Chen, Z. H. (2025). Decoding Plant Metabolomic Response to Potassium and Nutrient Stresses in Controlled Environments. *Physiologia Plantarum*, *177*(5). <https://doi.org/10.1111/ppl.70547>
- Jaleta, G., Worku, M., & Garedew, W. (2025). Growth and yield responses of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) to blended fertilizer under hot submoist tropical conditions in southwestern Ethiopia. *Agrosystems, Geosciences and Environment*, *8*(1), 1–9. <https://doi.org/10.1002/agg2.70064>
- Javed, T., Indu, I., Singhal, R. K., Shabbir, R., Shah, A. N., Kumar, P., Jinger, D., Dharmappa, P. M., Shad, M. A., Saha, D., Anuragi, H., Adamski, R., & Siuta, D. (2022). Recent Advances in Agronomic and Physio-Molecular Approaches for Improving Nitrogen Use Efficiency in Crop Plants. *Frontiers in Plant Science*, *13*(April), 1–21. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.877544>

- Kačergius, A., Gegeckas, A., & Gudiukaitė, R. (2025). Recent Advances in Soil Health: Influences of Organic Carbon and Microbiota. *Biology*, 14(5), 10–12. <https://doi.org/10.3390/biology14050500>
- Kaur, G., Kaur, J., & Walia, S. S. (2024). Effect of Integrated Nutrient Management on Soil Health, Soil Quality, and Production of Cowpea (*Vigna unguiculata* L.). *Journal of Basic Microbiology*, 64(11). <https://doi.org/10.1002/jobm.202400225>
- Kindt, R., Siddique, I., Dawson, I., John, I., Pedercini, F., Lillesø, J. P., & Graudal, L. (2025). The Agroforestry Species Switchboard, a global resource to explore information for 107,269 plant species. *Scientific Data* , 12(1), 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41597-025-05492-w>
- Kumar, A., Saini, K. S., Sharma, S., Yadav, M., Singh, G., Devi, K., & Kumawat, K. C. (2025). Evaluating soil physico-chemical properties and nutrient availability through intensified conservation agriculture-based cropping systems. *Frontiers in Agronomy*, 7(September). <https://doi.org/10.3389/fagro.2025.1612792>
- Li, Y., Mbata, G., & Simmons, A. (2023). Population Dynamics of Insect Pests and Beneficials on Different Snap Bean Cultivars. *Insects*, 14(3), 230. <https://doi.org/10.3390/insects14030230>
- Lirio-Paredes, J., Ogata-Gutiérrez, K., & Zúñiga-Dávila, D. (2022). Effects of Rhizobia Isolated from Coffee Fields in the High Jungle Peruvian Region, Tested on *Phaseolus vulgaris* L. var. Red Kidney. *Microorganisms*, 10(4), 823. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10040823>
- Liu, D. (2021). Root developmental responses to phosphorus nutrition. *Journal of Integrative Plant Biology*, 63(6), 1065–1090. <https://doi.org/10.1111/jipb.13090>
- López-Alcocer, J. de J., Lépiz-Ildefonso, R., González-Eguiarte, D. R., Rodríguez-Macías, R., & López-Alcocer, E. (2020). Eficiencia en fijación biológica de nitrógeno de cepas de *Rhizobium* spp. recolectadas en frijol cultivado y silvestre. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 38(4), 841–852. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.654>
- Makhumbila, P., Rauwane, M., Muedi, H., & Figlan, S. (2025). Insights of *Phaseolus vulgaris*’ response to infection by *Uromyces appendiculatus* using an RNA-seq approach. *Frontiers in Plant Science*, 16(June), 1–15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1557954>
- Maquén-Perleche, J., Aldana-Carbonel, S., Suárez Muguerza, L., Sánchez Purihuamán, M. N., Caro-Castro, J., & Carreño-Farfán, C. (2023). Biofertilizer based on fish

- waste increases the yield of *Vigna unguiculata* L. Walp, *Zea mays* L., and the rhizospheric microbiota. *Scientia Agropecuaria*, 14(4), 529–538. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2023.044>
- McKenzie-Gopsill, A. G., Amirsadeghi, S., Fillmore, S., & Swanton, C. J. (2020). Duration of Weed Presence Influences the Recovery of Photosynthetic Efficiency and Yield in Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Frontiers in Agronomy*, 2(December), 1–16. <https://doi.org/10.3389/fagro.2020.593570>
- Meenu, M., Chen, P., Mradula, M., Chang, S. K. C., & Xu, B. (2023). New insights into chemical compositions and health-promoting effects of black beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Food Frontiers*, 4(3), 1019–1038. <https://doi.org/10.1002/fft2.246>
- Murga-Orrillo, H., Chuquímez Gonzales, J. K., & Arévalo López, L. A. (2024). Physiological characterization and bioactive compounds of promising accessions of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) in the Peruvian Amazon. *Frontiers in Agronomy*, 6(May), 1–9. <https://doi.org/10.3389/fagro.2024.1392068>
- Murga-Orrillo, H., Chuquimez Gonzales, J. K., Pashanasi Amasifuén, B., & Arévalo López, L. A. (2023). *Vigna unguiculata*: a productive option in the face of climate change? *Frontiers in Agronomy*, 5(November), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fagro.2023.1284173>
- Najarro, J. (2025). *Microorganismos y abonos orgánicos en el rendimiento de tres variedades de frijol negro (Phaseolus vulgaris L.)*, Canaán, 2750 msnm, Ayacucho, 2023 [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Cristobal de Huamanga] Repositorio Institucional de la UNSCH]. <https://repositorio.unsch.edu.pe/server/api/core/bitstreams/faf6f1e5-229d-41fd-a0e5-428856751d53/content>
- Neupane, B. S., Olee, D., Shrestha, D. S., Kharel, G. P., & Koirala, N. (2024). Nutritional and phytochemicals analysis of high-altitude common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars of Nepal. *EFood*, 5(5). <https://doi.org/10.1002/efd2.182>
- Ostria-Gallardo, E., Bascuñán-Godoy, L., & Fernández Del-Saz, N. (2024). Editorial: Nitrogen metabolism in crops and model plant species. *Frontiers in Plant Science*, 15(October), 8–10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1502273>
- Palacio-Márquez, A., OJEDA-BARRIOS, D., JIMÉNEZ-CASTRO, J., PRECIADO-RANGEL, P., HERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ, O. A., & SÁNCHEZ, E. (2021). Biofortification potential in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.): bioactive compounds, antioxidant capacity and physicochemical properties of 155 varieties

- grown in México. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 49(1), 12123. <https://doi.org/10.15835/nbha49112123>
- Pan, L., Liu, M., Kang, Y., Mei, X., Hu, G., Bao, C., Zheng, Y., Zhao, H., Chen, C., & Wang, N. (2023). Comprehensive genomic analyses of *Vigna unguiculata* provide insights into population differentiation and the genetic basis of key agricultural traits. *Plant Biotechnology Journal*, 21(7), 1426–1439. <https://doi.org/10.1111/pbi.14047>
- Parco-Quispe, M., Camacho-Villanueva, A. A., Parco-Quinchori, J. A., & Dionisio-Saldaña, F. E. (2022). Efecto de niveles de aplicación de guano de islas en incremento de frutos de cacao. *Revista Tecnología En Marcha*, 35, 105–114. <https://doi.org/10.18845/tm.v35i2.5595>
- Paudel, D., Dareus, R., Rosenwald, J., Muñoz-Amatriaín, M., & Rios, E. F. (2021). Genome-Wide Association Study Reveals Candidate Genes for Flowering Time in Cowpea (*Vigna unguiculata* [L.] Walp.). *Frontiers in Genetics*, 12(June), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fgene.2021.667038>
- Pauletto, D., Arco-Verde, M. F., Silva, I. C., Lopes, L. S. de S., Araújo, A. J. C., Lucas, F. C. A., Santos, S. F. dos, Vieira, T. A., Dias, C. T. dos S., & Martorano, L. G. (2025). Adoption and Diversity of Agroforestry Systems in the Amazon Biome: A Bibliometric Overview. *Land*, 14(3), 1–26. <https://doi.org/10.3390/land14030524>
- Prado-García, A. A., Acosta-Gallegos, J. A., Montero-Tavera, V., Yáñez-López, R., Ramírez-Pimentel, J. G., & Aguirre-Mancilla, C. L. (2025). Identification of Common Bean Genotypes Tolerant to the Combined Stress of Terminal Drought and High Temperature. *Agronomy*, 15(7), 1–21. <https://doi.org/10.3390/agronomy15071624>
- Rivero-Herrada, M., Gutiérrez-Rivero, E., Granados-Rivas, Y. E., & Cesar Cristóbal. (2020). Influencia de diferentes sistemas agroecológicos en los indicadores químicos de un suelo cultivado de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 38(4), 735–743. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.558>
- Rodríguez Madrera, R., Campa Negrillo, A., & Ferreira Fernández, J. J. (2024). Modulation of the nutritional and functional values of common bean by farming system: organic vs. conventional. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1282427>
- Rubio-Delgado, J., Lavado-Contador, J. F., & Schnabel, S. (2025). Recent spatiotemporal

- dynamics of agroforestry systems in Europe. *Agricultural Systems*, 229(March), 104437. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2025.104437>
- Rubio-Delgado, J., Schnabel, S., Lavado-Contador, J. F., & Schmutz, U. (2024). Small woody features in agricultural areas: Agroforestry systems of overlooked significance in Europe. *Agricultural Systems*, 218(April), 103973. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2024.103973>
- Rutoms. (2025). *Seabird guano for plants: Natural phosphorus organic fertilizer*. Jiangxi. Rutom Biotechnology. <https://rutoms.com/seabird-guano-for-plants/>
- Sardar, H., Hadi, F., Alam, W., Halawani, I. F., Alzahrani, F. M., Saleem, R. A., Cerqua, I., Khan, H., & Capasso, R. (2024). Unveiling the therapeutic and nutritious potential of *Vigna unguiculata* in line with its phytochemistry. *Heliyon*, 10(18), e37911. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37911>
- Schnug, E., Jacobs, F., & Stöven, K. (2018). Guano: The White Gold of the Seabirds. *Seabirds*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.79501>
- Schulte, C. C. M., Ramachandran, V. K., Papachristodoulou, A., & Poole, P. S. (2022). Genome-Scale Metabolic Modelling of Lifestyle Changes in *Rhizobium leguminosarum*. *MSystems*, 7(1), 1–22. <https://doi.org/10.1128/msystems.00975-21>
- Sinharoy, S., Tian, C.-F., & Montiel, J. (2024). Editorial: Plant-rhizobia symbiosis and nitrogen fixation in legumes. *Frontiers in Plant Science*, 15(March), 2022–2024. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1392006>
- Sinkovič, L., Blažica, V., Blažica, B., Meglič, V., & Pipan, B. (2024). How Nutritious Are French Beans (*Phaseolus vulgaris* L.) from the Citizen Science Experiment? *Plants*, 13(2), 314. <https://doi.org/10.3390/plants13020314>
- Suvadra, J. S., Das, S., Nanda, S. R., Mishra, D., Swain, D., Mishra, A., & Dash, M. (2025). G X E interaction and stability analysis for phosphorus use efficiency in fodder cowpea [*Vigna unguiculata* L. Walp] using AMMI-based stability measures. *Range Management and Agroforestry*, 46(02), 281–291. <https://doi.org/10.59515/rma.2025.v46.i2.14>
- Tahiri, O., Beillouin, D., Dumas, P., Prudhomme, R., & Makowski, D. (2025). *Classification of agroforestry systems by photo-interpretation of satellite imagery*. 2(19), 1–24. <https://www.researchsquare.com/article/rs-6000362/v1>
- Thu, T. A., Hien, T. H., & Minh, V. Q. (2023). Improving Bush Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Yield and Quality by Increasing Soil Nutrients with Organic Fertilizer.

- LEGUME RESEARCH - AN INTERNATIONAL JOURNAL*, 46(Of), 482–488.
<https://doi.org/10.18805/LRF-721>
- Torquebiau, E., & Balaguer, F. (2022). For a universal classification of agroforestry [Poster F17]. In *Université de Laval, Québec, Canadá*.
<https://giraf.fsaa.ulaval.ca/evenements-scientifiques/congres-mondial>
- Tsegaye, Y., Chala, A., & Rezene, Y. (2024). Destructive fungal disease survey of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) rust (*Uromyces appendiculatus*) in Southern Ethiopia. *Scientific Reports*, 14(1), 1–11.
<https://doi.org/10.1038/s41598-024-72576-9>
- Uebersax, M. A., Cichy, K. A., Gomez, F. E., Porch, T. G., Heitholt, J., Osorno, J. M., Kamfwa, K., Snapp, S. S., & Bales, S. (2023). Dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.) as a vital component of sustainable agriculture and food security—A review. *Legume Science*, 5(1), 1–13.
<https://doi.org/10.1002/leg3.155>
- Urribarri, W. (2022). *Densidades de plantas y niveles de guano de islas en el rendimiento de frijol (Phaseolus vulgaris L.) Var. Red Kidney, Pichari - 550 msnm Cusco* (Vol. 1) [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Cristobal de Huamanga] Repositorio Institucional de la UNSCH].
<http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/5641>
- Vargas, Y., Mayor-Duran, V. M., Buendia, H. F., Ruiz-Guzman, H., & Raatz, B. (2021). Physiological and genetic characterization of heat stress effects in a common bean RIL population. *PLoS ONE*, 16(4 April), 1–23.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0249859>
- Vásquez, J., Vilca, N., & Malqui, R. (2023). *Catálogo de frijol en regiones andinas del banco de germoplasma del INIA* (Instituto Nacional de Innovación Agraria - INIA (ed.)). <https://hdl.handle.net/20.500.12955/2112>
- Vilchez, E. J. (2024). *FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN LA NODULACIÓN Y EL RENDIMIENTO DE FRIJOL (Phaseolus vulgaris L.) VAR. CANARIO CENTENARIO EN INVERNADERO* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina] Repositorio Institucional de la UNALM].
<https://hdl.handle.net/20.500.12996/6585>
- Villar, N. (2025). *Rendimiento del frejol de grano negro (Phaseolus vulgaris L.) con aplicación de nitrógeno e inoculante. Canaán 2735 msnm - Ayacucho 2023* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Cristobal de Huamanga] Repositorio

- Visscher, A. M., Meli, P., Fonte, S. J., Bonari, G., Zerbe, S., & Wellstein, C. (2024). Agroforestry enhances biological activity, diversity and soil-based ecosystem functions in mountain agroecosystems of Latin America: A meta-analysis. *Global Change Biology*, 30(1). <https://doi.org/10.1111/gcb.17036>
- Wang, Y., Chen, Y. F., & Wu, W. H. (2021). Potassium and phosphorus transport and signaling in plants. *Journal of Integrative Plant Biology*, 63(1), 34–52. <https://doi.org/10.1111/jipb.13053>
- Wibowo, S. W., Santosa, S. J., & Siswadi, S. (2022). DOSIS PUPUK GUANO DAN UREA TERHADAP PERTUMBUHAN DAN HASIL KACANG TUNGGAK (*Vigna unguiculata* L.). *Innofarm:Jurnal Inovasi Pertanian*, 24(2), 77–81. <https://doi.org/10.33061/innofarm.v24i2.7688>
- Xing, Y., & Wang, X. (2024). Precise application of water and fertilizer to crops: challenges and opportunities. *Frontiers in Plant Science*, 15(December), 1–17. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1444560>
- Xu, Q., Li, L., Guo, J., Guo, H., Liu, M., Guo, S., Kuzyakov, Y., Ling, N., Shen, Q., Xu, Q., Li, L., Guo, J., Guo, H., Liu, M., Guo, S., Kuzyakov, Y., Ling, N., & Shen, Q. (2024). *the Enhanced Carbon Use Efficiency in High-Organic Matter Soils*. 15(3), 1–20.
- Zamani, F., Hosseini, N. M., Oveisi, M., Arvin, K., Rabieyan, E., Torkaman, Z., & Rodriguez, D. (2024). Rhizobacteria and Phytohormonal interactions increase Drought Tolerance in *Phaseolus vulgaris* through enhanced physiological and biochemical efficiency. *Scientific Reports*, 14(1), 1–17. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-79422-y>

ANEXOS

Anexo 1. Panel fotográfico

Fotografía 01: Campo experimental para a la instalación del trabajo de investigación.



Fotografía 02: Siembra de los cultivares en estudio.



Fotografía 03: Plantas en pleno desarrollo.



Fotografía 04: Pesaje según dosis de isla según dosis.



Fotografía 05: Aplicación de guano de isla según dosis.



Fotografía 06: Control de comedores de follaje.



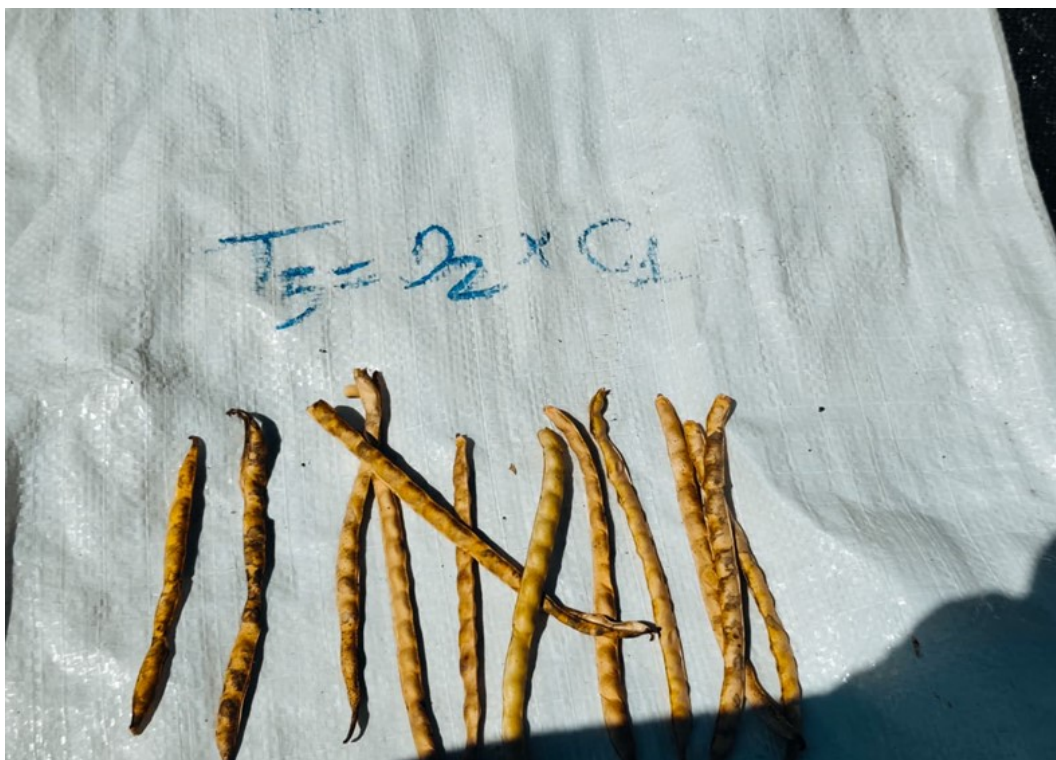
Fotografía 07: Campo experimental en pleno desarrollo e inicio de floración.



Fotografía 08: Cosecha por tratamiento.



Fotografía 09: Evaluación de número de vainas por planta.



Fotografía 10: Evaluación de indicador de cosecha.



Fotografía 11: Evaluación de indicador de cosecha



Anexo 2. Análisis de suelo de la parcela experimental en los laboratorios LABSAF PERLA DEL VRAEM-INIA.



INIA
Instituto Nacional de Innovación Agraria

**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE - 200**



INACAL
DA - Perú
Laboratorio de Ensayo
Perú S.A.

INFORME DE ENSAYO
LABSAF PERLA DEL VRAEM
N° 127232-25 / SU / PV



I. INFORMACIÓN GENERAL

Cliente	: Wendy Elizabeth Ledesma Ramos
Propietario / Productor	: Wendy Elizabeth Ledesma Ramos
Dirección del cliente	: Av. Tupac Amaru- Kimbiri
Solicitado por	: Wendy Elizabeth Ledesma Ramos
Muestreado por	: Reservado por el cliente
Referencia del muestreo	: Reservado por el cliente
Procedencia de muestra(s) (****)	: San Francisco-La Convención-Cusco
Fecha(s) de muestreo (****)	: 2025-09-02
Fecha de recepción de muestra(s)	: 2025-09-05
Lugar de ensayo	: LABSAF PERLA DEL VRAEM
Fecha(s) de análisis	: Del 2025-09-10 al 2025-09-15
Cotización del servicio	: 144-PV-25
Fecha de emisión	: 2025-09-15

II. RESULTADO DE ANÁLISIS

ITEM	1	2	3	4	5	6
Código de Laboratorio	SU10030-PV-25	-	-	-	-	-
Matriz Analizada	Suelo	-	-	-	-	-
Fecha de Muestreo (****)	2025-09-02	-	-	-	-	-
Hora de Inicio de Muestreo (h) (****)	11:00 AM	-	-	-	-	-
Código/identificación de la Muestra por el Cliente (****)	Wendy Elizabeth Ledesma Ramos	-	-	-	-	-
Ensayo	Unidad	LC	Resultados			
pH	unid. pH	0,1	6,2	-	-	-
Conductividad Eléctrica	ms/cm	1,0	6,6	-	-	-
Materia Orgánica	%	0,2	6,4	-	-	-
Fósforo Disponible	mg/kg	0,47	3,47	-	-	-
Acidez Intercambiable	cmol (+)/Kg	0,07	0,09	-	-	-
Aluminio Intercambiable	cmol (+)/Kg	0,07	<0,07	-	-	-
Calcio Intercambiable	cmol (+)/Kg	0,20	16,46	-	-	-
Magnesio Intercambiable	cmol (+)/Kg	0,10	4,30	-	-	-
Sodio Intercambiable	cmol (+)/Kg	0,10	0,29	-	-	-
Potasio Intercambiable	cmol (+)/Kg	0,10	0,36	-	-	-
Textura						
Arena	%	-	46	-	-	-
Arcilla	%	-	19	-	-	-
Limo	%	-	35	-	-	-
Clase Textural	-	-	Franco	-	-	-



Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego

Red de Laboratorios de Suelos, Aguas y Foliare
Acreditado con la Norma
NTP-ISO/IEC 17025:2017
LABSAF Perla del VRAEM
Dirección: Centro Poblado Samanlati - Kimbiri - La Convención - Cusco
Email: labsafperladelvraem@inia.gob.pe

F-45 / Ver.05
www.inia.gob.pe

Página 1 de 2



Instituto Nacional de Innovación Agraria

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE - 200



Registro N° LE - 200

INFORME DE ENSAYO
LABSAF PERLA DEL VRAEM
N° 127232-25 / SU / PV



III. METODOLOGÍA DE ENSAYO

ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA
pH	EPA Method 9045 D Rev. 4 2004 Soil and waste pH
Conductividad Eléctrica	ISO 11265:1994 / Cor 1:1996 1994 Soil quality – Determination of the specific electrical conductivity
Materia Orgánica	NOM-021-RECNAT-2000, 2da Sección, 2002; Item 7.1.7 AS-07 2002 Determinación de Materia Orgánica (AS-07 Walkley y Black)
Fósforo Disponible	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Segunda Sección (31 de Diciembre 2002), Item 7.1.10, AS-11 2002 Determinación de fósforo extraíble en suelos neutros y ácidos (AS 11 Método de Bray y Kurtz)
Acidez y Aluminio Intercambiable	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Segunda Sección (31 de Diciembre 2002), Item 7.3.28, AS-33 2002 Determinación de Acidez y Aluminio Intercambiable (AS-33 método de Cloruro de Potasio)
Calcio Intercambiable	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Segunda Sección (31 de Diciembre 2002), Item 7.1.12, AS-12 2002 Determinación de la capacidad de intercambio catiónico y bases intercambiables del suelo (AS-12 Método de acetato de amonio para calcio intercambiable)
Magnesio Intercambiable	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Segunda Sección (31 de Diciembre 2002), Item 7.1.12, AS-12 2002 Determinación de la capacidad de intercambio catiónico y bases intercambiables del suelo (AS-12 Método de acetato de amonio para magnesio intercambiable)
Sodio Intercambiable	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Segunda Sección (31 de Diciembre 2002), Item 7.1.12, AS-12 2002 Determinación de la capacidad de intercambio catiónico y bases intercambiables del suelo (AS-12 Método de acetato de amonio para sodio intercambiable)
Potasio Intercambiable	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Segunda Sección (31 de Diciembre 2002), Item 7.1.12, AS-12 2002 Determinación de la capacidad de intercambio catiónico y bases intercambiables del suelo (AS-12 Método de acetato de amonio para potasio intercambiable)
Textura	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Segunda Sección (31 de Diciembre 2002), Item 7.1.9, AS-09 2002 Determinación de la textura del suelo (AS-09 Método de Bouyoucos)

IV. CONSIDERACIONES

- Este informe no puede ser reproducido total, ni parcialmente sin la autorización de LABSAF y del cliente.
 - Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo
 - Los resultados se aplican a las muestras, tales como se recibieron
 - Este documento es válido sólo para el producto mencionado anteriormente.
 - El Laboratorio no es responsable cuando la información proporcionada por el cliente pueda afectar la validez de los resultados.
 - Medición de pH realizada a 25 °C.
 - Medición de Conductividad Eléctrica realizada a 25 °C.
- (***) Este dato ha sido proporcionado por el cliente, por lo que el laboratorio no es responsable de dicha información.

V. AUTORIZACIÓN DEL INFORME DE ENSAYO

- El presente Informe de ensayo ha sido autorizado por: Ing. Jesús Emilio Vera Vilchez - Responsable del LABSAF - PERLA DEL VRAEM



Formulario digitalizado por:
ALARCÓN 19079, Arturo Tanta
201 91 885394-048
Modulo: Trazo y el autor del documento
Fecha: 2/11/2025 17:29:07 (GMT)

Firma

Ing. Arturo Alarcon Tanta

Director de la Estación Experimental Agraria Perla del VRAEM

FIN DE INFORME DE ENSAYO



Ministerio de Agricultura e Irrigación



Red de Laboratorios de Suelos, Aguas y Foliare
Acreditado con la Norma
NTP-ISO/IEC 17025:2017

LABSAF Perla del VRAEM

Dirección: Centro Poblado Samanlato - Kimbiri - La Convención - Cusco

Email: labsafperladelvraem@inia.gob.pe

P-45 / Ver.05
www.inia.gob.pe



Instituto Nacional de Innovación Agraria

INFORME DE ENSAYO LABSAF PERLA DEL VRAEM N° 127232-25NA / SU / PV



I. INFORMACIÓN GENERAL

Cliente : Wendy Elizabeth Ledesma Ramos
Propietario / Productor : Wendy Elizabeth Ledesma Ramos
Dirección del cliente : Av. Tupac Amaru- Kimbiri
Solicitado por : Wendy Elizabeth Ledesma Ramos
Muestreado por : Reservado por el cliente
Referencia del muestreo : Reservado por el cliente
Procedencia de muestra(s) (****) : San Francisco-La Convención-Cusco
Fecha(s) de muestreo (****) : 2025-09-02
Fecha de recepción de muestra(s) : 2025-09-05
Lugar de ensayo : LABSAF PERLA DEL VRAEM
Fecha(s) de análisis : Del 2025-12-15 al 2025-12-22
Cotización del servicio : 144-PV-25
Fecha de emisión : 2025-09-19

II. RESULTADO DE ANÁLISIS

ÍTEM	1	2	3	4	5	6
Código de Laboratorio	SU10030-PV-25	-	-	-	-	-
Matriz Analizada	Suelo	-	-	-	-	-
Fecha de Muestreo (****)	2025-09-02	-	-	-	-	-
Hora de Inicio de Muestreo (h) (****)	11:00 AM	-	-	-	-	-
Código/Identificación de la Muestra por el Cliente (****)	Wendy Elizabeth Ledesma Ramos	-	-	-	-	-
Ensayo	Unidad	LC	Resultados			
Potasio Disponible	mg/kg	0,10	143,50	-	-	-

III. METODOLOGÍA DE ENSAYO

ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA
Potasio Disponible	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Segunda Sección (31 de Diciembre 2002). Item 7.1.12. AS-12. EPA 7000 B. Revision 2. 2007). Validado (modificado y aplicado fuera del alcance) 2023 Determinación de potasio disponible en suelos con saturación de acetato de amonio 1N, PH 7.0 // Flame Atomic Absorption Spectrophotometry

IV. CONSIDERACIONES

- Este informe no puede ser reproducido total, ni parcialmente sin la autorización de LABSAF y del cliente.
 - Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo
 - Los resultados se aplican a las muestras, tales como se recibieron
 - Este documento es válido sólo para el producto mencionado anteriormente.
 - El Laboratorio no es responsable cuando la información proporcionada por el cliente pueda afectar la validez de los resultados.
- (**) El (Los) resultado(s) obtenido(s) corresponde(n) a métodos de ensayo que no han sido acreditados por el INACAL-DA, debido a que la muestra no es idónea para el ensayo.

V. AUTORIZACIÓN DEL INFORME DE ENSAYO

- El presente Informe de ensayo ha sido autorizado por: Ing. Jesús Emilio Vera Vilchez - Responsable del LABSAF - PERLA DEL VRAEM



Firmado digitalmente por:
ALARCON TANTA Arturo PAU
2025.09.02 17:28:18.000

Ing. Arturo Alarcon Tanta
Director de la Estación Experimental Agraria Perla del VRAEM
FIN DE INFORME DE ENSAYO



Ministerio de Desarrollo Agrario
Pesero y Riego



Red de Laboratorios de Suelos, Aguas y Foliaves

Acreditado con la Norma
NTP-ISO/IEC 17025:2017

LABSAF Perla del VRAEM

Dirección: Centro Poblado Samariato - Kimbiri - La Convención - Cusco
Email: labsafperladevraem@inia.gob.pe

INTERPRETACIONES DE RESULTADOS DE ANALISIS

CLASIFICACIÓN DE SUELOS SEGÚN VALOR DE PH

pH	Evaluación	Efectos
< 5.0	Fuertemente ácido	Condiciones muy desfavorables
5.1 - 6.3	Moderadamente ácido	Deficiente asimilación de algunos elementos
6.0 - 7.3	Neutro	Efectos tóxicos mínimos
7.4 - 8.5	Medianamente alcalino	Existencia de carbonato cálcico. Deficiente asimilación de algunos nutrientes
> 8.5	Alcalino	Presencia de carbonato sódico. Poca asimilación de algunos nutrientes

CLASIFICACIÓN DE SUELOS SEGÚN EL VALOR DE LA CONDUCTIVIDAD (CE)

CLASIFICACION	CE (mS/m)	Efectos
Normal	< 100	Efecto despreciable de la salinidad. No existe restricción para ningún cultivo, aunque algunos cultivos muy sensibles pueden ser afectados en sus rendimientos.
Muy Ligeramente salino	110 - 200	Los rendimientos de cultivos sensibles pueden verse afectados en sus rendimientos.
Moderadamente salino	210 - 400	Los rendimientos de cultivos pueden verse afectados en sus rendimientos.
Suelo salino	410 - 800	El rendimiento de casi todos los cultivos se ve afectado por esta condición de salinidad.
Fuertemente salino	810 - 1600	Solo lo cultivos muy resistentes a la salinidad pueden crecer en estos suelos.
Muy fuertemente salino	> 1600	Prácticamente ningún cultivo convencional puede crecer económicamente en estos suelos.

Nota: 1 dS/m = 100 mS/m

MATERIA ORGANICA

Clasificación	%MO
Muy Bajo	< 0.5
Bajo	0.6 - 1.5
Medio	1.6 - 3.5
Alto	3.6 - 6.0
Muy Alto	> 6.0

CARBONATO DE CALCIO EQUIVALENTE

Clase	%CaCO ₃
Muy Bajo	< 0.5
Bajo	0.6 - 2.0
Mediano	2.2 - 15
Alto	17 - 40
Muy alto	> 40

CATIONES INTERCAMBIABLES (Ca, Mg, K Cmol/kg)

Clase	Calcio (Ca)	Magnesio (Mg)	Potasio (K)
Muy Baja	< 2.0	< 0.5	< 0.2
Baja	2.0 - 5.0	0.5 - 1.3	0.2 - 0.3
Media	5.0 - 10	1.3 - 3.0	0.3 - 0.6
Alta	> 10	> 3.0	> 0.6

Nota: 1 Cmol/kg = meq/100 g

FÓSFORO (OLSEN)

Clase	mg.kg ⁻¹ de P
Bajo	< 5.5
Medio	5.5 - 11
Alto	> 11

FÓSFORO (BRAY Y KURTZ 1)

Clase	mg.kg ⁻¹ de P
Bajo	< 15
Medio	15 - 30
Alto	> 30

SATURACIÓN DE BASES CAMBIABLES

Calificativo	Saturación de Bases (%)	Efectos
Bajo	< 35	Suelo muy ácido. Aconsejable una enmienda caliza.
Medio	35 - 80	Suelo medio. Su riqueza dependerá de la CIC.
Alto	> 80	Suelo neutro a alcalino. Suelo saturado de bases.

POTASIO

Clasificación	ppm de K
Bajo	< 120
Medio	120 - 240
Alto	240 - 480
Muy alto	> 480

Anexo 3. Costo de producción de una hectárea

cultivar	Castilla		C.U.	98 %
Tratamiento	T1	(0.8*0.20m)	Densidad	62,500 pl. ha ⁻¹
RUBROS	Unidad de Medida	Cantidad por ha⁻¹	Precio unitario	Costo Total /ha⁻¹
I. COSTOS DIRECTOS				8,019
INSUMOS				1,249
Semillas				
Semillas	kg	52	20	1,040
Fertilizantes				
Guano de isla	sacos (50kg)	0	0	0
Plaguicidas				
Vitavax 300 WP	Und	3	48	144
Cyplerklin 25	L	1	65	65
MANO DE OBRA				4,270
Siembra				
Desinfección de semillas	Jornal	1	70	70
Siembra	Jornal	4	70	280
Labores culturales				
Deshierbos	Jornal	10	70	700
Raleo	Jornal	4	70	280
Aplicación de Fungicidas	Jornal	4	70	280
Aplicación de Insecticidas	Jornal	4	70	280
Aplicación de abonos foliares	Jornal	4	70	280
Aporque del cultivo	Jornal	10	70	700
Cosecha				
Cosecha de vainas/desgrane	Jornal	20	70	1,400
PREPARACIÓN				2,100
Preparación de Terreno				
Aradura	jornal	10	70	700
Rastra y Nivelado	jornal	10	70	700
Surqueo	jornal	10	70	700
OTROS GASTOS				400
Transporte	Global	1	400	400
II. COSTOS INDIRECTOS				2,040.95
Herramientas y materiales		1	500	500
Alquiler del terreno (ha)		1	600	600
Análisis de suelo		1	90	90
Asistencia Técnica		1	450	450
Imprevistos (5% CD)		1	520.95	400.95
COSTO TOTAL (\$/.)				10,059.95

cultivar	Canario		C.U.	98 %
Tratamiento	T2	(0.8*0.20m)	Densidad	62,500 pl. ha ⁻¹
RUBROS	Unidad de Medida	Cantidad por ha ⁻¹	Precio unitario	Costo Total /ha ⁻¹
I. COSTOS DIRECTOS				9,079
INSUMOS				2,309
Semillas				
Semillas	kg	105	20	2,100
Fertilizantes				
Guano de isla	sacos (50kg)	0	0	0
Plaguicidas				
Vitavax 300 WP	Und	3	48	144
Cyplerklin 25	L	1	65	65
MANO DE OBRA				4,270
Siembra				
Desinfección de semillas	Jornal	1	70	70
Siembra	Jornal	4	70	280
Labores culturales				
Deshierbos	Jornal	10	70	700
Raleo	Jornal	4	70	280
Aplicación de Fungicidas	Jornal	4	70	280
Aplicación de Insecticidas	Jornal	4	70	280
Aplicación de abonos foliares	Jornal	4	70	280
Aporque del cultivo	Jornal	10	70	700
Cosecha				
Cosecha de vainas/desgrane	Jornal	20	70	1,400
PREPARACIÓN				2,100
Preparación de Terreno				
Aradura	jornal	10	70	700
Rastra y Nivelado	jornal	10	70	700
Surqueo	jornal	10	70	700
OTROS GASTOS				400
Transporte	Global	1	400	400
II. COSTOS INDIRECTOS				2,093.95
Herramientas y materiales		1	500	500
Alquiler del terreno (ha)		1	600	600
Análisis de suelo		1	90	90
Asistencia Técnica		1	450	450
Imprevistos (5% CD)		1	453.95	453.95
COSTO TOTAL (\$/.)				11,172.95

cultivar	Castilla		C.U.	98 %
Tratamiento	T3	(0.8*0.20m)	Densidad	62,500 pl. ha ⁻¹
RUBROS	Unidad de Medida	Cantidad por ha ⁻¹	Precio unitario	Costo Total /ha ⁻¹
I. COSTOS DIRECTOS				10,419
INSUMOS				3,649
Semillas				
Semillas	kg	52	20	1,040
Fertilizantes				
Guano de isla	sacos (50kg)	20	120	2,400
Plaguicidas				
Vitavax 300 WP	Und	3	48	144
Cyplerklin 25	L	1	65	65
MANO DE OBRA				4,270
Siembra				
Desinfección de semillas	Jornal	1	70	70
Siembra	Jornal	4	70	280
Labores culturales				
Deshierbos	Jornal	10	70	700
Raleo	Jornal	4	70	280
Aplicación de Fungicidas	Jornal	4	70	280
Aplicación de Insecticidas	Jornal	4	70	280
Aplicación de abonos foliares	Jornal	4	70	280
Aporque del cultivo	Jornal	10	70	700
Cosecha				
Cosecha de vainas/desgrane	Jornal	20	70	1,400
PREPARACIÓN				2,100
Preparación de Terreno				
Aradura	jornal	10	70	700
Rastra y Nivelado	jornal	10	70	700
Surqueo	jornal	10	70	700
OTROS GASTOS				400
Transporte	Global	1	400	400
II. COSTOS INDIRECTOS				2,160.95
Herramientas y materiales		1	500	500
Alquiler del terreno (ha)		1	600	600
Análisis de suelo		1	90	90
Asistencia Técnica		1	450	450
Imprevistos (5% CD)		1	520.95	520.95
COSTO TOTAL (S/.)				12,579.95

cultivar	Canario		C.U.	98 %
Tratamiento	T4	(0.8*0.20m)	Densidad	62,500 pl. ha ⁻¹
RUBROS	Unidad de Medida	Cantidad por ha ⁻¹	Precio unitario	Costo Total /ha ⁻¹
I. COSTOS DIRECTOS				11,479
INSUMOS				2,309
Semillas				
Semillas	kg	105	20	2,100
Fertilizantes				
Guano de isla	sacos (50kg)	20	120	2,400
Plaguicidas				
Vitavax 300 WP	Und	3	48	144
Cyplerklin 25	L	1	65	65
MANO DE OBRA				4,270
Siembra				
Desinfección de semillas	Jornal	1	70	70
Siembra	Jornal	4	70	280
Labores culturales				
Deshierbos	Jornal	10	70	700
Raleo	Jornal	4	70	280
Aplicación de Fungicidas	Jornal	4	70	280
Aplicación de Insecticidas	Jornal	4	70	280
Aplicación de abonos foliares	Jornal	4	70	280
Aporque del cultivo	Jornal	10	70	700
Cosecha				
Cosecha de vainas/desgrane	Jornal	20	70	1,400
PREPARACIÓN				2,100
Preparación de Terreno				
Aradura	jornal	10	70	700
Rastra y Nivelado	jornal	10	70	700
Surqueo	jornal	10	70	700
OTROS GASTOS				400
Transporte	Global	1	400	400
II. COSTOS INDIRECTOS				2,213.95
Herramientas y materiales		1	500	500
Alquiler del terreno (ha)		1	600	600
Análisis de suelo		1	90	90
Asistencia Técnica		1	450	450
Imprevistos (5% CD)		1	573.95	573.95
COSTO TOTAL (\$/.)				13,692.95

cultivar	Castilla		C.U.	98 %
Tratamiento	T5	(0.8*0.20m)	Densidad	62,500 pl. ha ⁻¹
RUBROS	Unidad de Medida	Cantidad por ha ⁻¹	Precio unitario	Costo Total /ha ⁻¹
I. COSTOS DIRECTOS				11,619
INSUMOS				4,849
Semillas				
Semillas	kg	52	20	1,040
Fertilizantes				
Guano de isla	sacos (50kg)	30	120	3,600
Plaguicidas				
Vitavax 300 WP	Und	3	48	144
Cyplerklin 25	L	1	65	65
MANO DE OBRA				4,270
Siembra				
Desinfección de semillas	Jornal	1	70	70
Siembra	Jornal	4	70	280
Labores culturales				
Deshierbos	Jornal	10	70	700
Raleo	Jornal	4	70	280
Aplicación de Fungicidas	Jornal	4	70	280
Aplicación de Insecticidas	Jornal	4	70	280
Aplicación de abonos foliares	Jornal	4	70	280
Aporque del cultivo	Jornal	10	70	700
Cosecha				
Cosecha de vainas/desgrane	Jornal	20	70	1,400
PREPARACIÓN				2,100
Preparación de Terreno				
Aradura	jornal	10	70	700
Rastra y Nivelado	jornal	10	70	700
Surqueo	jornal	10	70	700
OTROS GASTOS				400
Transporte	Global	1	400	400
II. COSTOS INDIRECTOS				2,220.95
Herramientas y materiales		1	500	500
Alquiler del terreno (ha)		1	600	600
Análisis de suelo		1	90	90
Asistencia Técnica		1	450	450
Imprevistos (5% CD)		1	580.95	580.95
COSTO TOTAL (S/.)				13,839.95

Anexo 4. Cuadro de registro y evaluaciones en campo

Altura de planta a la Madurez fisiológica			Nro de vainas por planta			Longitud de vainas		
C	D	Respuesta m	C	D	Respuesta	C	D	Respuesta cm
c1	d0	0.42	c1	d0	10	c1	d0	15
c1	d0	0.44	c1	d0	10	c1	d0	15
c1	d0	0.45	c1	d0	11	c1	d0	14
c2	d0	0.7	c2	d0	6	c2	d0	10
c2	d0	0.68	c2	d0	6	c2	d0	9
c2	d0	0.71	c2	d0	7	c2	d0	10
c1	d1	0.45	c1	d1	14	c1	d1	17
c1	d1	0.45	c1	d1	12	c1	d1	16
c1	d1	0.46	c1	d1	14	c1	d1	16
c2	d1	0.7	c2	d1	6	c2	d1	8
c2	d1	0.71	c2	d1	6	c2	d1	9
c2	d1	0.72	c2	d1	6	c2	d1	8
c1	d2	0.46	c1	d2	12	c1	d2	18
c1	d2	0.45	c1	d2	13	c1	d2	17
c1	d2	0.47	c1	d2	12	c1	d2	16
c2	d2	0.71	c2	d2	7	c2	d2	8
c2	d2	0.71	c2	d2	6	c2	d2	9
c2	d2	0.7	c2	d2	7	c2	d2	8
c1	d3	0.45	c1	d3	10	c1	d3	18
c1	d3	0.44	c1	d3	12	c1	d3	18
c1	d3	0.46	c1	d3	12	c1	d3	17
c2	d3	0.72	c2	d3	5	c2	d3	11
c2	d3	0.7	c2	d3	6	c2	d3	10
c2	d3	0.7	c2	d3	6	c2	d3	10
c1	d4	0.46	c1	d4	13	c1	d4	15
c1	d4	0.45	c1	d4	12	c1	d4	16
c1	d4	0.46	c1	d4	11	c1	d4	15
c2	d4	0.73	c2	d4	6	c2	d4	9
c2	d4	0.72	c2	d4	5	c2	d4	8
c2	d4	0.71	c2	d4	7	c2	d4	9

Nro de semillas por vaina			Peso de 1000 semillas			Rendimiento kg por Ha		
C	D	Respuesta	C	D	Respuesta g	C	D	Respuesta
c1	d0	10	c1	d0	195	c1	d0	1328.1
c1	d0	10	c1	d0	196	c1	d0	1270.12
c1	d0	9	c1	d0	194	c1	d0	1315.23
c2	d0	6	c2	d0	190	c2	d0	1002.32
c2	d0	5	c2	d0	188	c2	d0	978.5
c2	d0	6	c2	d0	191	c2	d0	993.33
c1	d1	12	c1	d1	245	c1	d1	2234.4
c1	d1	11	c1	d1	243	c1	d1	2120.32
c1	d1	12	c1	d1	244	c1	d1	2078.54
c2	d1	5	c2	d1	240	c2	d1	968.56
c2	d1	6	c2	d1	238	c2	d1	1015.95
c2	d1	6	c2	d1	240	c2	d1	998.45
c1	d2	11	c1	d2	215	c1	d2	1755.2
c1	d2	10	c1	d2	218	c1	d2	1825.95
c1	d2	10	c1	d2	215	c1	d2	1799.61
c2	d2	5	c2	d2	210	c2	d2	971.88
c2	d2	6	c2	d2	208	c2	d2	990.78
c2	d2	6	c2	d2	210	c2	d2	1032.56
c1	d3	11	c1	d3	245	c1	d3	1463.5
c1	d3	11	c1	d3	241	c1	d3	1490.22
c1	d3	10	c1	d3	244	c1	d3	1397.65
c2	d3	7	c2	d3	190	c2	d3	1359.37
c2	d3	6	c2	d3	188	c2	d3	1404.5
c2	d3	7	c2	d3	190	c2	d3	1389.45
c1	d4	10	c1	d4	255	c1	d4	1729.2
c1	d4	11	c1	d4	251	c1	d4	1754.85
c1	d4	10	c1	d4	254	c1	d4	1788.6
c2	d4	5	c2	d4	210	c2	d4	1000
c2	d4	5	c2	d4	208	c2	d4	1120.2
c2	d4	5	c2	d4	211	c2	d4	988.77

**UNSC**FACULTAD DE CIENCIAS
AGRARIAS

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS
Bach. WENDY ELIZABETH LEDESMA RAMOS
R.D. N° 278-2026-UNSCH-FCA-D

En la ciudad de Ayacucho, a los veinticuatro días del mes de julio del año dos mil veintiséis, siendo las diez 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, Mtro. Rodolfo Alca Mendoza como asesor, Ing. Eduardo Robles García y el Mtro. Juan Aníbal Galindo Galindo; actuando como secretario de actas el Mtro. Rodolfo Alca Mendoza, para recibir la sustentación de la Tesis titulado: **Niveles de guano de isla, en el rendimiento de cultivos de frijol (*Phaseolus vulgaris* L. y *Vigna unguiculata* L.), bajo el sistema silvoagrícola, Ayna 590 msnm. Ayacucho, 2025**, para obtener el Título Profesional de Ingeniera Agroforestal, presentado por la Bachiller **WENDY ELIZABETH LEDESMA RAMOS**.

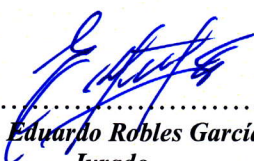
El señor Decano previa verificación de los documentos exigidos solicitó se proceda con la sustentación y posterior defensa de la tesis en un periodo de cuarenta y cinco minutos de acuerdo al reglamento de grados y títulos vigente. Terminado la exposición, los miembros del Jurado, formularon sus preguntas, 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:

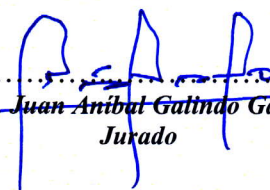
Jurado evaluador	Exposición	Respuestas a las preguntas	Generación de conocimiento	Promedio
Dr. Rolando Bautista Gómez	15	13	14	14
Mtro. Rodolfo Alca Mendoza	17	17	16	17
Ing. Eduardo Robles García	15	15	15	15
Mtro. Juan Aníbal Galindo Galindo	15	15	14	15
PROMEDIO GENERAL				15

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


.....
Mtro. Rodolfo Alca Mendoza
Asesor


.....
Ing. Eduardo Robles García
Jurado


.....
Mtro. Juan Aníbal Galindo Galindo
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 Resolución Decanal N° 0213-2025-UNSCH-FCA; hace constar que el trabajo titulado;

Niveles de guano de isla, en el rendimiento de cultivares de frijol (*Phaseolus vulgaris* L. y *Vigna unguiculata* L.), bajo el sistema silvoagrícola, Ayna 590 msnm. Ayacucho, 2025

Autor : Wendy Elizabeth LEDESMA RAMOS

Asesor : Rodolfo ALCA MENDOZA

Ha sido sometido al control de originalidad mediante el software TURNITIN UNSCH, acorde al Reglamento de originalidad de trabajos de investigación, aprobado mediante la RCU N° 039-2021-UNSCH-CU, arrojando un resultado de **catorce por ciento (14%)** de índice de similitud, realizado sin **depósito de trabajos estándar**.

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

Nota: Se adjunta el resultado con Identificador de la entrega: 3013946237

Ayacucho, 17 de agosto de 2026

M.Sc. Carlos Orlando Huayhua Lobatón
Docente Instructor - EPIAF-FCA

Niveles de guano de isla, en el rendimiento de cultivares de frijol (*Phaseolus vulgaris* L. y *Vigna unguiculata* L.), bajo el sistema silvoagrícola, Ayna 590 msnm. Ayacucho, 2025

por Wendy Elizabeth Ledesma Ramos

Niveles de guano de isla, en el rendimiento de cultivares de frijol (Phaseolus vulgaris L. y Vigna unguiculata L.), bajo el sistema silvoagrícola, Ayna 590 msnm. Ayacucho, 2025

INFORME DE ORIGINALIDAD

14%	15%	5%	5%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.unsch.edu.pe	5%
	Fuente de Internet	
2	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga	2%
	Trabajo del estudiante	
3	repositorio.lamolina.edu.pe	2%
	Fuente de Internet	
4	hdl.handle.net	1%
	Fuente de Internet	
5	repositorio.unsaac.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
6	repositorio.inia.gob.pe	<1%
	Fuente de Internet	
7	www.inia.gob.pe	<1%
	Fuente de Internet	
8	repositorio.unasam.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
9	congresosuelo.inifap.gob.mx	<1%
	Fuente de Internet	
10	repositorio.undac.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
11	repositorio.unc.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
12	alicia.concytec.gob.pe	<1%
	Fuente de Internet	
13	repositorio.utea.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
14	Submitted to Vietnam National University of Agriculture	<1%
	Trabajo del estudiante	

15	María Gabriela Albán, Clara Elena Villacrés Poveda, Diego Geovanny Rodriguez Ortega, Galo Mario Caviedes et al. "Memorias de la 17.a Conferencia Internacional del Lupino / Proceedings of the 17th International Lupine Conference", Archivos Académicos USFQ, 2026 Publicación	<1 %
16	faz.ujed.mx Fuente de Internet	<1 %
17	revistas.unah.edu.cu Fuente de Internet	<1 %
18	cenida.una.edu.ni Fuente de Internet	<1 %
19	edoc.ub.uni-muenchen.de Fuente de Internet	<1 %
20	tesis.unsm.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
21	vsip.info Fuente de Internet	<1 %
22	revistas.uteq.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
23	www.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
24	Submitted to uncedu Trabajo del estudiante	<1 %

Excluir citas
Excluir bibliografía

Activo
Activo

Excluir coincidencias

< 30 words

Niveles de guano de isla, en el rendimiento de cultivares de frijol (*Phaseolus vulgaris* L. y *Vigna unguiculata* L.), bajo el sistema silvoagrícola, Ayna 590 msnm. Ayacucho, 2025

Mtro. Rodolfo Alca Mendoza

Bach. Wendy Elizabeth Ledesma Ramos

Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga

*Contacto: wendy.ledesma.28@unsch.edu.pe

RESUMEN

La investigación se realizó en la localidad de Rosario, distrito de Ayna, La Mar, Ayacucho, a 590 msnm., campaña setiembre-diciembre de 2025. El objetivo fue evaluar cinco niveles de guano de isla (0; 1,0; 1,5; 2,0 y 2,5 t ha⁻¹) sobre variables de precocidad y rendimiento de dos cultivares: frijol Castilla (*Vigna unguiculata* L., c1) y frijol Canario (*Phaseolus vulgaris* L., c2), bajo sistema silvoagrícola con *Pinus radiata* D. Don. Se empleó un Diseño de Bloques Completos Randomizados (DBCR) con arreglo factorial 2C × 5D, tres repeticiones y 30 unidades experimentales. Las variables de rendimiento - altura de planta, número de vainas por planta, longitud de vainas, número de semillas por vaina, peso de 1000 semillas y rendimiento en kg ha⁻¹. Las dosis de guano de isla influyeron significativamente en el rendimiento de ambos cultivares. Para c1, la dosis óptima fue 1,0 t ha⁻¹ (c1d1 = 2 144,42 kg ha⁻¹); para c2, fue 2,0 t ha⁻¹ (c2d3 = 1 384,44 kg ha⁻¹). La interacción cultivar × dosis resultó altamente significativa en rendimiento (F = 139,71; p < 0,0001), vainas por planta (p = 0,0300), longitud de vainas (p = 0,0008), semillas por vaina (p = 0,0191) y peso de 1000 semillas (p < 0,0001). El cultivar frijol Castilla superó estadísticamente al frijol Canario en todos los componentes productivos. Se concluye que *V. unguiculata* con 1,0 t ha⁻¹ de guano de isla constituye la combinación de mayor potencial productivo bajo el sistema silvoagrícola evaluado en la selva alta de Ayacucho.

Palabras clave: *Vigna unguiculata*, *Phaseolus vulgaris*, guano de isla, sistema silvoagrícola, rendimiento, selva alta.

Levels of island guano on the yield of bean cultivars (*Phaseolus vulgaris* L. and *Vigna unguiculata* L.) under a silvo-agricultural system, Ayna 590 masl, Ayacucho, 2025

ABSTRACT

The study was conducted in the town of Rosario, Ayna district, La Mar, Ayacucho, at an elevation of 590 meters above sea level, during the September–December 2025 growing season. The objective was to evaluate five levels of island guano (0; 1.0; 1.5; 2.0; and 2.5 t ha⁻¹) on the variables of early maturity and yield of two cultivars: Castilla bean (*Vigna unguiculata* L., c1) and Canario bean (*Phaseolus vulgaris* L., c2), under a agroforestry system with *Pinus radiata* D. Don. A Randomized Complete Block Design (RCBD) was used with a 2C × 5D factorial arrangement, three replications, and 30 experimental units. The yield variables were plant height, number of pods per plant, pod length, number of seeds per pod, weight of 1,000 seeds, and yield in kg ha⁻¹. The doses of island guano significantly influenced the yield of both cultivars. For c1, the optimal rate was 1.0 t ha⁻¹ (c1d1 = 2,144.42 kg ha⁻¹); for c2, it was 2.0 t ha⁻¹ (c2d3 = 1,384.44 kg ha⁻¹). The cultivar × rate interaction was highly significant for yield ($F = 139.71$; $p < 0.0001$), pods per plant ($p = 0.0300$), pod length ($p = 0.0008$), seeds per pod ($p = 0.0191$), and 1,000-seed weight ($p < 0.0001$). The Castilla bean cultivar statistically outperformed the Canario bean in all yield components. It is concluded that *V. unguiculata* with 1.0 t ha⁻¹ of island guano constitutes the combination with the highest yield potential under the agroforestry system evaluated in the high jungle of Ayacucho.

Keywords: *Vigna unguiculata*, *Phaseolus vulgaris*, island guano, agroforestry system, yield, highland rainforest.

I. INTRODUCCIÓN

La productividad de las leguminosas en sistemas de producción sostenibles depende críticamente de la interacción entre el manejo nutricional y la base genética de los cultivares seleccionados. El frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) presenta una estructura genética compleja dividida en dos acervos principales, el Andino y el Mesoamericano, lo cual es determinante para su adaptación, ya que la domesticación ha generado variaciones significativas en la respuesta de la planta ante la disponibilidad de nutrientes en el suelo (Gioia et al., 2019, p. 2). En la selva alta de Ayacucho, la elección entre diferentes cultivares debe considerar esta herencia, pues la eficiencia en el uso de fertilizantes orgánicos como el guano de isla está estrechamente ligada a la plasticidad fenotípica de cada especie.

Asimismo, la preservación y el estudio de estas especies en áreas rurales marginales, como el distrito de Ayna, cobra una relevancia vital para la seguridad alimentaria regional. Los sistemas silvoagrícolas no solo actúan como refugios de biodiversidad, sino que optimizan el microclima para el desarrollo de cultivos de cobertura (Fiore et al., 2020, p. 2). La implementación de niveles controlados de guano de isla en estos sistemas permite aprovechar la sinergia entre el componente arbóreo y el agrícola, mejorando la estructura del suelo y proporcionando una fuente de nitrógeno de liberación gradual que beneficia tanto a *Phaseolus vulgaris* L. como a *Vigna unguiculata* L.

En el Perú, la producción nacional de frijoles supera las 87 mil toneladas anuales cultivadas por más de 80 mil familias de la agricultura familiar. Las regiones líderes en cosecha son Cajamarca, Huancavelica, Apurímac, Amazonas y Arequipa, destacando también la oferta exportable de más de 20 variedades como el panamito y el canario; a nivel de nuestra región Ayacucho, el frijol como grano seco se mantiene como un cultivo complementario y de rotación en los valles andinos locales, mostrando estabilidad pero supeditado al factor climatológico, sin embargo, la superficie sembrada se estimó como una meta regional de 1,100 a 1,300 hectáreas destinadas a leguminosas de grano seco, incluyendo el frijol y como rendimiento oscila entre 0.9 y 1.2 toneladas por hectárea bajo sistemas tradicionales de secano y riego menor.

Por último, la caracterización del rendimiento bajo estas condiciones específicas de altitud (590 msnm.) responde a la necesidad de generar recomendaciones técnicas basadas en evidencia científica. Estudios recientes subrayan que el éxito de los programas agrícolas depende de la correcta identificación del germoplasma y su comportamiento bajo estrés o fertilización diferenciada (Catarcione et al., 2023, p. 2). En este contexto, la investigación se fundamenta en la necesidad de determinar el nivel óptimo de abono orgánico que maximice la producción de grano en la zona. Bajo estas consideraciones, se plantean los siguientes objetivos de investigación:

Objetivo general

Determinar los niveles de guano de isla en el rendimiento de cultivares de frijol (*Phaseolus vulgaris* L. y *Vigna unguiculata* L.), bajo sistema de producción silvoagrícola, Ayna 590 msnm. Ayacucho, 2025.

Objetivos específicos

1. Determinar los niveles de guano de isla en el rendimiento de cultivares de frijol (*Phaseolus vulgaris* L. y *Vigna unguiculata* L.), bajo sistema de producción silvoagrícola, Ayna 590 msnm. Ayacucho, 2025.
2. Determinar el rendimiento de cultivares de frijol (*Phaseolus vulgaris* L. y *Vigna unguiculata* L.), bajo el sistema de producción silvoagrícola, Ayna 590 msnm. Ayacucho, 2025.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Ubicación del experimento

El desarrollo de la fase experimental se localizó en la localidad de Rosario, perteneciente al distrito de Ayna, provincia de La Mar, en la región de Ayacucho. Geográficamente, el área de investigación se sitúa a una altitud media de 590 m s. n. m., delimitada por las coordenadas UTM84-18S 625001.68 m E y 8605879.57 m S.

2.2. Características edáficas del terreno experimental

Tabla 1

Análisis físico-químico de la muestra de suelo del predio de la localidad de Rosario-Ayna

Componentes	Valor	Interpretación
pH	6.2	Moderadamente ácido
M.O. (%)	8.40	Muy alto
N (%)	3.02	Muy alto
C.I.C. (Cmol(+).kg ⁻¹)	21.50	Alto
K disponible (mg/kg)	143.50	Medio
P disponible (mg/kg)	3.47	Bajo
Arena (%)	46	—
Limo (%)	35	Franco
Arcilla (%)	19	—

Fuente: Laboratorio del INIA-Perla del VRAEM, setiembre 2025.

2.3. Factores en estudio

a) Cultivares de Frijol (c)

c₁: frijol Castilla (*Vigna unguiculata* L.)

c₂: frijol Canario (*Phaseolus vulgaris* L.)

b) Dosis de guano de isla (d)

d₀: 0 ton. ha⁻¹, d₁: 1.0 ton. ha⁻¹, d₂: 1.5 ton. ha⁻¹, d₃: 2.0 ton. ha⁻¹, d₄: 2.5 ton. ha⁻¹

2.4. Tratamientos de estudio

Los tratamientos de estudio fueron el resultado de la combinación de los dos factores en estudio (2 cultivares de frijol x 5 dosis de abonamiento con guano de las islas), haciendo un total de 10 tratamientos, los mismos que se presentan en la tabla 2.

Tabla 2

Tratamientos y combinaciones de los factores a estudiar

Tratamientos	Código	Descripción
T1	d0 x c1	0 t ha ⁻¹ G.I. x frijol castilla
T2	d0 x c2	0 t ha ⁻¹ G.I. x frijol canario
T3	d1 x c1	1.0 t ha ⁻¹ G.I. x frijol castilla
T4	d1 x c2	1.0 t ha ⁻¹ G.I. x frijol canario
T5	d2 x c1	1.5 t ha ⁻¹ G.I. x frijol castilla
T6	d2 x c2	1.5 t ha ⁻¹ G.I. x frijol canario
T7	d3 x c1	2.0 t ha ⁻¹ G.I. x frijol castilla
T8	d3 x c2	2.0 t ha ⁻¹ G.I. x frijol canario
T9	d4 x c1	2.5 t ha ⁻¹ G.I. x frijol castilla
T10	d4 x c2	2.5 t ha ⁻¹ G.I. x frijol canario

2.5. Diseño experimental

El estudio fue conducido utilizando el Diseño de Bloque Completo Randomizado (DBCR) con arreglo factorial 2C*5D con tres repeticiones, haciendo un total de 30 unidades experimentales; siendo el Modelo Aditivo Lineal el siguiente:

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

Donde:

Y_{ijk} : Variable de respuesta de la i-ésima variedad, en el j-ésima densidad de plantas en el k-ésimo bloque.

μ : Media general

α_i : Efecto de la i-ésima cultivar de frijol

β_j : Efecto del j-ésima dosis de abonamiento

γ_k : Efecto del k-ésimo bloque

$(\alpha\beta)_{ij}$: Efecto de interacción de i-ésima de frijol en j-ésima dosis de abonamiento

ε_{ijk} : Error experimental

2.6. Análisis estadístico

Se realizó un análisis correspondiente que incluye análisis de varianza (ANVA) y prueba de contraste de Tukey (0,05) para cada variable evaluado.

2.7. Variables de evaluación

Variables de precocidad

Se realizó una evaluación de las fases del ciclo fenológico de los cultivares en análisis, desde la emergencia hasta la madurez de cosecha, expresados en número de días después de la siembra.

a) Días a la emergencia

Se evaluó el periodo de tiempo desde la siembra hasta que más del 50% de plántulas hayan emergido en la superficie del terreno experimental.

b) Días a la floración

Se consideró los días después de la siembra hasta que se observaron flores en más del 50% de las plantas sembradas en cada parcela experimental.

c) Días a la formación de vainas

Es el tiempo que transcurrió desde la siembra hasta la aparición de las primeras vainas en más del 50% de las plantas en cada parcela.

d) Días a la madurez de cosecha

Se consideró el período de días desde la siembra hasta que se verifique que más del 50 % de vainas sean aptas para la cosecha, situación que sucede cuando estas vainas están bien estructuradas, sin restricciones claras entre las semillas, deben ser pequeñas e inmaduras.

Variables de rendimiento

Se eligió aleatoriamente 10 plantas en cada parcela, en las que se llevaron a cabo diversas evaluaciones programadas durante el proceso de investigación.

a) Altura de planta a la madurez fisiológica (cm)

Esta evaluación se realizó al momento de la de madurez fisiológica, para la cual se utilizó una cinta métrica, midiéndose desde el cuello de la planta hasta el ápice de la planta.

b) Número de vainas por planta (Nº. vainas / planta)

Se contabilizó el número de vainas, durante el proceso de cosecha en cada parcela, se eligieron 10 plantas representativas.

c) Longitud de vainas (cm)

Se evaluó en cada parcela durante la madurez fisiológica, para lo que se empleó un instrumento de medición (cinta métrica). Se tomaron un total de 10 vainas representativas de cada unidad experimental.

d) Número de semillas por vaina (Nº. granos / vaina)

Se registró el número de granos existentes de 10 vainas seleccionadas de forma aleatoria en cada una de las unidades experimentales. Después se calculó los promedios que se utilizaron como resultado.

e) Peso de 1000 semillas (g)

Se contabilizó 1000 semillas para luego pesarlos utilizando una balanza de precisión.

f) Rendimiento (kg. ha⁻¹)

Se registró la cosecha de vainas en la etapa de madurez comercial de cada una de las unidades experimentales cosechadas en tres ocasiones, con el objetivo de conseguir la cosecha total de vainas por parcela, y posteriormente se extrapolar a una hectárea. expresado en kg. ha⁻¹.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Variables de precocidad

Las variables fenológicas se evaluaron conforme a la escala de desarrollo del cultivo, expresando los datos en días después de la siembra (dds). Los tratamientos correspondieron a cinco niveles de guano de isla ($d_0 = 0$, $d_1 = 1.0$, $d_2 = 1.5$, $d_3 = 2.0$ y $d_4 = 2.5$ t ha⁻¹) aplicados a dos cultivares: frijol castilla o caupí (*Vigna unguiculata* L.) y frijol canario (*Phaseolus vulgaris* L.), bajo las condiciones edafoclimáticas de Ayna, a 590 msnm.

3.1.1. Días a la emergencia

Tabla 3

Emergencia (dds). Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm.

Bloque	Castilla (c1)					Canario (c2)				
	Niveles de guano de isla					Niveles de guano de isla				
	d0	d1	d2	d3	d4	d0	d1	d2	d3	d4
I	3	3	3	4	3	6	5	5	5	5
II	3	3	3	4	3	5	6	6	5	6
III	4	3	4	3	3	5	6	5	6	5
Sumatoria	10	9	10	11	9	16	17	16	16	16
Prom. d	3.33	3.00	3.33	3.67	3.00	5.33	5.67	5.33	5.33	5.33
Prom. c	3.27					5.40				

Nota. $d_0 = 0$ t ha⁻¹; $d_1 = 1.0$ t ha⁻¹; $d_2 = 1.5$ t ha⁻¹; $d_3 = 2.0$ t ha⁻¹; $d_4 = 2.5$ t ha⁻¹ de guano de isla.

El período comprendido entre la siembra y la emergencia de plántulas varió entre 3.27 dds en el cultivar frijol Castilla y 5.40 dds en el cultivar frijol Canario. Las dosis de guano de isla no ejercieron influencia apreciable en esta variable, con rangos internos mínimos dentro de cada cultivar (c1: 3.00–3.67 dds; c2: 5.33–5.67 dds).

La mayor velocidad de emergencia de *V. unguiculata* (3.27 dds) refleja los rasgos fenotípicos de precocidad documentados por Paudel et al. (2021) en la colección mini-núcleo de caupí de la Universidad de California-Riverside, quienes, mediante un estudio de asociación del genoma completo (GWAS), identificaron variantes genéticas que modulan la respuesta fotoperiódica y la velocidad de germinación, determinando que los genotipos insensibles al fotoperiodo exhiben emergencia más temprana bajo temperaturas superiores a 24 °C. Murga-Orrillo et al. (2024) confirmaron que accesiones de *V. unguiculata* en la Amazonía peruana (Yurimaguas) registran ciclos vegetativos cortos, con rendimientos de 1.2 a 2.5 t ha⁻¹, atribuidos a la combinación de temperatura elevada y alta fertilidad natural del suelo. Para el cultivar Canario, González et al. (2021) demostraron que el control genético del período inicial del ciclo de *P. vulgaris* involucra múltiples QTL con interacciones epistáticas y ambientales, siendo la temperatura y el fotoperiodo los factores que determinan el período siembra-emergencia en cultivares cultivados en pisos ecológicos de baja altitud.

3.1.2. Días a la floración

Tabla 4

Floración (dds). Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm

Bloque	Castilla (c1) Niveles de guano de isla					Canario (c2) Niveles de guano de isla				
	d0	d1	d2	d3	d4	d0	d1	d2	d3	d4
I	35	35	35	35	35	47	44	45	44	44
II	34	36	34	36	36	46	47	46	47	47
III	35	36	35	35	34	44	44	44	46	45
Sumatoria	104	107	104	106	105	137	135	135	137	136
Prom. d	34.67	35.67	34.67	35.33	35.00	45.67	45.00	45.00	45.67	45.33
Prom. c	35.07					45.33				

Nota. La variación interbloque en c2 (Canario) fue levemente mayor, indicando sensibilidad fotoperiódica de la especie bajo las condiciones del ensayo.

La floración se produjo entre los 35.07 dds (Castilla) y los 45.33 dds (Canario). Las dosis de guano de isla no modificaron sustancialmente esta variable, con variaciones reducidas dentro de cada cultivar (c1: 34.67–35.67 dds; c2: 45.00–45.67 dds).

La precocidad a la floración de *V. unguiculata* (35.07 dds) es congruente con los parámetros fenotípicos descritos por Dareus et al. (2021) al caracterizar la colección mini-núcleo de caupí de UC-Riverside en Florida, donde identificaron amplia diversidad en días a floración y destacaron que los genotipos tipo grano exhiben ciclos reproductivos más cortos. Para el cultivar Canario (45.33 dds), Cavalcante et al. (2020) al describir los estadios fenológicos de *P. vulgaris* mediante la escala BBCH en condiciones tropicales de Brasil, reportaron que el inicio de la floración (estadio BBCH 60) requiere entre 380 y 490 grados-día acumulados desde la siembra, valor consistente con los 45 dds observados bajo la temperatura media de Ayna (590 msnm), y confirmaron que la fertilización no altera la fecha de floración sino la intensidad reproductiva posterior.

3.1.3. Días a la formación de vainas

Tabla 5

Formación de vainas (dds). Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm

Bloque	Castilla (c1) Niveles de guano de isla					Canario (c2) Niveles de guano de isla				
	d0	d1	d2	d3	d4	d0	d1	d2	d3	d4
I	42	42	44	42	42	48	50	48	48	48
II	43	44	43	43	44	51	48	49	51	50
III	42	42	42	42	43	48	50	48	48	49
Sumatoria	127	128	129	127	129	147	148	145	147	147
Prom. d	42.33	42.67	43.00	42.33	43.00	49.00	49.33	48.33	49.00	49.00
Prom. c	42.67					48.93				

Nota. La diferencia entre cultivares (~6.3 días) se mantuvo estable a través de las dosis, reflejando su base genética interespecífica.

La formación de vainas se inició en promedio a los 42.67 dds (frijol Castilla) y 48.93 dds (frijol Canario). La diferencia entre cultivares (≈ 6.3 días) es consistente con la detectada en la floración, indicando un período antesis-cuajado uniforme en ambas especies bajo las condiciones del ensayo.

Murga-Orrillo et al. (2023) evaluaron el caupí con guano de isla como fuente orgánica en Yurimaguas (Perú, 145 msnm) y reportaron que las diferencias entre fuentes de fertilización se expresaron principalmente en variables de rendimiento y biomasa, no en las etapas fenológicas de cuajado temprano, en plena concordancia con los datos del presente trabajo. Maquén-Perleche et al. (2023) en un ensayo con biofertilizante a base de residuos de pescado en *V. unguiculata* en el Perú, observaron igualmente que el inicio de la formación de vainas no difirió estadísticamente entre tratamientos de abonamiento, confirmando que esta etapa está regulada principalmente por factores genéticos. En cuanto a *P. vulgaris*, Thu et al. (2023) al evaluar fertilizantes orgánicos en frijol arbustivo en Vietnam, encontraron que la fertilización orgánica afectó los componentes del rendimiento sin modificar la duración de las etapas fenológicas reproductivas tempranas, incluido el inicio del cuajado de vainas.

3.1.4. Días a la madurez

Tabla 6

Madurez (dds). Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm.

Bloque	Castilla (c1) Niveles de guano de isla					Canario (c2) Niveles de guano de isla				
	d0	d1	d2	d3	d4	d0	d1	d2	d3	d4
I	65	65	67	68	65	96	97	99	96	96
II	67	66	65	65	67	98	96	96	99	97
III	65	65	64	67	65	96	96	99	99	96
Sumatoria	197	196	196	200	197	290	289	294	294	289
Prom. d	65.67	65.33	65.33	66.67	65.67	96.67	96.33	98.00	98.00	96.33
Prom. c	65.73					97.07				

Nota. La diferencia de ≈ 31 días en el ciclo total entre cultivares es de naturaleza interespecífica e independiente de la fertilización orgánica aplicada.

La madurez fisiológica osciló entre 65.73 dds (Castilla) y 97.07 dds (Canario). Esta diferencia de aproximadamente 31 días confirma la marcada precocidad del caupí frente al frijol Canario bajo las condiciones evaluadas.

El ciclo de 65.73 dds del cultivar Castilla es consistente con los ciclos cortos documentados en la Amazonía peruana. Murga-Orrillo et al. (2024) caracterizaron 20 accesiones promisorias de *V. unguiculata* en Yurimaguas y reportaron ciclos de 60 a 80 días con rendimientos de 1.2 a 2.5 t ha⁻¹, destacando la precocidad como atributo adaptativo clave a las condiciones tropicales de baja altitud. Danso et al. (2025) confirmaron que el potencial productivo del caupí (≈ 2.5 t ha⁻¹) se logra en genotipos de ciclo corto con adecuada gestión de la fertilidad, y señalaron que la deficiencia de N extiende el ciclo y reduce el rendimiento.

Para el cultivar Canario (97.07 dds), González et al. 2021) demostraron que el control genético del tiempo a la madurez en frijol andino involucra múltiples QTL de efecto aditivo y epistático, con ciclos de 85 a 110 días en entornos de fotoperiodo corto, rango dentro del cual se ubican los 97.07 dds del presente estudio.

3.2. Variables de rendimiento

Para cada variable de rendimiento se aplicó el Análisis de Varianza (ANOVA) procesado con InfoStat 2020. Ante la detección de diferencias estadísticas significativas, se procedió a la prueba de comparaciones múltiples de Tukey ($\alpha = 0.05$) para la identificación de los grupos estadísticamente distintos entre tratamientos.

3.2.1. Altura de planta

Tabla 7

Análisis de varianza altura de planta (m). Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol

Variable: Altura (m)	N = 30	R ² = 1.00	CV = 1.81%		
F.V.	gl	SC	CM	F	p-valor
Modelo	9	0.50	0.06	500.91	< 0.0001**
Cultivar (c)	1	0.49	0.49	4491.67	< 0.0001**
Dosis (d)	4	0.0016	0.0004	3.59	0.0231*
c × d	4	0.00023	0.00	0.53	0.7149
Error	20	0.00	0.00	—	—
Total	29	0.50	—	—	—

Nota. F.V. = fuente de variación; SC = suma de cuadrados; gl = grados de libertad; CM = cuadrado medio. CV = 1.81 %; * = significativo ($p \leq 0.05$); ** = altamente significativo ($p \leq 0.01$), la interacción c × d no significativa.

Tabla 8

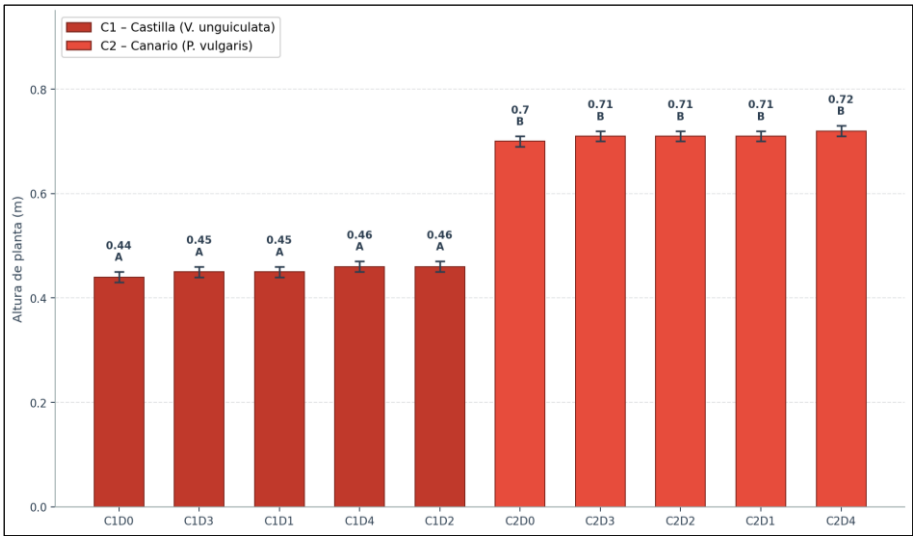
Prueba de Tukey para altura de planta (m). Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol,

Error: 0.0001 gl: 20			
c × d	Media	A	B
c1 × d0	0.44	A	
c1 × d3	0.45	A	
c1 × d1	0.45	A	
c1 × d4	0.46	A	
c1 × d2	0.46	A	
c2 × d0	0.70		B
c2 × d3	0.71		B
c2 × d2	0.71		B
c2 × d1	0.71		B
c2 × d4	0.72		B

Medias con letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Figura 1

Prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$) – Altura de planta (m). Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm.



El ANOVA (Tabla 7) detectó diferencias altamente significativas entre cultivares ($F = 4491.67$; $p < 0.0001$) y entre dosis de guano de isla ($F = 3.59$; $p = 0.0231$), sin que la interacción $c \times d$ resultara significativa ($p = 0.7149$). El CV de 1.81 % confirma la alta homogeneidad experimental. La prueba de Tukey (Tabla 8 y Figura 1) estableció dos grupos estadísticos exclusivos: el cultivar Castilla (grupo A: 0.44–0.46 m) y el cultivar Canario (grupo B: 0.70–0.72 m).

El efecto significativo de las dosis sobre la altura del cultivar Castilla (0.44 a 0.46 m; $p = 0.0231$) es coherente con dicho resultado. Para *P. vulgaris*, Kaur et al. (2024) demostraron que la aplicación integrada de fertilizante orgánico con biofertilizantes incrementó la actividad de dehidrogenasa y fosfatasa alcalina del suelo, mejorando la disponibilidad de N, P y K, factores que potencian el crecimiento en altura de las leguminosas.

3.2.2. Número de vainas por planta

Tabla 9

Análisis de varianza número de vainas por planta. Niveles de guano de isla en 2 cultivares de frijol

Variable: N° vainas planta ⁻¹ N = 30 R ² = 0.95 CV = 8.84%					
F.V.	gl	SC	CM	F	p-valor
Modelo	9	263.33	29.26	46.20	< 0.0001**
Cultivar (c)	1	246.53	246.53	389.26	< 0.0001**
Dosis (d)	4	8.33	2.08	3.29	0.0317*
c × d	4	8.47	2.12	3.34	0.0300*
Error	20	12.67	0.63	—	—
Total	29	276.00	—	—	—

Nota. La interacción $c \times d$ significativa ($F = 3.34$; $p = 0.0300$) indica que el efecto de las dosis sobre el número de vainas difiere cualitativamente entre cultivares.

Tabla 10

Prueba de Tukey – efectos simples para número de vainas por planta. Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm

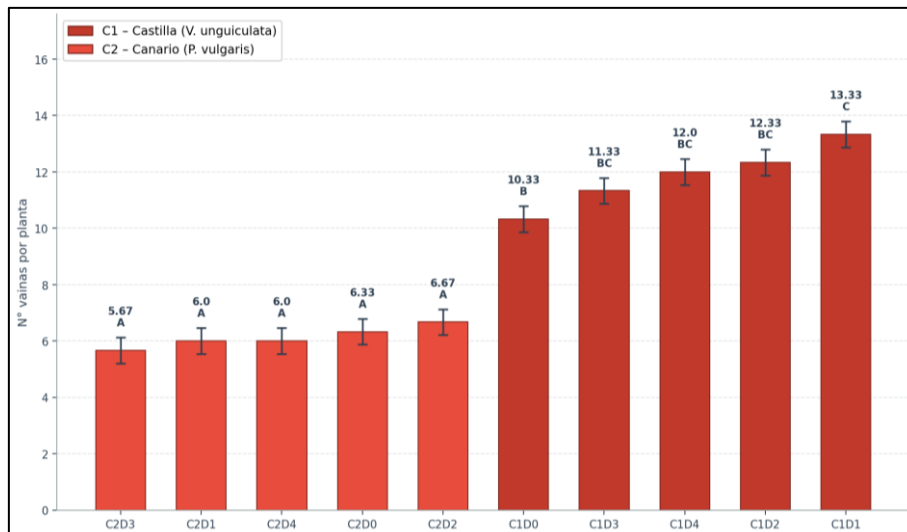
Error: 0.633 gl: 20				
c × d	Media	A	B	C
c2 × d3	5.67	A		
c2 × d1	6.00	A		
c2 × d4	6.00	A		
c2 × d0	6.33	A		
c2 × d2	6.67	A		
c1 × d0	10.33		B	
c1 × d3	11.33		B	C
c1 × d4	12.00		B	C
c1 × d2	12.33		B	C
c1 × d1	13.33			C

Medias con letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Nota. El tratamiento c1d1 (13.33 vainas planta⁻¹) fue el más productivo. La dosis d1 (1.0 t ha⁻¹) de guano de isla optimizó este componente en el cultivar Castilla.

Figura 2

Prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$) – Número de vainas por planta. Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm



El ANOVA (Tabla 9) evidenció diferencias altamente significativas entre cultivares ($F = 389.26$; $p < 0.0001$), entre dosis ($F = 3.29$; $p = 0.0317$) y en la interacción $c \times d$ ($F = 3.34$; $p = 0.0300$), con CV de 8.84 %. La prueba de Tukey (Figura 2) definió tres grupos: el grupo C fue exclusivo de c1d1 (13.33 vainas), el grupo A agrupó todos los tratamientos de c2 (5.67–6.67), y el grupo B los tratamientos restantes del cultivar Castilla.

La superioridad de *V. unguiculata* en número de vainas (10.33–13.33 vs. 5.67–6.67 en *P. vulgaris*) es coherente con los hallazgos en la Amazonía peruana. Murga-Orrillo et al. (2023) constataron que el guano de isla incrementó significativamente los componentes reproductivos del caupí en Yurimaguas, mientras que Danso et al. (2025) demostraron que aplicaciones moderadas de N (equivalentes a la proporcionada por 1.0 t ha⁻¹ de guano de isla al 10–14 % de N) maximizaron la fijación biológica de N y el número de vainas en *V. unguiculata*, en tanto que dosis superiores tendieron a inhibir la nodulación por retroalimentación negativa, explicando por qué c1d1 superó a las dosis mayores.

3.2.3. Longitud de vainas

Tabla 11

Análisis de varianza de la longitud de vainas (cm). Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm.

Variable: longitud de vainas (cm)					
	N = 30	R ² = 0.98	CV = 5.01%		
F.V.	gl	SC	CM	F	p-valor
Modelo	9	408.97	45.44	113.60	< 0.0001**
Cultivar (c)	1	381.63	381.63	954.08	< 0.0001**
Dosis (d)	4	15.47	3.87	9.67	0.0002**
c × d	4	11.87	2.97	7.42	0.0008**
Error	20	8.00	0.40	—	—
Total	29	416.97	—	—	—

Nota. R² = 0.98: el modelo explica el 98 % de la variación total en longitud de vainas. Todos los efectos son altamente significativos

Tabla 12

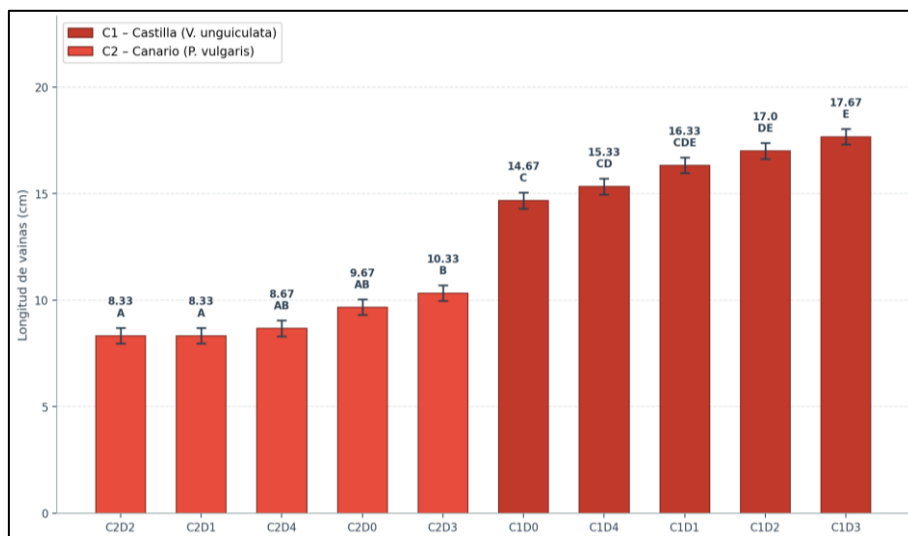
Prueba de Tukey – efectos simples para longitud de vainas (cm). Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm.

Error: 0.4000 gl: 20						
c × d	Media	A	B	C	D	E
c2 × d2	8.33	A				
c2 × d1	8.33	A				
c2 × d4	8.67	A	B			
c2 × d0	9.67	A	B			
c2 × d3	10.33		B			
c1 × d0	14.67			C		
c1 × d4	15.33			C	D	
c1 × d1	16.33			C	D	E
c1 × d2	17.00				D	E
c1 × d3	17.67					E

Medias con letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Figura 3

Prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$) – Longitud de vainas (cm). Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm.



El análisis estadístico (Tabla 11) detectó diferencias altamente significativas para cultivar ($F = 954.08$; $p < 0.0001$), dosis ($F = 9.67$; $p = 0.0002$) e interacción ($F = 7.42$; $p = 0.0008$). La Figura 3 muestra cinco grupos estadísticos; el valor máximo correspondió a c1d3 (17.67 cm) y el mínimo a c2d1 y c2d2 (8.33 cm, grupo A).

La longitud de vainas del cultivar Castilla (14.67–17.67 cm) responde a la morfología característica de *V. unguiculata*. Pan et al. (2023) en un análisis genómico a escala cromosómica que identificó genes candidatos para longitud y anchura de vaina en *V. unguiculata*, confirmaron que la arquitectura genética de este rasgo es multigénica y que los factores ambientales, incluida la fertilización, pueden modular la expresión del rasgo dentro del rango genético del genotipo. La respuesta positiva de c1d3 (17.67 cm) frente a c1d0 (14.67 cm) sugiere que dosis de 2.0 t ha⁻¹ de guano de isla optimizan el desarrollo del pericarpio al incrementar la disponibilidad de K y P durante el llenado de vainas.

3.2.4. Número de semillas por vaina

Tabla 13

Análisis de varianza de número de semillas/vaina. Niveles de guano de isla en 2 cultivares de frijol

Variable: N° semillas vaina ⁻¹	N = 30	R ² = 0.97	CV = 6.73%		
F.V.	gl	SC	CM	F	p-valor
Modelo	9	183.47	20.39	67.95	< 0.0001**
Cultivar (c)	1	172.80	172.80	576.00	< 0.0001**
Dosis (d)	4	6.13	1.53	5.11	0.0053**
c × d	4	4.53	1.13	3.78	0.0191*
Error	20	6.00	0.30	—	—
Total	29	189.47	—	—	—

Tabla 14

Prueba de Tukey – efectos simples para número de semillas por vaina. Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm.

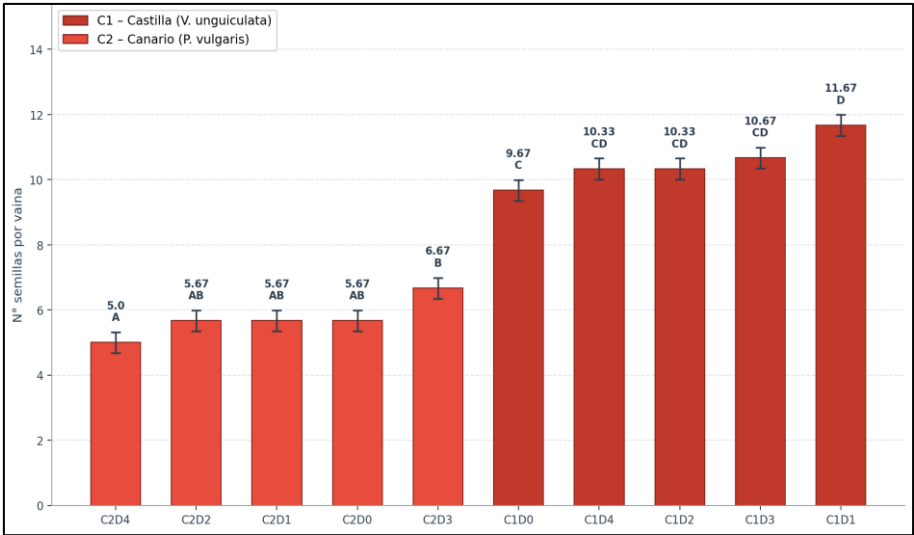
Error: 0.3000 gl: 20					
c × d	Media	A	B	C	D
c2 × d4	5.00	A			
c2 × d2	5.67	A	B		
c2 × d1	5.67	A	B		
c2 × d0	5.67	A	B		
c2 × d3	6.67		B		
c1 × d0	9.67			C	
c1 × d4	10.33			C	D
c1 × d2	10.33			C	D
c1 × d3	10.67			C	D
c1 × d1	11.67				D

Medias con letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Nota. c1d1 registró el mayor número de semillas por vaina (11.67), siendo estadísticamente superior a todos los tratamientos del cultivar Canario.

Figura 4

Prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$) – Número de semillas por vaina. Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm.



El ANOVA (Tabla 13) reveló diferencias altamente significativas para cultivar ($F = 576.00$; $p < 0.0001$), dosis ($F = 5.11$; $p = 0.0053$) e interacción ($F = 3.78$; $p = 0.0191$). La Figura 4 muestra cuatro grupos estadísticos; el tratamiento c1d1 (11.67) ocupó el grupo D de mayor valor, y c2d4 (5.00) el grupo A de menor rendimiento.

El rango de semillas por vaina de *V. unguiculata* (9.67–11.67) es consistente con los datos de accesiones promisorias en la Amazonía peruana. Murga-Orrillo et al. (2024) reportaron

valores entre 8 y 14 semillas por vaina en 20 accesiones de *V. unguiculata* en Yurimaguas, señalando que la fertilización orgánica incrementó este componente en genotipos de alta fijación biológica de N. El resultado óptimo de c1d1 (11.67) se explica por el umbral de respuesta descrito por Danso et al. (2025): dosis moderadas de N (45 kg N ha⁻¹, equivalentes a ≈1.0 t ha⁻¹ de guano de isla) maximizaron la fijación biológica de N y los componentes del rendimiento del caupí, mientras que dosis superiores tendieron a inhibir la nodulación. Para *P. vulgaris* (5.00–6.67 semillas por vaina), Kaur et al. (2024) demostraron que la combinación de fertilizante orgánico y biofertilizante incrementó los parámetros de rendimiento de leguminosas al activar la actividad microbiana del suelo que acelera la mineralización de P y K durante el llenado de grano.

3.2.5. *Peso de 1000 semillas*

Tabla 15

Análisis de varianza del peso de 1000 semillas (g). Niveles de guano de isla en 2 cultivares de frijol

Variable: Peso 1000 semillas (g)					
N = 30 R ² = 1.00 CV = 0.68%					
F.V.	gl	SC	CM	F	p-valor
Modelo	9	15946.03	1771.78	793.33	< 0.0001**
Cultivar (c)	1	3921.63	3921.63	1755.96	< 0.0001**
Dosis (d)	4	8569.87	2142.47	959.31	< 0.0001**
c × d	4	3454.53	863.63	386.70	< 0.0001**
Error	20	44.67	2.23	—	—
Total	29	15990.70	—	—	—

Nota. CV = 0.68 %: > precisión experimental. Todos los efectos son altamente significativos (p < 0.0001), incluida la interacción c × d.

Tabla 16

Prueba de Tukey – efectos simples de peso de 1000 semillas (g). Niveles de guano de isla en frijol

Error: 0.2333 gl: 20								
c × d	Media	A	B	C	D	E	F	G
c2 × d3	189.33	A						
c2 × d0	189.67	A						
c1 × d0	195.00		B					
c2 × d2	209.33			C				
c2 × d4	209.67			C				
c1 × d2	216.00				D			
c2 × d1	239.33					E		
c1 × d3	243.33					E	F	
c1 × d1	244.00						F	
c1 × d4	253.33							G

Nota. Se distinguen 7 grupos estadísticos (A–G). El tratamiento c1d4 (253.33 g) es el único en el grupo G, superior a todos los demás.

Figura 5

Prueba de Tukey – Peso de 1000 semillas (g). Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol



El peso de 1000 semillas presentó la mayor resolución estadística del ensayo con siete grupos diferenciados (A–G). El tratamiento c1d4 (253.33 g) constituyó el único integrante del grupo G. Los menores pesos correspondieron a c2d3 y c2d0 (189.33 y 189.67 g, grupo A).

La respuesta positiva y progresiva del cultivar Castilla (195.00 g en d0 → 253.33 g en d4) está relacionada con la dinámica de mineralización del guano de isla. Geisseler et al. (2021) en su revisión sobre mineralización de N en fertilizantes orgánicos, incluyendo guano de ave marina, demostraron que la liberación de N, P y K del guano sigue una cinética de primer orden con tasas de 50–80 % en las primeras 8 semanas, período que coincide con el llenado de grano en leguminosas; ello explica los incrementos observados en el peso de semillas a mayor dosis en c1. Para el cultivar Canario, el comportamiento no lineal (mínimo en d3 y d0; máximo en d1) concuerda con Diatta et al. (2024) quienes encontraron en cowpea que dosis medias de materia orgánica optimizan el llenado de grano al tiempo que dosis elevadas desvían asimilados al crecimiento vegetativo.

Rendimiento en kg ha⁻¹

Tabla 17

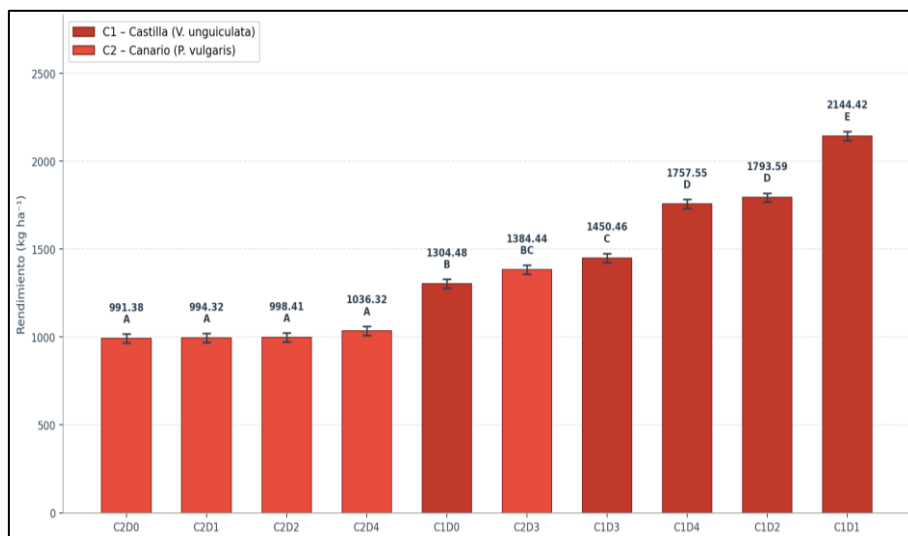
Análisis de varianza del rendimiento en kg ha⁻¹. Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol

Variable: Rendimiento (kg ha ⁻¹)		N = 30	R ² = 0.99	CV = 3.18%	
F.V.	gl	SC	CM	F	p-valor
Cultivar (c)	1	2782746.45	2782746.45	1435.08	< 0.0001**
Dosis (d)	4	549046.59	137261.65	70.79	< 0.0001**
c × d	4	1083651.99	270913.00	139.71	< 0.0001**
Error	20	38781.73	1939.09	—	—
Total	29	4454226.76	—	—	—

Nota. La interacción c × d es de gran magnitud (F = 139.71; p < 0.0001), indicando que el efecto de las dosis sobre el rendimiento es cualitativamente diferente para cada cultivar.

Figura 6

Prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$) – Rendimiento en kg ha^{-1} . Niveles de guano de isla en dos cultivares de frijol, Ayna, 590 msnm.



El ANOVA (Tabla 17) evidenció diferencias altamente significativas en todos los efectos evaluados ($p < 0.0001$). El CV de 3.18 % valida la confiabilidad de los datos. La prueba de Tukey (Figura 6) diferenció cinco grupos, siendo el tratamiento c1d1 ($2144.42 \text{ kg ha}^{-1}$, grupo E) estadísticamente superior a todos los demás.

El rendimiento máximo de c1d1 ($2144.42 \text{ kg ha}^{-1}$) supera el promedio nacional de *V. unguiculata* en el Perú (1376 kg ha^{-1} , reportado por Murga-Orrillo et al. (2023) con base en FAOSTAT y se sitúa dentro del rango de 1.2 a 2.5 t ha^{-1} documentado por Murga-Orrillo et al. (2024) para accesiones promisorias en la Amazonía peruana. Danso et al. (2025) señalaron que el potencial productivo del caupí ($\approx 2.5 \text{ t ha}^{-1}$) requiere adecuada gestión de la fertilidad del suelo, y que aplicaciones equivalentes a 1.0 t ha^{-1} de guano de isla maximizan la fijación biológica de N y el rendimiento, mientras que dosis superiores tienden a inhibir la nodulación, lo que explica el decremento relativo del rendimiento del cultivar Castilla a partir de d2.

Para el cultivar Canario, el mayor rendimiento correspondió a c2d3 ($1384.44 \text{ kg ha}^{-1}$), valor coherente con los hallazgos de Maquén-Perleche et al. (2023) quienes evaluaron biofertilizantes orgánicos en leguminosas en el Perú y encontraron que la fertilización orgánica incrementó significativamente el rendimiento frente al testigo en suelos de la selva amazónica. El rol del guano de isla como fertilizante orgánico completo, con macronutrientes N (10–14 %), P_2O_5 (10–12 %) y K_2O (2–3 %) según Agrorural (2022) ha sido confirmado en sus mecanismos de acción por Geisseler et al. (2021) quienes demostraron que la mineralización progresiva de N del guano de ave durante el ciclo del cultivo garantiza un suministro continuo de nutrientes que favorece las etapas de floración y llenado de grano. Kaur et al. (2024) aportaron evidencia complementaria al demostrar que la materia orgánica activa la microbiología del suelo “en particular la actividad de

dehydrogenasa y fosfatasa alcalina”, mejorando la nutrición y productividad de las leguminosas, efecto particularmente relevante en los suelos ácidos de la selva alta del VRAEM donde los niveles naturales de P disponible suelen ser limitantes para el cultivo del frijol Canario.

CONCLUSIONES

1. La aplicación de guano de isla incidió significativamente ($p < 0,05$) en las variables de rendimiento. La dosis óptima para frijol Castilla (*Vigna unguiculata* L.) fue $1,0 \text{ t ha}^{-1}$, registrando el máximo rendimiento de $2\,144,42 \text{ kg ha}^{-1}$ (c1d1, grupo E; $F = 139,71$; $p < 0,0001$), el mayor número de vainas por planta ($13,33$; c1d1, grupo C), el mayor número de semillas por vaina ($11,67$; c1d1) y, con $2,5 \text{ t ha}^{-1}$, el mayor peso de 1000 semillas ($253,33 \text{ g}$; c1d4, grupo G). La longitud de vainas fue máxima con $2,0 \text{ t ha}^{-1}$ (c1d3 = $17,67 \text{ cm}$). Para frijol Canario (*Phaseolus vulgaris* L.), la dosis de $2,0 \text{ t ha}^{-1}$ produjo el mayor rendimiento (c2d3 = $1384,44 \text{ kg ha}^{-1}$), mientras que los tratamientos sin fertilización orgánica registraron los valores más bajos en ambas especies (c2d0 = $991,38 \text{ kg ha}^{-1}$; c1d0 = $1\,304,48 \text{ kg ha}^{-1}$). La interacción cultivar $\times$ dosis fue altamente significativa en todas las variables de rendimiento ($p < 0,0001$ a $p = 0,0191$), confirmando respuestas diferenciadas según el material genético frente a la fertilización orgánica.
2. El cultivar frijol Castilla (*Vigna unguiculata* L.) presentó mayor precocidad y rendimiento. La emergencia ocurrió a los 3,27 dds en c1 frente a 5,40 dds en c2; la floración a 35,07 y 45,33 dds; la formación de vainas a 42,67 y 48,93 dds; y la madurez fisiológica a 65,73 y 97,07 dds, respectivamente, diferencia de ≈ 31 días de naturaleza interespecífica no modificada por las dosis de fertilización. En componentes del rendimiento, c1 superó estadísticamente a c2 en vainas por planta ($10,33\text{--}13,33$ vs. $5,67\text{--}6,67$; $F = 389,26$; $p < 0,0001$), longitud de vainas ($14,67\text{--}17,67 \text{ cm}$ vs. $8,33\text{--}10,33 \text{ cm}$; $F = 954,08$; $p < 0,0001$), semillas por vaina ($9,67\text{--}11,67$ vs. $5,00\text{--}6,67$; $F = 576,00$; $p < 0,0001$) y rendimiento en grano ($1304,48\text{--}2144,42$ vs. $991,38\text{--}1384,44 \text{ kg ha}^{-1}$; $F = 1435,08$; $p < 0,0001$). El cultivar Canario registró mayor altura de planta ($0,70\text{--}0,72 \text{ m}$ vs. $0,44\text{--}0,46 \text{ m}$; $F = 4491,67$; $p < 0,0001$), rasgo determinado genéticamente. El peso de 1000 semillas fue superior en c1 con dosis crecientes ($195,00\text{--}253,33 \text{ g}$) respecto a c2 ($189,33\text{--}239,33 \text{ g}$), siendo la interacción $c \times d$ altamente significativa ($F = 386,70$; $p < 0,0001$).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agrorural. (2022). *Guano de las islas: el poderoso fertilizante natural que potencia la productividad de los cultivos*. Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. <https://www.gob.pe/institucion/agrorural/noticias/585985>
- Catarcione, G., Paolacci, A. R., Alicandri, E., Gramiccia, E., Taviani, P., Rea, R., Costanza, M. T., De Lorenzis, G., Puccio, G., Mercati, F., & Ciaffi, M. (2023). Genetic Diversity and Population Structure of Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Landraces in the Lazio Region of Italy. *Plants*, 12(4), 744. <https://doi.org/10.3390/plants12040744>
- Cavalcante, A. G., Lemos, L. B., Meirelles, F. C., Cavalcante, A. C. P., & de Aquino, L. A. (2020). Thermal sum and phenological descriptions of growth stages of the common bean according to the BBCH scale. *Annals of Applied Biology*, 176(3), 342–349. <https://doi.org/10.1111/aab.12571>
- Danso, J., Ulzen, J., Ahenkan, M., Ulzen, O. O., Asei, R., Sarkodie-Addo, J., & Appiah-Agyei, C. (2025). Growth and yield response of cowpea [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] to nitrogen fertilizer and inoculant application. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 8(4), 1–17. <https://doi.org/10.1002/agg2.70237>
- Dareus, R., Acharya, J. P., Paudel, D. R., Lopes De Souza, C. H., Tome Gouveia, B., Chase, C. A., DiGennaro, P., Mulvaney, M. J., Koenig, R., & Rios, E. F. (2021). Phenotypic diversity for phenological and agronomic traits in the UC-Riverside cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) mini-core collection. *Crop Science*, 61(5), 3551–3563. <https://doi.org/10.1002/csc2.20544>
- Diatla, A. A., Kanfany, G., Camara, B., Bassène, C., Manga, A. G. B., Seleiman, M., Mbow, C., & Schillaci, C. (2024). Compost as an Alternative to Inorganic Fertilizers in Cowpea [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] Production. *Legume Science*, 6(3). <https://doi.org/10.1002/leg3.247>
- Fiore, M. C., Raimondo, F. M., Mercati, F., Digangi, I., Sunseri, F., & Scialabba, A. (2020). Preserving Biodiversity in Marginal Rural Areas: Assessment of Morphological and Genetic Variability of a Sicilian Common Bean Germplasm Collection. *Plants*, 9(8), 989. <https://doi.org/10.3390/plants9080989>
- Geisseler, D., Smith, R., Cahn, M., & Muramoto, J. (2021). Nitrogen mineralization from organic fertilizers and composts: Literature survey and model fitting. *Journal of Environmental Quality*, 50(6), 1325–1338. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20295>
- Gioia, T., Logozzo, G., Marzario, S., Spagnoletti Zeuli, P., & Gepts, P. (2019). Evolution of SSR diversity from wild types to U.S. advanced cultivars in the Andean and Mesoamerican domestications of common bean (*Phaseolus vulgaris*). *PLOS ONE*,

14(1), e0211342. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0211342>

- González, A. M., Yuste-Lisbona, F. J., Weller, J., Vander Schoor, J. K., Lozano, R., & Santalla, M. (2021). Characterization of QTL and Environmental Interactions Controlling Flowering Time in Andean Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Frontiers in Plant Science*, 11(January), 1–16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.599462>
- Kaur, G., Kaur, J., & Walia, S. S. (2024). Effect of Integrated Nutrient Management on Soil Health, Soil Quality, and Production of Cowpea (*Vigna unguiculata* L.). *Journal of Basic Microbiology*, 64(11). <https://doi.org/10.1002/jobm.202400225>
- Maquén-Perleche, J., Aldana-Carbonel, S., Suárez Muguerza, L., Sánchez Purihuamán, M. N., Caro-Castro, J., & Carreño-Farfán, C. (2023). Biofertilizer based on fish waste increases the yield of *Vigna unguiculata* L. Walp, *Zea mays* L., and the rhizospheric microbiota. *Scientia Agropecuaria*, 14(4), 529–538. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2023.044>
- Murga-Orrillo, H., Chuquímez Gonzales, J. K., & Arévalo López, L. A. (2024). Physiological characterization and bioactive compounds of promising accessions of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) in the Peruvian Amazon. *Frontiers in Agronomy*, 6(May), 1–9. <https://doi.org/10.3389/fagro.2024.1392068>
- Murga-Orrillo, H., Chuquímez Gonzales, J. K., Pashanasi Amasifuén, B., & Arévalo López, L. A. (2023). *Vigna unguiculata*: a productive option in the face of climate change? *Frontiers in Agronomy*, 5(November), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fagro.2023.1284173>
- Pan, L., Liu, M., Kang, Y., Mei, X., Hu, G., Bao, C., Zheng, Y., Zhao, H., Chen, C., & Wang, N. (2023). Comprehensive genomic analyses of *Vigna unguiculata* provide insights into population differentiation and the genetic basis of key agricultural traits. *Plant Biotechnology Journal*, 21(7), 1426–1439. <https://doi.org/10.1111/pbi.14047>
- Paudel, D., Dareus, R., Rosenwald, J., Muñoz-Amatriaín, M., & Rios, E. F. (2021). Genome-Wide Association Study Reveals Candidate Genes for Flowering Time in Cowpea (*Vigna unguiculata* [L.] Walp.). *Frontiers in Genetics*, 12(June), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fgene.2021.667038>
- Thu, T. A., Hien, T. H., & Minh, V. Q. (2023). Improving Bush Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Yield and Quality by Increasing Soil Nutrients with Organic Fertilizer. *LEGUME RESEARCH - AN INTERNATIONAL JOURNAL*, 46(Of), 482–488. <https://doi.org/10.18805/LRF-721>