

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**FACULTAD DE AGRONOMÍA**



**“FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN LA NODULACIÓN Y EL  
RENDIMIENTO DE FRIJOL (*Phaseolus vulgaris* L.) VAR. CANARIO  
CENTENARIO EN INVERNADERO”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE  
INGENIERO AGRÓNOMO**

**JEFFERSON EZEQUIEL VILCHEZ OLIVARES**

**LIMA – PERÚ**

**2024**

# TESIS JEFFERSON VILCHEZ OLIVARES.pdf

## INFORME DE ORIGINALIDAD

<b>16%</b>	<b>14%</b>	<b>9%</b>	<b>6%</b>
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

<b>1</b>	<b>ciencia.lasalle.edu.co</b> Fuente de Internet	<1 %
<b>2</b>	<b>diu.unheval.edu.pe</b> Fuente de Internet	<1 %
<b>3</b>	<b>doaj.org</b> Fuente de Internet	<1 %
<b>4</b>	<b>repositorio.unapiquitos.edu.pe</b> Fuente de Internet	<1 %
<b>5</b>	<b>ciat-library.ciat.cgiar.org</b> Fuente de Internet	<1 %
<b>6</b>	<b>Submitted to Universidad Miguel Hernandez Servicios Informaticos</b> Trabajo del estudiante	<1 %
<b>7</b>	<b>de.wikipedia.org</b> Fuente de Internet	<1 %
<b>8</b>	<b>www.researchgate.net</b> Fuente de Internet	<1 %
<b>9</b>	<b>agraria.pe</b> Fuente de Internet	<1 %

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**“FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN LA NODULACIÓN Y EL  
RENDIMIENTO DE FRIJOL (*Phaseolus vulgaris* L.) VAR. CANARIO  
CENTENARIO EN INVERNADERO”**

**Presentado por:**

**JEFFERSON EZEQUIEL VILCHEZ OLIVARES**

Tesis para optar el título de:

**INGENIERO AGRÓNOMO**

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

---

PhD. Sady Javier García Bendezú

**Presidente**

---

Ing. Mg. Sc. Héctor Baroni Cantaro Segura

**Asesor**

---

Ing. Mg. Sc. Amelia Wite Huaranga Joaquín

**Miembro**

---

Ing. Mg. Sc. Pedro Pablo Gutiérrez Vílchez

**Miembro**

**LIMA – PERÚ**

**2024**

## **DEDICATORIA**

A Dios, por permitirme culminar mi carrera profesional y por guiarme en cada etapa de mi vida; a mis mamás Eulogia Olivares y Pamela Olivares, a mi hermanita Gretty Vílchez, porque me brindaron su apoyo, me ayudaron a crecer como persona y me incentivaron a no rendirme; a mis abuelos Joaquina y Simón (Q.E.P.D.); a mis tíos(as) y primos (as) que siempre están conmigo mostrándome su apoyo y cariño; a mis amigos y a todos aquellos que de alguna manera han sido parte de este logro. A mi tía Marita, a mi princesita Leah y a Robert, sé que estamos pasando un momento muy difícil e inimaginable como familia, pero con la bendición de dios vamos a poder sobrellevarlo y a ser fuertes.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi asesor el Mg. Sc. Ing. Héctor Cántaro, por permitirme desarrollar este estudio en el invernadero del departamento de fitotecnia, muchas gracias por el apoyo, confianza y por cada uno de sus consejos.

Al Mg. Sc. Ing. David Saravia, por haberme proporcionado el invernadero de fitotecnia para poder realizar mi investigación.

A mi mamá Eulogia, a mi mamá Pamela y a mi hermanita Gretty Vílchez, por impulsarme en mi caminar y ser mi apoyo constante, son todo para mí.

A mi abuelita Joaquina y a mi abuelito Simón; a mis tías Hilda, Marita, Cecilia y mis tíos Ciro, Víctor; a mis primos y primas, aunque estén lejos yo los siento que están cerca, gracias por siempre estar para mí y apoyarme.

Finalmente, quisiera agradecer a mi jurado calificador, al Dr. Sady García, a la M. Sc. Ing. Amelia Huaranga y al M. Sc. Ing. Pedro Pablo Gutiérrez, por la ayuda constante en el desarrollo de esta investigación.

# ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
II.	REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
2.1.	CULTIVO DE FRIJOL.....	5
2.1.1.	Origen y taxonomía del frijol.....	5
2.1.2.	Morfología.....	6
2.1.3.	Fenología.....	7
2.1.4.	Hábitos de desarrollo.....	10
2.1.5.	Propiedades nutricionales benéficas del frijol.....	11
2.1.6.	Dispersión global y la importancia del frijol.....	12
2.1.7.	Exigencias del cultivo de frijol.....	13
2.2.	EL NITRÓGENO.....	15
2.2.1.	Importancia.....	15
2.2.2.	Procedencia del nitrógeno edáfico.....	16
2.2.3.	Forma asimilable de nitrógeno en el suelo.....	16
2.2.4.	Nitrógeno en la planta.....	17
2.2.5.	Fertilizantes nitrogenados comerciales.....	17
2.2.6.	Fijación biológica de nitrógeno.....	23
2.2.7.	Relación del nitrógeno mineral frente a la incorporación biológica del nitrógeno en el suelo.....	31
2.3.	ANTECEDENTES.....	33
III.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	35
3.1.	UBICACIÓN DEL EXPERIMENTO.....	35
3.2.	MATERIALES.....	35
3.2.1.	Sustratos inertes.....	35
3.2.2.	Materiales biológicos.....	36
3.3.	TRATAMIENTO DE ESTUDIO.....	37
3.3.1.	Distribución de los tratamientos.....	38
3.3.2.	Materiales de invernadero.....	38
3.4.	MÉTODOS.....	39
3.4.1.	Métodos y procedimientos.....	39
3.4.2.	Variables evaluadas en la investigación.....	41

3.5.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	46
3.5.1.	Diseño experimental .....	46
3.5.2.	Tratamiento estadístico .....	47
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	48
4.1.	EVALUACIONES MORFOFISIOLÓGICAS .....	48
4.1.1.	Altura de planta (cm) .....	52
4.1.2.	Tamaño de la raíz.....	56
4.1.3.	Peso fresco de follaje (g).....	58
4.1.4.	Peso fresco de raíces (g) .....	62
4.1.5.	Peso seco de follaje (g) .....	66
4.1.6.	Peso seco de raíces (g).....	69
4.1.7.	Contenido total de nitrógeno foliar .....	72
4.2.	EVALUACIONES DE LA NODULACIÓN.....	74
4.2.1.	Número de nódulos por planta.....	78
4.2.2.	Área nodular (cm <sup>2</sup> ).....	82
4.2.3.	Forma de nódulos.....	85
4.2.4.	Posición de los nódulos.....	86
4.2.5.	Color interno del nódulo .....	87
4.2.6.	Peso fresco de nódulos (mg).....	89
4.2.7.	Peso seco de nódulos (mg).....	94
4.3.	EVALUACIONES DEL RENDIMIENTO .....	97
4.3.1.	Número de vainas por planta .....	102
4.3.2.	Número de semillas por vaina.....	105
4.3.3.	Peso de cien semillas (g).....	107
4.3.4.	Índice de cosecha (%) .....	110
4.3.5.	Rendimiento de grano seco (g planta <sup>-1</sup> ) .....	113
V.	CONCLUSIONES.....	118
VI.	RECOMENDACIONES .....	119
VII.	BIBLIOGRAFÍA .....	120
VIII.	ANEXOS.....	133

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Hábito de desarrollo del frijol.....	10
Tabla 2. Valor nutricional del frijol Canario. ....	12
Tabla 3. Estructura química, composición, índice de salinidad e índice de acidez de los importantes fertilizantes nitrogenados.....	18
Tabla 4. Propiedades de la vermiculita expandida.....	36
Tabla 5. Fuentes de fertilizantes nitrogenados.....	37
Tabla 6. Cantidad total de aplicación de nitrógeno por maceta.....	38
Tabla 7. Cantidad de aplicación de fertilizantes de fuentes nitrogenados .....	40
Tabla 8. Fertilización fosfatada y potásica .....	41
Tabla 9. Escala de evaluación de la coloración del nódulo .....	43
Tabla 10. Grados de libertad considerando la interacción entre los factores.....	47
Tabla 11. Resultados promedios de las variables morfofisiológicas evaluadas de los tratamientos.....	49
Tabla 12. Cuadro de análisis de varianza de las variables morfofisiológicas evaluadas en la investigación.....	50
Tabla 13. Prueba de comparación de medias de Tukey para evaluar las variables morfofisiológicas en función del factor fuente de nitrógeno.....	50
Tabla 14. Prueba de comparación de medias de Tukey para evaluar las variables morfofisiológicas en función del factor dosis de nitrógeno.....	51
Tabla 15. Prueba de comparación de medias de Tukey de la variable altura de planta (cm) del frijol Canario Centenario .....	54
Tabla 16. Tamaño de la raíz (cm) del frijol Canario Centenario .....	57
Tabla 17. Prueba de comparación de medias de Tukey de la variable peso fresco del follaje (g) del frijol Canario Centenario.....	61
Tabla 18. Prueba de comparación de medias de Tukey de la variable peso fresco de la raíz (g) del frijol Canario Centenario.....	64
Tabla 19. Prueba de comparación de medias de Tukey de la variable peso seco del follaje (g) del frijol Canario Centenario.....	68

Tabla 20. Prueba de comparación de medias de Tukey de la variable peso seco de la raíz (g) del frijol Canario Centenario.....	71
Tabla 21. Contenido de nitrógeno foliar (g) de frijol Canario Centenario .....	72
Tabla 22. Resultados promedios de las variables de la nodulación evaluadas de los tratamientos.....	75
Tabla 23. Cuadro de análisis de varianza de de las variables de la nodulación evaluadas en la investigación. ....	76
Tabla 24. Prueba de comparación de medias de Tukey de las variables de la nodulación en función del factor fuente de nitrógeno.....	76
Tabla 25. Prueba de comparación de medias de Tukey de las variables de nodulación en función del factor dosis de nitrógeno.....	77
Tabla 26. Prueba de comparación de medias de Tukey de la variable número de nódulos en la raíz del frijol Canario Centenario. ....	80
Tabla 27. Prueba de comparación de medias de Tukey de la variable área nodular (cm <sup>2</sup> ) en la raíz del frijol Canario Centenario. ....	84
Tabla 28. Posición de los nódulos en la raíz del frijol Canario Centenario.....	87
Tabla 29. Coloración y nódulos efectivos observados en planta de frijol Canario Centenario.....	88
Tabla 30. Prueba de comparación de medias de Tukey de la variable peso fresco de nódulos (mg) del frijol Canario Centenario.....	92
Tabla 31. Prueba de comparación de medias de Tukey de la variable peso seco de nódulo (mg) del frijol Canario Centenario. ....	96
Tabla 32. Resultados promedios de las variables del rendimiento evaluados en los tratamientos.....	98
Tabla 33. Cuadro de análisis de varianza de de las variables de rendimiento evaluadas en la investigación .....	99
Tabla 34. Prueba de comparación de medias de Tukey de las variables de rendimiento en función del factor fuente de nitrógeno.....	100
Tabla 35. Prueba de comparación de medias de Tukey de las variables de rendimiento en función del factor fuente de nitrógeno.....	101
Tabla 36. Prueba de comparación de medias de Tukey de la variable número de vainas por planta del frijol Canario Centenario. ....	103

Tabla 37. Prueba de comparación de medias de Tukey de la variable número de granos por vaina del frijol Canario Centenario.....	106
Tabla 38. Prueba de comparación de medias de Tukey de la variable peso de 100 semillas (g) del frijol Canario Centenario.....	109
Tabla 39. Prueba de comparación de medias de Tukey de la variable índice de cosecha (%) del frijol Canario Centenario. ....	112
Tabla 40. Prueba de comparación de medias de Tukey de la variable rendimiento (g planta <sup>-1</sup> ) del frijol Canario Centenario.....	115

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema simplificado de la simbiosis rizobio - leguminosa.....	24
Figura 2. Esquema simplificado de la simbiosis rizobio - leguminosa.....	25
Figura 3. Etapas implicadas en el desarrollo de los nódulos en la raíz de una leguminosa.	28
Figura 4. Gráfico de la interrelación entre la fijación biológica de nitrógeno, la combinación con fertilizantes y la absorción bruta de nitrógeno por la planta. ....	32
Figura 5. Aleatorización de las unidades experimentales de los tratamientos.....	38
Figura 6. Efecto de diferentes fuentes de nitrógeno en la altura de planta (cm) del frijol Canario Centenario. ....	52
Figura 7. Efecto de dosis crecientes de nitrógeno en la altura de planta (cm) del frijol Canario Centenario. ....	53
Figura 8. Efecto de fuentes y dosis de nitrógeno en la altura de planta (cm) del frijol Canario Centenario. ....	54
Figura 9. Efecto de diferentes fuentes de nitrógeno en el tamaño de raíz (cm) del frijol Canario Centenario. ....	56
Figura 10. Efecto de dosis crecientes de nitrógeno en el tamaño de la raíz (cm) del frijol Canario Centenario. ....	57
Figura 11. Efecto de fuentes y dosis de nitrógeno en el tamaño de la raíz (cm) del frijol Canario Centenario. ....	58
Figura 12. Efecto de diferentes fuentes de nitrógeno en el peso fresco de follaje (g) del frijol Canario Centenario. ....	59
Figura 13. Efecto de dosis crecientes de nitrógeno en el peso fresco del forraje (g) del frijol Canario Centenario. ....	60
Figura 14. Efecto de fuentes y dosis de nitrógeno en el peso fresco del forraje (g) del frijol Canario Centenario. ....	61
Figura 15. Efecto de diferentes fuentes de nitrógeno en el peso fresco de raíces (g) del frijol Canario Centenario. ....	63
Figura 16. Efecto de dosis crecientes de nitrógeno el peso fresco de raíces (g) del frijol Canario Centenario. ....	64
Figura 17. Efecto de fuentes y dosis de nitrógeno en el peso fresco de raíces (g) del frijol Canario Centenario. ....	65

Figura 18. Efecto de diferentes fuentes de nitrógeno en el peso seco del follaje (g) del frijol Canario Centenario. ....	66
Figura 19. Efecto de dosis crecientes de nitrógeno en el peso seco del follaje (g) del frijol Canario Centenario. ....	67
Figura 20. Efecto de fuentes y dosis de nitrógeno en el peso seco del follaje (g) del frijol Canario Centenario. ....	68
Figura 21. Efecto de diferentes fuentes de nitrógeno en el peso seco de raíces (g) del frijol Canario Centenario. ....	69
Figura 22. Efecto de dosis crecientes de nitrógeno en el peso seco de raíces (g) del frijol Canario Centenario. ....	70
Figura 23. Efecto de fuentes y dosis de nitrógeno en el peso seco de raíces (g) del frijol Canario Centenario. ....	71
Figura 24. Efecto de diferentes fuentes de nitrógeno en el número de nódulos del frijol Canario Centenario. ....	78
Figura 25. Efecto de dosis crecientes de nitrógeno en el número de nódulos del frijol Canario Centenario. ....	79
Figura 26. Efecto de fuentes y dosis de nitrógeno en el número de nódulos del frijol Canario Centenario. ....	80
Figura 27. Efecto de diferentes fuentes de nitrógeno en el área nodular (cm <sup>2</sup> ) del frijol Canario Centenario. ....	82
Figura 28. Efecto de dosis crecientes de nitrógeno en el área nodular (cm <sup>2</sup> ) del frijol Canario Centenario. ....	83
Figura 29. Efecto de fuentes y dosis de nitrógeno en el área nodular (cm <sup>2</sup> ) del frijol Canario Centenario. ....	84
Figura 30. Efecto de diferentes fuentes de nitrógeno en el peso fresco de nódulos (mg) del frijol Canario Centenario. ....	90
Figura 31. Efecto de dosis crecientes de nitrógeno en el peso fresco de nódulos (mg) del frijol Canario Centenario. ....	91
Figura 32. Efecto de fuentes y dosis de nitrógeno en el peso fresco de nódulos (mg) del frijol Canario Centenario. ....	92
Figura 33. Efecto de diferentes fuentes de nitrógeno en el peso seco de nódulos (mg) del frijol Canario Centenario. ....	94
Figura 34. Efecto de dosis crecientes de nitrógeno en el peso seco de nódulos (mg) del frijol Canario Centenario. ....	95

Figura 35. Efecto de fuentes y dosis de nitrógeno en el peso seco de nódulo (mg) del frijol Canario Centenario. ....	96
Figura 36. Efecto de diferentes fuentes de nitrógeno en el número de vainas por planta del frijol Canario Centenario. ....	102
Figura 37. Efecto de dosis crecientes de nitrógeno en el número de vainas por planta del frijol Canario Centenario. ....	103
Figura 38. Efecto de fuentes y dosis de nitrógeno en el número de vainas por planta del frijol Canario Centenario. ....	104
Figura 39. Efecto de diferentes fuentes de nitrógeno en el número de granos por vaina del frijol Canario Centenario. ....	105
Figura 40. Efecto de dosis crecientes de nitrógeno en el número de granos por vaina del frijol Canario Centenario. ....	106
Figura 41. Efecto de fuentes y dosis de nitrógeno en el número de granos por vaina del frijol Canario Centenario. ....	107
Figura 42. Efecto de diferentes fuentes de nitrógeno en el peso de 100 semillas (g) del frijol Canario Centenario. ....	108
Figura 43. Efecto de dosis crecientes de nitrógeno en el peso de 100 semillas (g) del frijol Canario Centenario. ....	109
Figura 44. Efecto de fuentes y dosis de nitrógeno en el peso de 100 semillas (g) del frijol Canario Centenario. ....	110
Figura 45. Efecto de diferentes fuentes de nitrógeno en el índice de cosecha (%) del frijol Canario Centenario. ....	111
Figura 46. Efecto de dosis crecientes de nitrógeno en el índice de cosecha (%) del frijol Canario Centenario. ....	112
Figura 47. Efecto de fuentes y dosis de nitrógeno en el índice de cosecha (%) del frijol Canario Centenario. ....	113
Figura 48. Efecto de diferentes fuentes de nitrógeno en el rendimiento (g/planta) del frijol Canario Centenario. ....	114
Figura 49. Efecto de dosis crecientes de nitrógeno en el rendimiento (g/planta) del frijol Canario Centenario. ....	115
Figura 50. Efecto de fuentes y dosis de nitrógeno en el rendimiento (g/planta) del frijol Canario Centenario. ....	116

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Informe del análisis foliar de nitrógeno .....	133
Anexo 2. Prueba de pH y conductividad de los fertilizantes diluidos en una solución de 400 ml de agua.....	134
Anexo 3. Fotografías de la instalación del proyecto en el invernadero de fitotecnia. ....	135
Anexo 4. Fotografías de las labores de fertilización.....	136
Anexo 5. Fotografía de labores fitosanitarias .....	137
Anexo 6. Análisis de las variables de nodulación con el programa Image J.....	138
Anexo 7. Fotografías de la estructura foliar y radicular del frijol Canario Centenario de acuerdo a la dosis total de nitrógeno por maceta.....	156
Anexo 8. Fotografías de la evaluación en la cosecha .....	160

## RESUMEN

El frijol, un cultivo fundamental para la seguridad alimentaria, ostenta una notable diversidad genética que se traduce en una amplia gama de variedades con características distintivas. En un escenario de creciente demanda, resulta imperativo explorar estrategias sostenibles para incrementar su producción. En este marco, se presenta una investigación que explora la tolerancia de la simbiosis del frijol con la bacteria *Rhizobium* sp., a la combinación de fuentes y dosis de fertilizantes nitrogenados, evaluando su impacto en la formación de nódulos radiculares, el rendimiento y otros parámetros relevantes. La investigación se llevó a cabo bajo un diseño experimental en arreglo factorial 4 x 3 con doce tratamientos y un control, cada uno con 6 repeticiones por tratamiento. Se evaluó la influencia de cuatro tipos de fertilizantes nitrogenados (úrea, fosfato diamónico, nitrato de amonio y sulfato de amonio) en tres dosis de nitrógeno (20, 40 y 80 ppm). Como indicadores de su efectividad en la floración se evaluó las variables morfofisiológicas y nodulares, posteriormente en la cosecha se evaluó las variables de rendimiento. Los resultados revelaron que la dosis más alta de nitrógeno (80 ppm) ocasionó una disminución significativa en la proliferación de nódulos y una inhibición casi total de la fijación biológica de nitrógeno. En contraste, se observó una tendencia al aumento del tamaño y peso seco foliar del frijol a medida que se incrementaba la dosis de nitrógeno. Entre los tratamientos, el que empleó nitrato de amonio a una dosis de 40 ppm de nitrógeno destacó por presentar el mayor rendimiento, con diferencias estadísticas significativas respecto a los demás tratamientos. Esta investigación aporta valiosos conocimientos para optimizar el manejo del cultivo del frijol, promoviendo prácticas agrícolas sostenibles que permitan aumentar la producción sin comprometer la salud del suelo ni del medio ambiente.

**Palabras clave:** nitrógeno, *Rhizobium*, nodulación, frijol, simbiosis

## ABSTRACT

Common bean (*Phaseolus vulgaris* L.), a staple crop for food security, exhibits remarkable genetic diversity, resulting in a wide range of varieties with distinctive characteristics. In a scenario of increasing demand, exploring sustainable strategies to enhance its production is imperative. Within this framework, this research investigates the tolerance of the common bean symbiosis with the bacterium *Rhizobium* sp. to the combination of nitrogen fertilizer sources and doses, evaluating its impact on root nodule formation, yield, and other relevant parameters. The research was conducted under an experimental design in a 4 x 3 factorial arrangement with twelve treatments and one control, each with six replications per treatment. The influence of four types of nitrogen fertilizers (urea, diammonium phosphate, ammonium nitrate, and ammonium sulfate) in three nitrogen doses (20, 40, and 80 ppm). As indicators of its effectiveness in flowering, the morphophysiological and nodular variables were evaluated, later in the harvest the performance variables were evaluated. The results revealed that the highest nitrogen dose (80 ppm) caused a significant decrease in nodule proliferation and an almost complete inhibition of biological nitrogen fixation. In contrast, an increasing trend in bean leaf size and dry weight was observed as the nitrogen dose increased. Among the treatments, the one using ammonium nitrate at a dose of 40 ppm of nitrogen stood out for having the highest yield, with statistically significant differences compared to the other treatments. This research provides valuable knowledge to optimize common bean crop management, promoting sustainable agricultural practices that allow increasing production without compromising the health of the soil or the environment.

**Keywords:** Nitrogen, *Rhizobium*, nodulation, common bean, symbiosis

## I. INTRODUCCIÓN

El frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) constituye un alimento básico en los hogares peruanos, especialmente en las zonas rurales, donde su consumo per cápita anual alcanza los 2,3 kg en la costa, 1,9 kg en la sierra y 5,6 kg en la selva (Manrique, 2016). Este cultivo no solo representa un pilar fundamental para la seguridad alimentaria, sino también una fuente de ingresos económicos para numerosas familias dedicadas a su producción. El frijol destaca por sus valiosas propiedades nutricionales, incluyendo un alto contenido de vitaminas, fibras solubles y proteínas, elementos que contribuyen a la prevención de enfermedades crónicas, digestivas y cardíacas (FAO, 2016).

Para los agricultores, la actividad agrícola representa una vía fundamental para generar ingresos, impulsándolos a buscar constantemente estrategias que optimicen la productividad. En este contexto, se ha observado una tendencia generalizada hacia la adopción de tecnologías sostenibles que no solo mejoren la salud biológica del suelo, sino que también consideren las necesidades y disponibilidad de nutrientes específicos (Tray, 2015).

Los fertilizantes orgánicos e inorgánicos presentan diferencias significativas en cuanto a la disposición de nutrientes para las plantas. Los fertilizantes inorgánicos proporcionan nutrientes de manera rápida, mientras que los orgánicos liberan los nutrientes de forma gradual, especialmente en el caso del nitrógeno orgánico. Una de las principales desventajas de los fertilizantes orgánicos radica en su dependencia de factores ambientales para la liberación de nitrógeno. La transformación del nitrógeno amínico y del nitrógeno heterocíclico presentes en las sustancias orgánicas se lleva a cabo gracias a la acción de microorganismos del suelo (Mengel y Kirkby, 2000).

Los cultivos leguminosos, como el frijol, la soya, el trébol, la alfalfa y la arveja, poseen la capacidad de fijar nitrógeno atmosférico (N<sub>2</sub>) gracias a una simbiosis con bacterias del género *Rhizobium*. Estas bacterias se alojan en nódulos radiculares de las plantas y tienen la habilidad de transformar el nitrógeno atmosférico en formas asimilables por las plantas. En condiciones favorables, estas leguminosas pueden fijar cantidades de nitrógeno que oscilan

entre 15 y 20 kg ha<sup>-1</sup> (FAO, 2002), llegando incluso a alcanzar un máximo de 1000 kg ha<sup>-1</sup> (Paredes, 2013).

En el contexto de la inestabilidad geopolítica generada por el conflicto entre Rusia y Ucrania, se ha evidenciado un alza significativa en los precios de alimentos, fertilizantes y combustibles, lo que ha provocado una desestabilización sin precedentes en las cadenas de suministro globales. Esta situación ha derivado en que millones de personas alrededor del mundo se enfrenten a graves problemas de seguridad alimentaria. De acuerdo con datos de la Red Global de Crisis Alimentarias (GNAFC) y la Red de Sistemas de Información sobre Seguridad Alimentaria y Nutricional (FSIN), en el año 2021, más de 12 millones de individuos en países de América Latina y el Caribe se vieron afectados por esta crisis (GNAFC y FSIN, 2022). En el caso específico del Perú, esta problemática ha desencadenado una serie de consecuencias negativas, incluyendo paros en el sector agrario, un notable incremento en los precios de los alimentos, una preocupante pérdida de rendimiento en la producción agrícola y un decrecimiento del sector económico.

Según el portal web Agencia Agraria de Noticias (León, 2022), el exministro de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI), Andrés Alencastre, citando datos de la Encuesta Nacional Agropecuaria del 2019 (ENA-INEI), indicó que de un total de 2,2 millones de pequeños y medianos productores, solo el 46,7 % (aproximadamente 1,047 millones de productores) utiliza fertilizantes químicos, mientras que el 28,8 % emplea exclusivamente abonos orgánicos.

Asimismo, Alencastre señaló que, de acuerdo con el IV Censo Nacional Agropecuario (IV CENAGRO) realizado en el 2012, se observa una variabilidad significativa en el uso de fertilizantes entre las diferentes regiones del país: costa, sierra y selva. En la costa, el 89,5 % de los productores utilizan fertilizantes, de los cuales el 56,5 % lo hace en cantidades suficientes y el 43,5 % de manera parcial, mientras que solo el 10,5 % no los utiliza. En contraste, en la sierra, el 54,9 % de los productores emplean fertilizantes, con un 19 % utilizándolos en cantidades suficientes y un 35 % de manera parcial, mientras que el 45,1 % restante no los utiliza. En la selva, el uso de fertilizantes es significativamente menor, con solo el 20,7 % de los productores empleándolos, de los cuales el 5,2 % lo hace en cantidades suficientes y el 15,5 % de manera parcial, mientras que el 79,3 % restante no los utiliza. Estos datos sugieren que, en el Perú, si bien la mayoría de los agricultores optan por el uso

de fertilizantes, existe una brecha importante en su adopción y aplicación adecuada entre las diferentes regiones del país.

El alza en los precios de los fertilizantes, junto a su crucial importancia para la agricultura peruana, pone de manifiesto la urgente necesidad de explorar alternativas de fertilización innovadoras. Si bien las fuentes orgánicas o biológicas no siempre alcanzan a cubrir la demanda nutricional para lograr un rendimiento óptimo de producción, los agricultores también señalan que el uso de abonos orgánicos incrementa sus costos logísticos debido al elevado precio del transporte. En el contexto actual, donde la tendencia en la agricultura se centra en aumentar los rendimientos de los cultivos de manera sostenible, las prácticas de fertilización combinada, que combinan fertilizantes inorgánicos con microorganismos del suelo, surgen como una alternativa prometedora.

Estudios académicos, como el de Elsheikh y Elzidany (1996), avalan este enfoque, demostrando que la combinación equilibrada de fertilizantes químicos nitrogenados con *Rhizobium* mejora la eficiencia de la inoculación y el rendimiento en leguminosas. Sin embargo, a pesar de su potencial, aún persiste una falta de comprensión profunda sobre los efectos de los compuestos inorgánicos en los procesos biológicos del suelo. Esta carencia de conocimiento subraya la necesidad apremiante de investigar las reacciones de los fertilizantes sintéticos y sus impactos en el entorno biológico del suelo para un uso más responsable y sostenible.

Esta investigación adquiere una relevancia considerable al centrarse en el impacto de la fertilización nitrogenada en la formación de nódulos y su influencia en el rendimiento de los cultivos. Para tal fin, se llevará a cabo una comparación entre cuatro fuentes de fertilizantes nitrogenados, cada una aplicada en tres dosis crecientes de nitrógeno: 20, 40 y 80 ppm de N, equivalente en campo a 40, 80 y 160 kg/ha de N. La incorporación de un grupo de control permitirá contrastar de manera efectiva los efectos de los diferentes tratamientos. Una vez recolectada la información, se realizará un análisis comparativo exhaustivo con investigaciones similares para validar y respaldar los resultados obtenidos, asegurando así la robustez y confiabilidad del estudio.

**Objetivo general:**

- Evaluar el efecto de la fertilización nitrogenada en el rendimiento del frijol Canario Centenario y en la simbiosis que establece con *Rhizobium* sp.

**Objetivos específicos:**

- Identificar la combinación de fertilizante nitrogenado y dosis de aplicación que maximice la altura de la planta y el peso seco foliar en el frijol Canario Centenario.
- Determinar la combinación de fertilizante nitrogenado y dosis de aplicación que minimice los impactos negativos en la nodulación del frijol Canario Centenario.
- Identificar la combinación de fertilizante nitrogenado y dosis de aplicación que maximice el rendimiento del frijol Canario Centenario.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. CULTIVO DE FRIJOL

#### 2.1.1. Origen y taxonomía del frijol

El cultivo del frijol, con una historia que se remonta a 8.000 años atrás, tiene su origen en América (Gepts, 2002). Esta leguminosa ha sido objeto de profundos estudios desde diversas perspectivas, incluyendo la arqueología, la morfología, la agronomía, la bioquímica y la biología molecular. Estos análisis han permitido identificar tres centros de diversificación para la especie: el Mesoamericano en México, el Norandino en el norte de Perú y Ecuador; y el Surandino en Perú (Singh et al., 1991). Su clasificación taxonómica se encuentra bien definida en diversas categorías (Vilcapoma y Flores, 2003):

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Magnoliopsida

Orden: Fabales

Familia: Fabaceae

Subfamilia: Faboideae

Género: *Phaseolus*

Especie: *Phaseolus vulgaris* L.

Se le llama comúnmente como: frijol, frisol, frejol, frejol, poroto, habichuela, alubia, judía, habilla, feijao, bean, field bean, garden bean, chaucha.

### **2.1.2. Morfología**

El CIAT (1984) caracteriza al frijol como una planta anual de naturaleza herbácea, con raíces fibrosas y fasciculadas que presentan una cofia. El sistema radicular de la planta está ampliamente desarrollado y consta de una raíz primaria y numerosas raíces secundarias que se encuentran cerca de la superficie del suelo (Baque, 2014). Su tallo es herbáceo, erecto, semiprostrado o prostrado, con una forma cilíndrica o angular, surge del meristemo apical que se encuentra en el embrión de la semilla. Durante la germinación y las fases iniciales de crecimiento de la planta, este meristemo exhibe una pronunciada dominancia apical, lo que lleva a la formación de nudos durante su proceso de desarrollo (Vásquez, Vilca y Malqui, 2023). Los tallos pueden ser subglabro o pubescente, que no superan el metro de altura y son sólidos. Las ramas jóvenes pueden tener una pelusa escasa a densa, con la presencia de pelos uncinados, y se presentan en tonos verde, rosado o morado CIAT (1984).

Las hojas del frijol se ubican en los nudos del tallo, acompañadas de estípulas que sirven como característica importante en la clasificación de leguminosas y ramas. Estas estipulaciones se clasifican en dos tipos: simples o compuestas (Vásquez, Vilca y Malqui, 2023). Las hojas primarias son simples, opuestas, con forma de corazón, unifoliadas, con aurículas y puntiagudas, y estípulas bífidas. Las hojas verdaderas son compuestas y tienen tres folíolos (trifoliadas), son alternas, con pecíolos de forma ovalada, triangular o en forma de corazón, sin aurículas, y son glabras o ligeramente peludas. Los pecíolos, que pueden considerarse como pulvínulos, tienen una longitud de 1.5 a 2.5 mm y presentan estípulas de 4 mm de longitud: dos en el foliolo terminal y una en cada foliolo lateral, ubicadas en la base de los pecíolos. Las estípulas son persistentes (CIAT, 1984).

Las inflorescencias del frijol se ubican en las axilas o en los extremos, albergando de 1 - 3 flores cada una, sostenidas por un pedúnculo de longitud variable, que oscila entre 0 - 5 cm. Estas inflorescencias presentan brácteas evidentes de unos 3 mm de largo, acompañadas de bractéolas de 5 - 6 mm. Las flores muestran una disposición zigomorfa, con un pedicelo sin vellosidades de 3 - 10 mm. El cáliz, gamosépalo y con forma de campana, exhibe una superficie ligeramente vellosa, junto con dos bractéolas ovoides con múltiples nervaduras. La corola, conformada por cinco pétalos, sigue una estructura papilionácea, compuesta por estandarte, alas y quilla; dos pétalos se fusionan en la base, mientras que los tres restantes permanecen separados, mostrando tonalidades que pueden variar entre el blanco, verde, rosado o púrpura. En cuanto al androceo, está compuesto por nueve estambres, siendo

diadelfos, es decir, nueve estambres fusionados y uno libre, con filamentos libres de vellosidades. El gineceo, de posición súpero, presenta un ovario comprimido de una sola cámara, estilos cilíndricos y ligeramente curvados, así como un estigma terminal lateral interno, que exhibe una serie de pelos dispuestos como una brocha (CIAT, 1984).

El fruto es una legumbre que se presenta en forma de vainas lisas con diminutos pelos, una epidermis con aspecto ceroso, y tiene una apertura explosiva o elástica. La fruta muestra una notable curvatura, siendo muy encorvada, doblada o con una forma semilunar (CIAT, 1984). Las semillas se originan a partir de un óvulo campilótropo, carece de albúmina (exalbuminosa) y almacena sus reservas nutricionales principalmente en los cotiledones, sin albúmina externa, tienen una longitud de 1 - 1.2 cm y pueden ser cilíndricas, ovoides o redondeadas, con una superficie lisa y diversos colores (Vásquez, Vilca y Malqui, 2023).

### **2.1.3. Fenología**

El ciclo de vida del frijol abarca múltiples etapas, desde la emergencia de la semilla hasta la senescencia de la planta, y la transición entre cada una varía en velocidad, influida por factores genéticos (variedad), hábitat de crecimiento, temperatura y características del suelo, Camarena et al. (2009). Cada fase de desarrollo conlleva cambios en el tamaño, morfología, composición química y hormonal de la planta. Estos cambios pueden afectar la respuesta de la planta ante diversos factores ambientales, como enfermedades, sequías, fertilización o defoliación, y esta respuesta varía según la etapa fenológica en la que se encuentre la planta.

El ciclo de desarrollo del frijol se segmenta en dos fases consecutivas: una fase vegetativa y otra reproductiva, según lo señalado por el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT, 1982). Cada una de estas fases es crucial y determina aspectos clave del crecimiento y la producción de la planta durante su ciclo de vida.

#### **2.1.3.1. Fase vegetativa**

Comienza cuando la semilla tiene las condiciones propicias para germinar y concluye con la aparición de los primeros brotes florales. Este periodo se compone de cinco etapas, en las cuales destacaremos las características más significativas:

La etapa V0, que corresponde a la germinación, la semilla dispone de la humedad requerida para su activación (CIAT, 1982). Durante este proceso, se registra un aumento en la actividad respiratoria de la semilla, ya que comienza la translocación de nutrientes y se inicia la

formación de nuevos tejidos. Aunque el peso seco de la semilla disminuye, los tejidos experimentan un aumento en su volumen (CIAT, 1988a).

La etapa V1, correspondiente a la emergencia comienza cuando aproximadamente la mitad de los cotiledones de las plántulas del cultivo emergen del suelo, se caracteriza por el enderezamiento del hipocótilo, el cual crece hasta alcanzar su tamaño máximo. Simultáneamente, las hojas primarias, presentes en el embrión de la semilla, se expanden y aumentan en tamaño (CIAT, 1982). Además, durante esta fase, se da inicio a la diferenciación floral y se pueden observar botones florales en una escala microscópica (CIAT, 1982).

La etapa V2, comienza cuando aproximadamente la mitad de las plantas en el cultivo despliegan sus hojas primarias, se caracteriza por la aparición de estas estructuras foliares. Al principio de esta fase, es posible observar la diferenciación de la yema terminal en el tallo principal, ubicada entre las dos hojas primarias, según la descripción del Centro Internacional de Agricultura Tropical (Íbid).

La etapa V3, comienza cuando aproximadamente la mitad del cultivo ha desarrollado su primera hoja trifoliada, se caracteriza por la presencia de una segunda hoja trifoliada aún pequeña, mientras que los cotiledones, en su totalidad, se secan y tienden a desprenderse. Al finalizar esta etapa, se da inicio a la formación de la primera rama, la cual emerge típicamente de la yema ubicada en la base de la primera hoja trifoliada, según la descripción proporcionada por el Centro Internacional de Agricultura Tropical en 1982 (Íbid).

La etapa V4, comienza cuando aproximadamente la mitad de las plantas en el cultivo ha desarrollado su tercera hoja trifoliada. En la axila de cada hoja, se localiza un conjunto de tres yemas que originan estructuras vegetativas y/o reproductivas. Se considera que esta etapa representa la fase vegetativa más prolongada dentro del ciclo de desarrollo del cultivo (Íbid).

#### **2.1.3.2. Fase reproductiva**

Comienza con el surgimiento de los primeros brotes florales y concluye cuando el grano alcanza la madurez requerida para la cosecha. Aunque esta fase está principalmente centrada en la reproducción, en este período las variedades indeterminadas (tipos II, III y IV) aún generan estructuras vegetativas, aunque en menor medida (CIAT, 1982).

Se compone de cinco etapas:

La etapa R5, conocida como prefloración, comienza cuando el 50 % de las plantas exhiben los primeros botones florales en variedades de tipo I o los primeros racimos en aquellas con un hábito de crecimiento indeterminado. Al concluir esta etapa, los pedúnculos de los racimos experimentan un notable alargamiento, mientras las corolas emergen con gracia entre las bractéolas, adquiriendo la distintiva pigmentación que caracteriza a la variedad (Íbid).

La etapa R6, conocida como floración, comienza cuando el 50 % de las plantas ha desplegado su primera flor. En las variedades de tipo I, el inicio de la floración se manifiesta en el último nudo del tallo principal, extendiéndose de manera descendente. Por otro lado, en las variedades indeterminadas, este proceso se inicia en la parte inferior de la planta, desplegándose progresivamente hacia la parte superior (Íbid).

La etapa R7, conocida como formación de vainas, comienza cuando el 50 % de las plantas del cultivo exhibe la primera vaina visible. A lo largo de este período, la corola puede optar por mantenerse dentro de la vaina o desprenderse de su extremo inferior. La conclusión de esta fase tiene lugar cuando la vaina alcanza su longitud máxima, marcando así el progreso vital en el desarrollo de las plantas (Íbid).

La etapa R8, conocida como llenado de vainas, comienza cuando la primera vaina en el 50 % de las plantas cesa su alargamiento y da inicio al proceso de llenado mediante el crecimiento de las semillas. En el caso de las variedades indeterminadas, este periodo no sólo marca el cierre del desarrollo vegetativo, sino también el comienzo del fenómeno de defoliación, este crucial momento representa la transición de la planta hacia la fase de maduración y reproducción (Íbid).

La etapa R9, conocida como maduración, comienza cuando la primera vaina en el 50 % de las plantas experimenta un cambio de color, pasando del verde al amarillo. En este período, las hojas inferiores adquieren tonalidades amarillas y se desprenden. Simultáneamente, el contenido de humedad en el grano disminuye gradualmente hasta alcanzar aproximadamente un 15 %, momento en el cual adquiere su distintivo color característico, este fenómeno marca el punto culminante en la evolución de la planta, señalando la fase final de su ciclo de desarrollo (Íbid).

#### 2.1.4. Hábitos de desarrollo

El CIAT (1984), citado por Arias et al. (2007), destaca que el hábito de desarrollo resulta de la compleja interacción de diversos rasgos dentro de una planta. Es crucial reconocer que el ambiente ejerce una influencia significativa sobre estos rasgos, lo que, en última instancia, repercute en el desarrollo final del crecimiento de la planta.

Cuatro categorías distintivas de hábitos de crecimiento (Tipos I, II, III y IV) son identificadas y detalladas en la **tabla 1**. Los tres primeros son comúnmente observados en las regiones costeras, mientras que el tipo IV prevalece predominantemente en áreas de sierra y selva. La clasificación del hábito de desarrollo se define como determinado si, al inicio de la fase reproductiva, el tallo y las ramas concluyen en un racimo, y como indeterminado si finalizan en un meristemo vegetativo. Este discernimiento proporciona una valiosa comprensión de las adaptaciones específicas de las plantas a distintos entornos geográficos.

**Tabla 1: Hábito de desarrollo del frijol**

<b>Tipos</b>	<b>Hábito de desarrollo</b>	<b>Análisis</b>
Tipo I	Determinado arbustivo	Los tallos y las ramas culminan en inflorescencias bien desarrolladas con unos pocos entrenudos generalmente cortos. La fase de floración es breve, y la madurez de todas las vainas se alcanza prácticamente simultáneamente.
Tipo II	Indeterminado arbustivo	Los tallos son erectos, no trepan (extremos con guías cortas). Tienen un bajo número de ramas y no generan guías. A pesar de ello, las plantas siguen creciendo, aunque su ritmo es más pausado.
Tipo III	Indeterminado postrado	Una planta postrada o semipostrada con entrenudos, tallos y puntas de las ramas bien ramificados y orientados. Las diferencias en la arquitectura de la planta se atribuyen al tallo y al nivel de ramificación. Algunas plantas muestran una postura rastrera desde las etapas iniciales de la fase vegetativa; otras adoptan una forma arbustiva hasta la prefloración, para luego volverse rastreras. También pueden exhibir capacidades de trepado.
Tipo IV	Indeterminado trepador	Desde la emergencia de la primera hoja trifoliada, el tallo adquiere la capacidad de torsión, revelando así su habilidad trepadora. En este hábito, la fase de floración se distingue por su prolongada duración en comparación con otros patrones de crecimiento. Este rasgo singular implica que en la planta coinciden de manera simultánea la floración, la formación de vainas, el proceso de llenado de estas y la etapa de maduración. Este fenómeno no solo subraya la complejidad intrínseca de su desarrollo, sino que también resalta la sincronización armoniosa de múltiples procesos vitales en la vida de la planta.

Fuente: (CIAT, 1986)

El frijol Canario Centenario presenta un hábito de crecimiento tipo I (determinado arbustivo), caracterizado por tener una altura de 50 a 60 cm, con un período de madurez de cosecha de 110 días y un período de floración de 45 días. Cada planta puede producir de 15 a 30 vainas y dentro de cada vaina hay de 4 a 5 granos. Los granos se caracterizan por su color amarillo, brillo intenso, tamaño mediano y forma ovoide truncada. El peso de 100 semillas es de aproximadamente 55,5 g, con una calidad comercial notablemente alta. En términos de rendimiento, la producción de grano seco oscila entre 2000 a 2500 kg ha<sup>-1</sup> a lo largo de la costa y 1500 a 1800 kg ha<sup>-1</sup> en las regiones de sierra baja. Esta variedad prospera en los valles interandinos, adaptándose bien a elevaciones de hasta 2400 metros sobre el nivel del mar. También se comporta eficazmente en la costa durante el invierno y la primavera. En particular, la variedad muestra resistencia a la roya, el mildiú polvoriento y el virus BCMV (Programa de Leguminosas y granos – UNALM, 2003).

#### **2.1.5. Propiedades nutricionales benéficas del frijol**

La destacada contribución nutricional del frijol se centra primordialmente en su impresionante contenido proteico, al cual se suma una proporción moderada de carbohidratos, vitaminas y minerales. La concentración proteica varía considerablemente, oscilando entre el 14 % y el 33 %, dependiendo de la variedad del frijol. En lo que respecta a los aminoácidos, el frijol se distingue por su elevado contenido de lisina, con valores que fluctúan de 6.44 a 7.6 g/100 g de proteína, así como en fenilalanina y tirosina, con un rango de 5.3 a 8.2 g/100 g de proteína. No obstante, se observan deficiencias en aminoácidos azufrados como la metionina y la cisteína. Este perfil nutricional resalta la diversidad y riqueza de los componentes esenciales que aporta el frijol, constituyendo una valiosa fuente para una dieta equilibrada (Reyes y Paredes, 1993).

Esta legumbre se distingue por su destacado aporte proteico y su riqueza en vitaminas del complejo B, entre las cuales se encuentran la niacina, riboflavina, ácido fólico y tiamina. Su valioso perfil nutricional se ve complementado con la presencia de minerales esenciales como hierro, cobre, zinc, fósforo, potasio, magnesio y calcio. No menos relevante es su elevado contenido en fibra, subrayando así su contribución a una dieta equilibrada y saludable. Esta legumbre no solo proporciona una fuente sustancial de nutrientes esenciales, sino que también añade una dimensión de versatilidad y beneficio nutricional a la alimentación diaria (Ortega, 1991).

**Tabla 2: Valor nutricional del frijol Canario**

Contenido (en 100 g de alimento crudo)	Valor
Energía (en kcal)	339
Agua (en g)	11.7
Proteínas (en g)	21.9
Grasas (en g)	2.1
Carbohidratos (en g)	60.2
Fibra (en g)	2.9
Ceniza (en g)	4.2
Calcio (en mg)	138
Fósforo (en mg)	351
Hierro (en mg)	6.6
Tiamina (en mg)	0.16
Riboflavina (en mg)	0.01
Niacina (en mg)	1.5
Ácido ascórbico reducido (en mg)	6.3

Fuente: (Sociedad Nacional de Industrias, 2012)

### **2.1.6. Dispersión global y la importancia del frijol**

El frijol común destaca como una de las leguminosas más destacadas a nivel global, siendo una fuente esencial de nutrición (Porch et al., 2013). El 50 % de la producción mundial de frijol tiene lugar en países de bajos ingresos económicos y con escasez alimentaria, según informa la FAO. En estas naciones, el cultivo de frijol desempeña un papel crucial al proporcionar estabilidad económica a numerosos hogares y contribuir así a la seguridad alimentaria del país. Se proyecta que, para el año 2050, será necesario incrementar en un 30 % los rendimientos de frijol a nivel global para satisfacer la creciente demanda, debido al considerable aumento de la población (Palomino, 2012).

El Perú en el 2022 con la partida del producto 071333 del cultivo de frijol está posicionado en el puesto 24 de los principales países exportadores (TRADEMAP, 2023), con 68.38 toneladas de cantidad exportada con 10.29 millones de US\$ de valor FOB (SUNAT, 2023), en los últimos 20 años el Perú en el 2008 llegó al puesto 16 de los países más exportadores a nivel mundial con 9.71 millones de US\$ de valor FOB (TRADEMAP, 2023).

En el 2022, la producción media de frijol a nivel nacional fue de 1173 kg ha<sup>-1</sup> (MIDAGRI, 2022). A nivel mundial, el rendimiento promedio se sitúa en 832 kg ha<sup>-1</sup>. En los países con escasos ingresos y déficit de alimentos, los rendimientos medios son de 1002 y 594 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. En contraste, en naciones desarrolladas, se observan rendimientos elevados, como en Barbados, donde alcanza los 5381 kg ha<sup>-1</sup> (FAOSTAT, 2022).

En el 2022 se exportó el frijol var. canario con un valor FOB de US\$ 1.36 millones, siendo EEUU el país que mayor importó con un valor FOB de US\$ 811 mil (MIDAGRI, 2022), la empresa INTEGRALEXPORT SAC tuvo una participación de 34.54 % en el mercado nacional.

### **2.1.7. Exigencias del cultivo de frijol**

#### **2.1.7.1. Clima y suelo**

Es una planta que demuestra una notable adaptabilidad a entornos cálidos, prosperando especialmente en temperaturas que oscilan entre los 16 y 21 °C, siendo su rango óptimo de crecimiento. Su capacidad para desarrollarse abarca desde un máximo de 27 °C hasta un mínimo de 10 °C. Se destaca por su diversidad genética en lo que respecta a la temperatura óptima de crecimiento (Nadal et al., 2004). Su desarrollo óptimo se da en lugares con una precipitación de al menos 300 mm, distribuida de manera regular a lo largo de toda la fenología del cultivo (Canchari, 2005).

Esta especie manifiesta sensibilidad tanto ante la escasez como ante el exceso de agua (Valladolid, 1993). El suelo óptimo para el cultivo de esta especie es de tipo franco arcilloso limoso, con un rango de pH que fluctúa entre 5.5 y 6.6. En suelos calizos, se aconseja la suplementación con magnesio (Mg), manganeso (Mn) y zinc (Zn). Cabe destacar que estas plantas manifiestan una alta susceptibilidad a la salinidad del suelo, particularmente al cloruro de sodio. Adicionalmente, exhiben una marcada sensibilidad a elevadas concentraciones de aluminio (Al), boro (B), manganeso (Mn) y sodio (Na). Estos detalles resaltan la importancia de un manejo preciso del suelo para asegurar condiciones propicias para el desarrollo saludable de la planta (Nadal et al., 2004).

#### **2.1.7.2. Salinidad**

La influencia del estrés derivado de la sequía o elevadas temperaturas generalmente exhibe un carácter temporal y, en numerosas instancias, reversible. En marcado contraste, el estrés

salino tiende a manifestarse de manera más permanente. Este fenómeno se atribuye a su impacto en la capacidad de las plantas para asimilar nutrientes, así como a la actividad microbiana en el suelo, marcando un desafío prolongado para el equilibrio y la vitalidad del entorno vegetal (Villanueva, 2009). Además, es importante destacar que las cepas de rizobios pertenecientes a diferentes especies exhiben notables disparidades en su capacidad de tolerancia a suelos salinos. En este contexto, las leguminosas, junto con el proceso de iniciación nodular, manifiestan una marcada sensibilidad al estrés salino, posiblemente atribuible a la inhibición del desarrollo de los pelos absorbentes. Aunque la fijación de  $N_2$  muestra una relativa resistencia a la salinidad en comparación con otros procesos fisiológicos, como la expansión de las hojas, su susceptibilidad subraya la complejidad de las interacciones entre las plantas, los rizobios y las condiciones ambientales desafiantes (Meneses, 1996).

#### **2.1.7.3. Fertilización**

Para lograr rendimientos óptimos de 1500 a 2000 kg ha<sup>-1</sup> de frijol canario, se sugiere aplicar cuidadosamente una combinación de nutrientes esenciales. Se recomienda la aplicación de 60 kg de nitrógeno por hectárea, 80 kg de  $P_2O_5$ /ha y 20 kg de  $K_2O$ /ha (INIA, 2004).

Del mismo modo, Camarena et al. (2009) sugieren la aplicación de 40 a 60 kg de nitrógeno por hectárea, lo cual equivale a dos sacos de urea de 50 kg cada uno. Además, se aconseja la aplicación de 40 kg de ácido fosfórico agrícola. Este enfoque de fertilización, cuidadosamente calibrado, proporciona una base nutricional equilibrada para el cultivo de manera eficiente. La aplicación de nitrógeno contribuirá al desarrollo vegetativo, mientras que el ácido fosfórico promoverá la salud del sistema radicular y otros aspectos críticos del crecimiento de las plantas.

#### **2.1.7.4. Manejo de plagas y enfermedades**

El enfoque del manejo integrado de plagas busca mantener los niveles de plagas en un rango bajo, con el objetivo de prevenir pérdidas económicas. Este método prioriza el uso de factores naturales que son adversos para el desarrollo de las plagas, incluyendo los mecanismos de mortalidad natural. La aplicación de plaguicidas se reserva como último recurso (Cisneros, 1992).

Plagas más comunes en el cultivo de frijol:

- Cortadores: *Agrotis* sp., *Feltia* sp., comedor de follaje: *Diabrotica*, *Neobrotica* y *Cerotoma*, chupadores: lorito (*Empoasca kraemeri*), considerado a nivel mundial como la plaga más importante. Mosca blanca (*Trialeurodes vaporariorum*), trips (*Thrips palmi*), y (*Thrips tabaci*).
- Barrenador de vainas: Perforador de vaina (*Epinotia aporema*).
- Granos almacenados: Las principales plagas en almacén tenemos a *Acanthoscelides obtectus* y *Zabrotes subfasciatus*.

Las enfermedades representan un desafío significativo en la producción de frijol, ya que las condiciones medioambientales son propicias para el desarrollo de patógenos. Este problema se ve agravado por el cultivo de variedades comunes que son susceptibles a enfermedades y el uso de semillas producidas localmente por los agricultores, que a menudo no satisfacen con los estándares de calidad necesarios. Algunas enfermedades son muy frecuentes y presentan limitaciones importantes para el cultivo (CIAT, 1982).

Las enfermedades más comunes en el cultivo de frijol son las siguientes:

- La antracnosis (*Colletotrichum lindemuthianum*).
- Mancha anillada (*Phoma exigua* var. *diversispora*).
- Mancha angular (*Phaeoisariopsis griseola*).
- Pudriciones radiculares (*Fusarium solani* forma *phaseoli*), *Pythium* sp., *Rhizoctonia solani* y *Fusarium oxysporum* forma *phaseoli*).
- Virus del mosaico común del frijol.

## 2.2. EL NITRÓGENO

### 2.2.1. Importancia

El nitrógeno, como nutriente es esencial para los organismos vivos, desempeña diversos roles fundamentales en la bioquímica de las plantas. Se erige como uno de los componentes primordiales de aminoácidos, proteínas, enzimas, nucleoproteínas y ácidos nucleicos. Además, contribuye de manera significativa a la estructura de las paredes celulares y de la síntesis de clorofila en los vegetales (Harper y Hawksworth, 1994); es esencial para las plantas, por lo que se clasifica como macronutriente, junto al fósforo y al potasio (Perdomo

et al., 1998). El nitrógeno constituye uno de los nutrientes más escasos en la producción de cultivos en la mayoría de los agroecosistemas. Por lo tanto, la carencia de nitrógeno en las plantas puede tener un impacto considerable en su crecimiento, desarrollo y rendimiento (Harper y Hawksworth, 1994).

### **2.2.2. Procedencia del nitrógeno edáfico**

La mayoría del nitrógeno que se encuentra en la tierra se halla en el manto terrestre y en las rocas ígneas de la corteza. No obstante, esta reserva de nitrógeno no está accesible para las plantas, al menos a corto y mediano plazo, y puede considerarse no disponible para los seres vivos (Perdomo y Dodera, 1992). En el planeta, las plantas cuentan con dos fuentes principales de almacenamiento de nitrógeno. La más significativa es la atmósfera, donde el 78 % del aire está compuesto por nitrógeno (Montaño, 2008). Esta reserva de nitrógeno se presenta en su estado molecular como  $N_2$ , aunque existen otras variantes como el óxido nitroso ( $N_2O$ ), óxido nítrico (NO), dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ) y amoníaco ( $NH_3$ ), aunque estas son de menor relevancia (Silva, 2002). Otra reserva del nitrógeno es en la materia orgánica del suelo (MOS). La materia orgánica se encuentra principalmente en partículas parcialmente humificadas o en los componentes del humus, en asociación con minerales arcillosos (Swift y Posner, 1972). En los primeros 0.2 metros de profundidad, el suelo puede albergar entre 1 y 10 toneladas de nitrógeno por hectárea. Estas formas orgánicas abarcan a aminoácidos, proteínas y azúcares aminados. No obstante, las formas químicas identificadas representan solo un 30 - 35 % del total de nitrógeno orgánico del suelo. El nitrógeno orgánico restante, que constituye entre el 70 y 75 %, posee una estructura química compleja que aún no ha sido completamente identificada (Olk, 2008).

### **2.2.3. Forma asimilable de nitrógeno en el suelo**

El sistema radicular de las plantas superiores absorben principalmente nitrato y amonio como fuentes de nitrógeno inorgánico (Marschner, 2012). La concentración de nitrato en las soluciones de suelos agrícolas supera (1-5 mM) a la de amonio (20-200  $\mu M$ ) (Owen y Jones, 2001). Debido a su mayor movilidad en el suelo, los nitratos son absorbidos con mayor facilidad por las plantas en comparación con el amonio (Miller y Cramer, 2004). En suelos no fertilizados, las concentraciones de amonio son más elevadas que las de nitratos, y los aminoácidos representan otra fuente importante de nitrógeno. La concentración de

aminoácidos varía en las soluciones del suelo, oscilando entre 0.1 y 100  $\mu\text{M}$ , y constituyen la principal reserva de nitrógeno ligado a las partículas del suelo (Jämtgård et al., 2010).

#### **2.2.4. Nitrógeno en la planta**

En el ámbito de la biología vegetal, el nitrógeno adopta predominantemente una forma orgánica. Las sustancias nitrogenadas de reserva se componen principalmente de proteínas, aunque también existen formas más simples intermediarias, que cierran la brecha entre los compuestos nitrogenados minerales absorbidos y las sustancias proteicas sintetizadas. En consecuencia, el nitrógeno entrelaza intrincadamente su presencia en moléculas fundamentales como purinas, pirimidinas, porfirinas, vitaminas, alcaloides y enzimas. Dentro de los órganos vegetativos, particularmente en las hojas, el nitrógeno se manifiesta en forma soluble, y comprende entre el 20 y el 40 % del contenido total de nitrógeno. Esta forma soluble existe predominantemente como aminoácidos libres, con la presencia adicional de aminoácidos específicos como la asparagina y la glutamina, que se encuentran dentro de los cloroplastos o en el citoplasma (Navarro y Navarro, 2013).

La mayor concentración de nitrógeno en las plantas se encuentra en sus tejidos jóvenes, y normalmente oscila entre el 5.5 y 6.5 % de la materia seca. A medida que las plantas entran en senescencia, hay un aumento en la proporción de celulosa, una disminución en el porcentaje de nitrógeno y un aumento en la relación C/N. Si bien las hojas generalmente poseen la mayor cantidad de nitrógeno, este valor tiende a disminuir durante la etapa de floración. Entre las diversas especies de plantas, las leguminosas presentan el mayor contenido de nitrógeno (Navarro y Navarro, 2013).

Las plantas también contienen nitrógeno en formas inorgánicas como amonio, nitrito y nitrato, aunque en cantidades más pequeñas. Los nitratos, relacionados con alteraciones en los procesos metabólicos que dificultan la síntesis de proteínas, normalmente se almacenan en los tallos. Los niveles máximos de nitrato se suelen observar poco después de la etapa de floración (Stevenson, 1982).

#### **2.2.5. Fertilizantes nitrogenados comerciales**

La fabricación de fertilizantes implica procesos industriales de alta temperatura (350 - 550  $^{\circ}\text{C}$ ) y presión (150 - 350 atm), a través del método de Haber-Bosch " $\text{N}_2 + 3\text{H}_2 = 2\text{NH}_3$ " (Rutland, 1991). Entre los principales productos de esta producción se encuentran los

fertilizantes nitrogenados, los cuales son ampliamente utilizados en todo el mundo para abordar la deficiencia de nitrógeno que prevalece en los suelos agrícolas a nivel global (Bezdíček y Kennedy, 1998). Según la FAO (2002), cerca del 59 % del consumo global de fertilizantes minerales está compuesto por fertilizantes nitrogenados.

Los fertilizantes nitrogenados fundamentales en la agricultura incluyen la urea, el sulfato de amonio y el nitrato de amonio (Navarro y Navarro, 2014). Además, los fertilizantes fosfato diamónico y monoamónico, que son principalmente fuentes de fosfato, también contienen nitrógeno en su composición. La urea destaca como el fertilizante nitrogenado más ampliamente utilizado a nivel mundial, a pesar de representar la fuente con las mayores pérdidas de nitrógeno antes de ser absorbido por el cultivo (FAO, 2002). Las importantes formas de pérdida de nitrógeno del suelo se producen mediante los siguientes procesos: lixiviación, desnitrificación y volatilización (Martínez et al., 2014).

**Tabla 3: Estructura química, composición, índice de salinidad e índice de acidez de los importantes fertilizantes nitrogenados**

<b>Fertilizantes nitrogenados</b>	<b>Estructura química</b>	<b>Composición (%) de N - P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> - K<sub>2</sub>O - S</b>	<b>Índice de salinidad</b>	<b>Índice de acidez</b>
Urea	CO(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>	46-0-0	1.618	71
Nitrato de amonio	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	33-3-0	2.990	62
Sulfato de amonio	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	21-0-0-24	3.253	110
Fosfato diamónico	(NH <sub>4</sub> ) HPO <sub>4</sub>	18-46-0	1.614	70

Fuente: (Gavi, 2000)

### **2.2.5.1. Urea**

La urea es el tercer fertilizante nitrogenado más utilizado a nivel mundial, después del amoníaco y del nitrato de amonio (Navarro y Navarro, 2014). Su amplio uso en agricultura se atribuye a su versatilidad, siendo el fertilizante nitrogenado sólido más concentrado (Bacon, 1995). Los factores que contribuyen a su popularidad incluyen su bajo costo, alto contenido de nitrógeno, mínima higroscopicidad y la necesaria transformación que sufre en

el suelo. Esta transformación le confiere una característica de acción paulatina como fertilizante, justificando su creciente consumo (Navarro y Navarro, 2014).

La urea es un producto obtenido químicamente que contiene diamida carbónica (carbamida) como componente crucial, la síntesis industrial de urea implica la reacción entre amoníaco líquido ( $\text{NH}_3$ ) y dióxido de carbono gaseoso ( $\text{CO}_2$ ) con alta presión a 205 atmósferas y temperatura elevada a 122 °C (Castellanos y Rodríguez, 2017).

Los factores que podemos considerar en el manejo de la urea que deben tomarse en consideración son los métodos de aplicación, la actividad ureásica, la temperatura, el contenido de agua, capacidad de intercambio catiónico, intercambio gaseoso, presencia de residuos y uso de inhibidores (Navarro y Navarro, 2014).

La temperatura juega un papel crucial en la regulación de las actividades biológicas, particularmente en los procesos microbianos como la producción de la enzima ureasa. La actividad de los microbios productores de ureasa depende directamente de la temperatura, lo que tiene implicaciones importantes, especialmente en los cultivos de verano, cuando las temperaturas superan los 18 – 20 °C. Sin embargo, es importante tener en cuenta que múltiples factores contribuyen a que se produzca el proceso de volatilización, no sólo la temperatura por sí sola (Navarro y Navarro, 2014).

El aumento del pH alrededor del gránulo de fertilizante es un factor clave que desencadena la volatilización del amoníaco ( $\text{NH}_3$ ). Los suelos que naturalmente tienen un pH alto, como los suelos alcalinos o salino-alcalinos, experimentan una volatilización más significativa que los suelos con un pH moderadamente ácido. Los suelos con mayor capacidad amortiguadora exhiben cambios menores de pH, lo que lleva a una menor pérdida de nitrógeno debido a la volatilización (Navarro y Navarro, 2014).

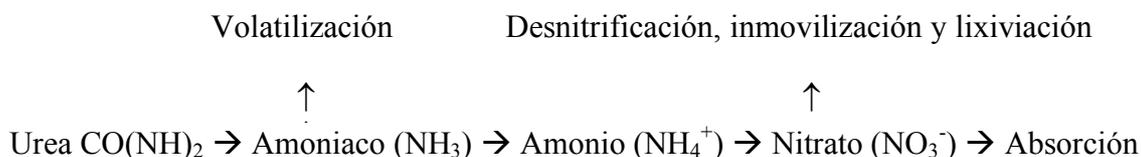
La capacidad de intercambio catiónico de los suelos también afecta la volatilización. El amonio liberado por la hidrólisis de la urea se retiene en los sitios de intercambio, reduciendo la disponibilidad de cationes para la volatilización (Navarro y Navarro, 2014).

Las prácticas de manejo de fertilizantes, incluida la selección de la fuente de nitrógeno, influyen significativamente en la volatilización del amoníaco. La urea como fuente fertilizante puede provocar volatilización, mientras que las fuentes que contienen amonio o nitratos no generan volatilización en suelos agrícolas (Navarro y Navarro, 2014).

La dosis de urea es un factor crucial, ya que dosis más altas dan como resultado una mayor producción de amonio y, en consecuencia, una volatilización de amoníaco más significativa. El método de aplicación, especialmente en sistemas de siembra directa, es importante debido a la alta actividad ureásica del rastrojo superficial. No se recomiendan aplicaciones de urea al voleo en cobertura total, especialmente si otros factores predisponen a la volatilización (Navarro y Navarro, 2014).

Las ureas especiales, como las de liberación lenta (urea formaldehído, urea recubierta de azufre e inhibidores de ureasa), pueden reducir la tasa de hidrólisis enzimática de la urea. Esta reducción minimiza la volatilización del amoníaco, ofreciendo una liberación controlada y prolongada de nitrógeno (Castellanos y Rodríguez, 2017).

La urea puede aplicarse solo o combinado con otros fertilizantes, ya sea en forma seca o líquida. Este fertilizante se emplea ampliamente debido a su elevado contenido de nitrógeno (45 a 46 %), su costo comparativamente económico por unidad de nitrógeno y su rápida conversión en formas que las plantas puedan utilizar fácilmente (FAO, 2002). Asegurar una cobertura efectiva durante la aplicación de urea es crucial, ya que las pérdidas por volatilización en forma de amoníaco pueden alcanzar niveles significativos, superando incluso el 40 % de la cantidad aplicada. El principal desafío asociado a la urea radica en su propensión a experimentar pérdidas considerables antes de que los cultivos tengan la oportunidad de absorber el nitrógeno. Esta susceptibilidad se manifiesta a través de diversas vías de pérdida, que incluyen la volatilización, la desnitrificación y la lixiviación (Castellanos y Rodríguez, 2017)



#### 2.2.5.2. Nitrato de amonio

El uso de nitrato de amonio como fertilizante tuvo una tendencia positiva, especialmente desde el fin de la segunda guerra mundial. Esta tendencia fue particularmente notable en 1945, cuando Estados Unidos experimentó un notable surgimiento en su uso (Navarro y Navarro, 2014). En los últimos años la utilización de este fertilizante ha descendido debido que inicialmente se producía con el propósito de fabricar explosivos. En la actualidad,

existen restricciones para su aplicación en diversas regiones del mundo debido a la preocupación de que pueda ser empleado con propósitos no relacionados con la agricultura (Castellanos y Rodríguez, 2017), en el Perú su venta está autorizado por SUCAMEC. Es altamente soluble en agua, extremadamente higroscópico y posee características de fácil inflamabilidad y explosividad. Debido a estas propiedades, la manipulación de nitrato de amonio presenta peligros inherentes, particularmente en situaciones de incendio (Navarro y Navarro, 2014).

Es un fertilizante ampliamente reconocido por su concentración de nitrógeno que varía entre el 33 y 34 % (FAO, 2002). Su característica distintiva radica en proporcionar el nitrógeno en las dos formas absorbibles por las plantas: nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) y amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) (Benson y Silvester, 1993). La presencia de ambas formas reduce el riesgo de volatilización. La porción de nitrógeno en forma de nitrato permite una absorción rápida por parte de los cultivos, mientras que la parte en forma de amonio experimenta una transformación gradual por parte de los microorganismos del suelo antes de ser asimilada por las plantas. Debido a su contenido de amonio, este fertilizante tiene un efecto acidificante en el suelo, lo que implica la capacidad de reducir el pH del mismo (Kennedy et al., 2004).

El nitrato de amonio es generalmente compatible con la mayoría de los fertilizantes, pero es totalmente incompatible con la urea (Bartolini, 1989). Esta incompatibilidad se atribuye al índice crítico de humedad relativa, que representa el nivel de humedad en el que una sal soluble absorbe espontáneamente la humedad del entorno. El nitrato de amonio tiene una humedad relativa crítica baja (59 %). Sin embargo, cuando se mezcla físicamente con urea, la humedad relativa crítica de la mezcla llega a ser extremadamente baja (18 %). En términos prácticos, esto significa que la mezcla de nitrato de amonio y urea reacciona instantáneamente a las condiciones de humedad ambiental, absorbiendo rápidamente la humedad y formando una pasta o masa húmeda que libera continuamente fluido acuoso. Esta reacción ocurre prácticamente en cualquier condición ambiental (Navarro y Navarro, 2014).

### **2.2.5.3. Sulfato de amonio**

Es una de las fuentes químicas más antiguas de nitrógeno de amonio, habiéndose fabricado primeramente en los EE.UU. como un subproducto de la conversión de carbón en coque (Navarro y Navarro, 2014). Sirve como una fuente soluble y fácilmente accesible de nitrógeno y azufre (S). En su forma sólida, presenta concentraciones del 21 % de nitrógeno

(N) y del 24 % de azufre (S) (FAO, 2002). Este fertilizante presenta propiedades acidificantes, por lo que se aconseja su uso en suelos alcalinos. El efecto acidificante se atribuye a la rápida reacción del azufre en forma de sulfato ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) con el calcio del suelo. Esta forma de nitrógeno tiende a exhibir una reacción algo más ácida en el suelo en comparación con otros fertilizantes de amonio como el nitrato (Navarro y Navarro, 2014). Esta reacción conduce a la formación de compuestos de sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$ ) que precipitan rápidamente y pueden lixiviarse con el agua de lluvia o el riego (Castellanos y Rodríguez, 2017).

La transformación del sulfato de amonio en el suelo con el agua, da como resultado que por cada mol de sulfato de amonio se liberan cuatro moles de  $\text{H}^+$ , por otro lado, por cada mol de urea se libera solo dos moles de  $\text{H}^+$  (Melgar, 2015).

Este fertilizante es extensamente empleado para corregir deficiencias de azufre en suelos ácidos o con bajos niveles de materia orgánica, sirviendo como fuente tanto de nitrógeno como de azufre. La carencia de azufre se evidencia con frecuencia en suelos ácidos, con escasa materia orgánica y en suelos arenosos (Castellanos y Rodríguez, 2017).

El sulfato amónico es especialmente aconsejable para su aplicación en suelos salinos con alto contenido en sodio, mejorando las condiciones de desarrollo de las plantas. Debido a su efecto acidificante, el uso de sulfato de amonio desencadena la movilización de calcio y potasio, además de ayudar en la solubilización del fósforo no asimilable en el suelo. Incluso en suelos ácidos, cualquier acidez añadida se puede neutralizar fácilmente. El impacto acidificante residual disminuye a medida que nos alejamos del punto de aplicación (Melgar, 2015).

Entre todos los fertilizantes nitrogenados, el sulfato de amonio destaca por tener las ventajas más importantes para los suelos salinos. Esto se atribuye no sólo a su reacción fisiológicamente ácida sino también al efecto beneficioso que normalmente surge cuando reacciona con el cloruro de sodio, la sal primaria presente en estos suelos. La reacción da como resultado la formación de cloruro de amonio y sulfato de sodio. Los cultivos generalmente toleran mejor el sulfato de sodio que el cloruro de sodio, lo que contribuye al impacto positivo general del sulfato de amonio en tales condiciones del suelo (Navarro y Navarro, 2014).

El sulfato de amonio facilita la movilización del calcio de los suelos mediante la creación de sulfato de calcio y carbonato de amonio. Este proceso puede provocar pérdidas de calcio por lixiviación. En consecuencia, se recomienda que los suelos que reciben fertilización con sulfato de amonio tengan reservas suficientes de calcio, humus y arcilla. En los casos en que el suelo carece de reservas significativas de calcio y se fertiliza constantemente con sulfato de amonio, es aconsejable implementar prácticas limitantes adecuadas para abordar posibles deficiencias (Navarro y Navarro, 2014).

El sulfato de amonio sirve como un excelente fertilizante para cultivos que tienen altas demandas de azufre (S) del suelo. Esto incluye cultivos forrajeros como pastos y alfalfa, diversas hortalizas como crucíferas, cebolla y ajo, así como cereales como el trigo y la cebada. Además, es beneficioso para pastos como el maíz, el sorgo y la caña de azúcar, entre otros cultivos con importantes requerimientos de azufre (Castellanos y Rodríguez, 2017).

#### **2.2.5.4. Fosfato diamónico**

Ampliamente reconocido como DAP, este fertilizante de naturaleza sólida y altamente soluble presenta un contenido de nitrógeno (18 %) y fósforo (46 %), ambos fácilmente asimilables (Castellanos y Rodríguez, 2017). El DAP exhibe una reacción inicialmente alcalina, aunque tiende a generar un efecto residual ácido, convirtiéndolo en una opción muy apropiada para suelos con un intervalo de pH que va de neutro a alcalino, además de constituir una destacada fuente de fósforo (Gavilán, 2002).

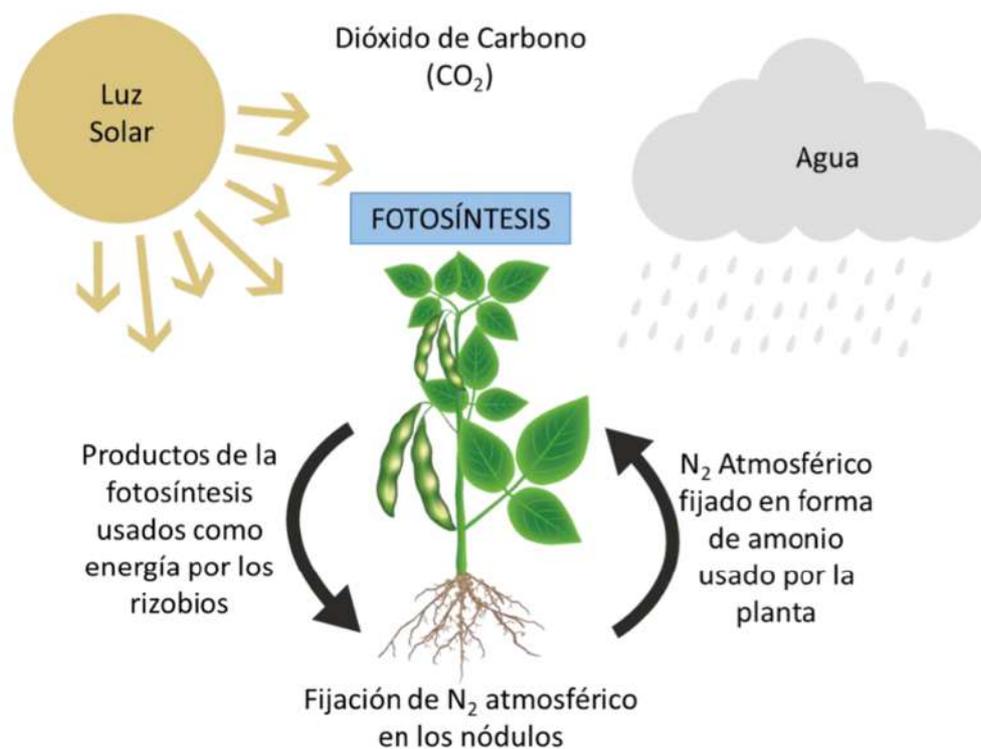
El fosfato diamónico demuestra compatibilidad con la mayoría de los fertilizantes, excepto el superfosfato triple y el superfosfato simple, donde puede provocar una reacción húmeda y aglomeración. Al crear mezclas de aplicación inmediata, es factible combinar el fosfato diamónico con otros fertilizantes, siempre y cuando la mezcla no esté destinada al almacenamiento. El fosfato diamónico está disponible en forma granulada o cristalina (Navarro y Navarro, 2014).

#### **2.2.6. Fijación biológica de nitrógeno**

El género *Rhizobium*, originalmente descrito por Frank en 1889, constituye un grupo de bacterias Gram-negativas con la notable capacidad de formar nódulos, estableciendo interacciones tanto con leguminosas como con no leguminosas. Las condiciones óptimas medioambientales de la bacteria oscilan entre 25 y 30 °C de temperatura, y en un rango de pH de 6 a 7. En suelos abundantes en nitrógeno, las leguminosas tienden a aprovechar el

nitrógeno inorgánico disponible, sin depender necesariamente de la presencia de bacterias. No obstante, cuando el suelo presenta bajos niveles de nitrógeno y ante la presencia de rizobios, las plantas facilitan la entrada de estos microorganismos en sus raíces, promoviendo así la fijación del nitrógeno atmosférico. Este proceso representa una estrategia astuta y eficiente en la optimización del suministro de nitrógeno en ambientes desafiantes (Cubero y Moreno, 1996)

La fijación biológica del nitrógeno, a pesar de ser un proceso esencial para la planta, conlleva un notable gasto energético durante el establecimiento de la simbiosis. Este costo energético supera, de hecho, el relacionado con la simple incorporación de nitrógeno proveniente del suelo. Para llevar a cabo la fijación de cada gramo de nitrógeno, la planta debe asignar entre 6 y 12 g de compuestos de carbono. En contraste, la asimilación de nitrógeno a partir de los nitratos presentes en el suelo se revela como una alternativa considerablemente más eficiente desde el punto de vista energético para el cultivo, siendo aproximadamente de 6 a 8 veces más efectiva (Fernández-Canigia, 2020).

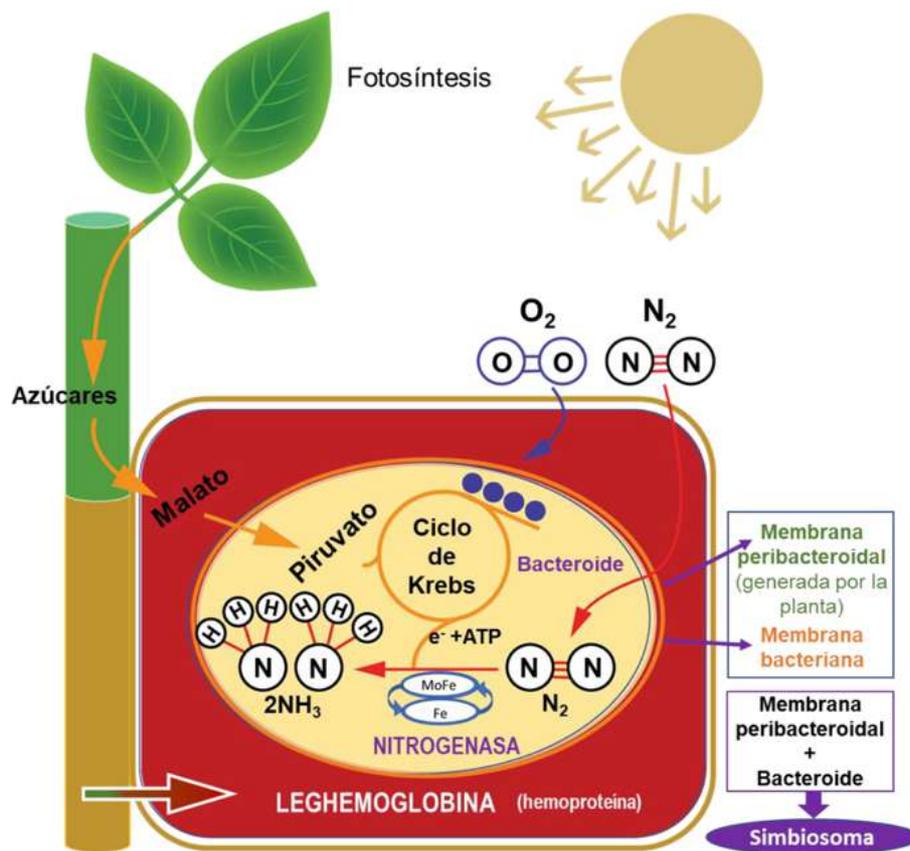


**Figura 1: Esquema simplificado de la simbiosis rizobio - leguminosa**

Fuente: Adaptado de Fernández-Canigia (2020)

Reconociendo la necesidad de las plantas de sintetizar compuestos de carbono, se revela una correlación intrínseca entre la fotosíntesis y la fijación biológica de nitrógeno. Según lo

detallado por Laich (2018), la planta, a través de la fotosíntesis, provee los compuestos de carbono necesarios para la producción de energía y contribuye a la formación de la molécula de leghemoglobina. Esta molécula es fundamental en la relación simbiótica, actúa como un escudo protector para el rizobio, resguardándolo de los efectos nocivos del oxígeno frente a la nitrogenasa. La leghemoglobina, es una proteína que ostenta un grupo hemo con hierro, que tiene la capacidad de captar oxígeno, manifestándose con un distintivo color rojo. Dentro del nódulo, acontece una transformación notable. El nitrógeno atmosférico ( $N_2$ ) experimenta una conversión, dando lugar a dos moléculas de amonio, las cuales posteriormente son suministradas a la planta, como se ilustra con claridad en la **Figura 2**.



**Figura 2: Esquema simplificado de la simbiosis rizobio - leguminosa**

Fuente: Adaptado de (Fernández-Canigia, 2020)

En el medio del suelo, los rizobios se manifiestan como bacilos móviles desprovistos de la capacidad de generar esporas (estructuras resistentes a las condiciones adversas). Están clasificados como saprófitos, lo que implica que estos organismos se alimentan de la descomposición de organismos fallecidos, materia orgánica, o compuestos químicos liberados por las raíces de las plantas. Siendo aerobios por naturaleza, estos

microorganismos dependen del oxígeno para su supervivencia y no logran fijar nitrógeno atmosférico en dicho estado. Sin embargo, cuando se encuentran albergados en los nódulos de las raíces, experimentan cambios morfológicos notables: se agrandan y se alimentan de los compuestos de carbono sintetizados por la planta hospedera, generalmente leguminosas. En este entorno particular, los rizobios operan en condiciones de bajo oxígeno, facilitando así la fijación del nitrógeno atmosférico. Este complicado proceso subraya la adaptabilidad única de los rizobios en respuesta a su entorno específico (Sprent, 1989).

Según Fernández - Canigia (2020), la familia de las leguminosas abarca una amplia gama de especies de plantas, que incluyen cultivos de granos como la soya y el garbanzo, cultivos forrajeros como la alfalfa y los tréboles, así como plantas herbáceas, arbustivas y arbóreas. Todas estas plantas tienen la capacidad de formar nódulos con una amplia variedad de bacterias. Sin embargo, es importante destacar que existe una especificidad entre las bacterias pertenecientes al género *Rhizobium* y las plantas huésped. Algunas leguminosas pueden formar nódulos con la misma especie de rizobio, lo que se conoce como grupos de inoculación cruzada. Estos grupos representan cepas de rizobios que sólo infectan a un conjunto particular de especies de leguminosas. La identificación de estos grupos ha sido utilizada originalmente como criterio de clasificación.

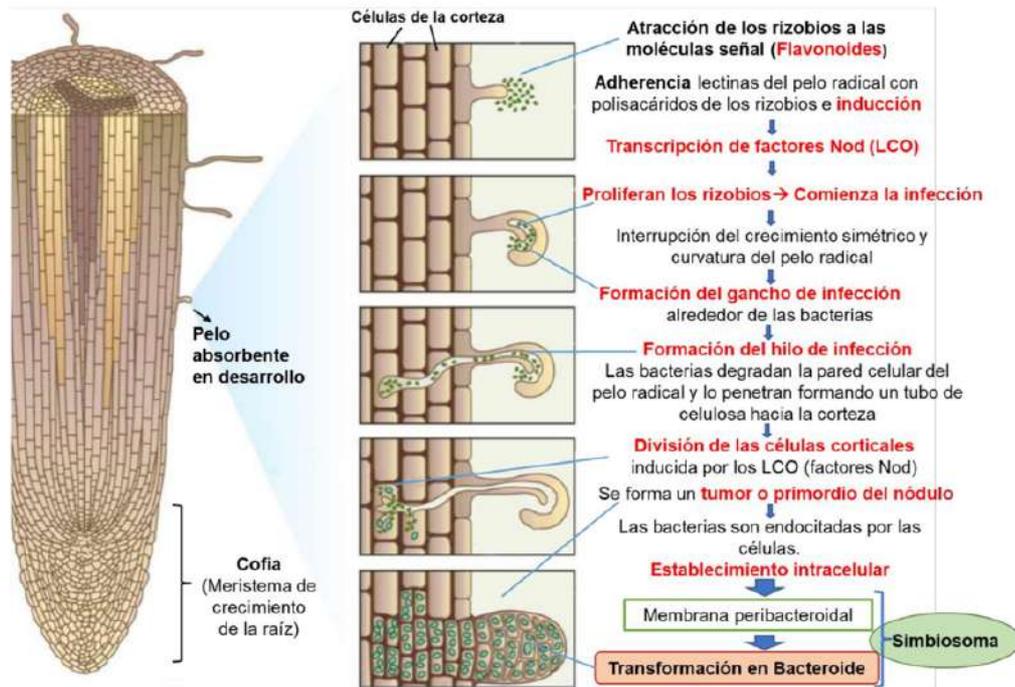
Los estudios genéticos han contribuido al reconocimiento de nuevas especies y a la recategorización de muchos géneros. Actualmente el género *Rhizobium* se compone de 166 especies descritas en List of Prokaryotic names with Standing in Nomenclature (LPSN, 2024).

Pero solo 96 especies están publicadas en forma correcta en su nombre y bajo el código internacional de nomenclatura de procariota (ICNP), estos son los siguientes: *Rhizobium acaciae*, *Rhizobium acidisoli*, *Rhizobium aegyptiacum*, *Rhizobium aethiopicum*, *Rhizobium aggregatum*, *Rhizobium alamii*, *Rhizobium altiplani*, *Rhizobium alvei*, *Rhizobium anhuiense*, *Rhizobium aquaticum*, *Rhizobium arsenicireducens*, *Rhizobium bangladeshense*, *Rhizobium beringeri*, *Rhizobium binae*, *Rhizobium brockwellii*, *Rhizobium calliandrae*, *Rhizobium capsici*, *Rhizobium cauense*, *Rhizobium cellulolyticum*, *Rhizobium changzhiense*, *Rhizobium chutanense*, *Rhizobium cremeum*, *Rhizobium croatiense*, *Rhizobium daejeonense*, *Rhizobium dioscoreae*, *Rhizobium ecuadoreense*, *Rhizobium endophyticum*, *Rhizobium esperanzae*, *Rhizobium etli*, *Rhizobium favelukesii*, *Rhizobium freirei*, *Rhizobium gallicum*, *Rhizobium gei*, *Rhizobium grahamii*, *Rhizobium hainanense*,

*Rhizobium halophytocola*, *Rhizobium helianthi*, *Rhizobium hidalgonense*, *Rhizobium indigoferae*, *Rhizobium ipomoeae*, *Rhizobium jaguaris*, *Rhizobium johnstonii*, *Rhizobium laguerreae*, *Rhizobium leguminosarum*, *Rhizobium lemnae*, *Rhizobium lentis*, *Rhizobium leucaenae*, *Rhizobium lupini*, *Rhizobium lusitanum*, *Rhizobium mayense*, *Rhizobium mesoamericanum*, *Rhizobium mesosinicum*, *Rhizobium metallidurans*, *Rhizobium miluonense*, *Rhizobium mongolense*, *Rhizobium multihospitium*, *Rhizobium naphthalenivorans*, *Rhizobium oryzicola*, *Rhizobium pakistanense*, *Rhizobium paknamense*, *Rhizobium panacihumi*, *Rhizobium paranaense*, *Rhizobium phaseoli*, *Rhizobium pisi*, *Rhizobium populi*, *Rhizobium populisoli*, *Rhizobium puerariae*, *Rhizobium redzepovicii*, *Rhizobium rhizogenes*, *Rhizobium rhizophilum*, *Rhizobium rhizoryzae*, *Rhizobium rhododendri*, *Rhizobium rosettiformans*, *Rhizobium ruizarguesonis*, *Rhizobium selenitireducens*, *Rhizobium setariae*, *Rhizobium smilacinae*, *Rhizobium soli*, *Rhizobium sophorae*, *Rhizobium sophoriradicis*, *Rhizobium sphaerophysae*, *Rhizobium straminoryzae*, *Rhizobium subbaraonis*, *Rhizobium sullae*, *Rhizobium terrae*, *Rhizobium terricola*, *Rhizobium tibeticum*, *Rhizobium tropici*, *Rhizobium tubonense*, *Rhizobium tumorigenes*, *Rhizobium vallis*, *Rhizobium viscosum*, *Rhizobium wenxiniae*, *Rhizobium wuzhouense*, *Rhizobium yanglingense*, *Rhizobium zea*.

Tras la germinación de las semillas, la rizósfera se convierte en un escenario propicio para la proliferación de los rizobios y el desencadenamiento del proceso de nodulación. A lo largo de este proceso, tanto la leguminosa como el rizobio desempeñan roles fundamentales, estableciendo una colaboración intrínseca que define el éxito de esta simbiosis (Erdman, 1968). El establecimiento de nódulos funcionales se desarrolla a través de diversas etapas, como se describe detalladamente en la **Figura 3**. En un inicio, la leguminosa libera flavonoides a través de las células de su raíz. En respuesta a esta señalización, se activa la síntesis de la proteína NodD en los rizobios, desencadenando la expresión de genes responsables de la producción de lipo-quitto-oligosacáridos (LCO). Estos LCO estimulan la multiplicación bacteriana alrededor de las raíces y promueven la adherencia a los pelos radiculares. A medida que se forma el nódulo, facilitado por el crecimiento del material de la pared celular de la planta huésped que lo rodea, los rizobios inducen la creación de un tubo vacío recubierto con celulosa dentro del pelo absorbente. Este tubo se convierte en el sitio propicio para la multiplicación de los rizobios. Una vez que los rizobios logran penetrar la raíz principal, experimentan una fase de multiplicación en las células de la rizósfera. Al transformarse en bacteroides y asociarse con la leghemoglobina y la enzima nitrogenasa,

adquieren la capacidad única de fijar el nitrógeno atmosférico, estableciendo así una simbiosis beneficiosa para ambas partes. Este intrincado proceso resalta la sofisticación y adaptabilidad de la relación entre las plantas leguminosas y los rizobios en la búsqueda de la optimización del suministro de nitrógeno.



**Figura 3: Etapas implicadas en el desarrollo de los nódulos en la raíz de una leguminosa**

Fuente: Adaptado de (Fernández-Canigia, 2020)

La tonalidad roja que se manifiesta en los nódulos activos encuentra su origen en la leghemoglobina. Un nódulo que exhibe este matiz rojizo refleja una continua fijación de  $N_2$ , constituyendo así un indicador inequívoco de su eficacia simbiótica. La intensidad del color rojo en el interior del nódulo, dentro de ciertos límites, guarda una correlación directa con su eficacia en el proceso de fijación de nitrógeno. En sus fases iniciales, cuando los nódulos son jóvenes y aún no han iniciado la fijación de  $N_2$ , su coloración interna se presenta en tonos blanco o gris. A medida que estos nódulos envejecen y dejan de llevar a cabo la fijación de  $N_2$ , su color se torna verde, señalando la disminución de su utilidad para la planta. La ausencia de la coloración roja en nódulos maduros sugiere que fueron formados por cepas infecciosas pero ineficaces, contribuyendo de manera insignificante al proceso de fijación de nitrógeno. Este fenómeno visual proporciona una valiosa indicación sobre la eficiencia de la simbiosis establecida entre las leguminosas y los rizobios, sirviendo como una

manifestación palpable de la vital colaboración entre estos dos actores en la optimización del suministro de nitrógeno en el entorno (Fernández-Canigia, 2020).

La estrecha simbiosis entre los rizobios y las leguminosas hospedantes se ve profundamente influenciada por las condiciones de la rizósfera. La eficacia del inóculo y el establecimiento de sitios de infección en los pelos radiculares alcanzan su máxima expresión en ambientes propicios para el crecimiento de las plantas y el desarrollo de poblaciones bacterianas (El-Hamdaoui et al., 2003). De esta manera, los diversos factores del suelo, tales como la temperatura, humedad, salinidad, alcalinidad, acidez, fertilidad (incluyendo deficiencias de nutrientes) y estructura física, que ejercen un impacto significativo en la proliferación de los rizobios en la planta (Slattery et al., 2001).

La temperatura juega un papel fundamental en la persistencia y supervivencia de los rizobios en los inoculantes, lo que afecta su viabilidad en el suelo (Graham, 1992). Las variaciones de temperatura a lo largo del año influyen en la abundancia de poblaciones de rizobios naturalizados. Además, la temperatura puede afectar tanto a los procesos de nodulación como a los de fijación de nitrógeno (Fernández-Canigia, 2020). El estrés por calor durante la inoculación puede provocar una disminución significativa en el número de bacterias introducidas. Generalmente, las temperaturas del suelo superiores a 40 °C imponen limitaciones a la nodulación; por el contrario, las temperaturas más bajas pueden retardar el desarrollo de las plantas, la formación de nódulos y, en consecuencia, reducir las tasas de fijación de nitrógeno (Andrews et al., 2017). El rango de temperatura óptimo para los rizobios de rápido crecimiento, como los de alfalfa nodulantes, suele estar entre 28 y 37 °C (Racca et al., 2001), en tanto que los rizobios de crecimiento lento, que a menudo se encuentran en regiones tropicales y específicos de cultivos como la soya, tienen un rango de temperatura óptimo de 32 a 42 °C (González, 1994). Estas preferencias de temperatura resaltan la importancia de considerar las condiciones climáticas de una región particular al seleccionar y aplicar inoculantes de rizobios para garantizar una nodulación y fijación de nitrógeno efectivas en cultivos de leguminosas.

La resistencia de los rizobios a la sequía varía significativamente, incluso dentro de una misma especie (Silva, 1997). La fijación biológica de nitrógeno es un proceso especialmente sensible ante déficits hídricos, más que la transpiración, la fotosíntesis, la tasa de crecimiento foliar o la asimilación de nitratos (Andrews et al., 2017). En respuesta al déficit hídrico, la reacción inicial de la planta implica la inactivación de la enzima nitrogenasa, lo que lleva al

cese de la fijación de nitrógeno. Si la humedad del suelo se restablece dentro de un cierto período de tiempo, la enzima puede reactivarse. Sin embargo, si la sequía persiste, la enzima finalmente se destruye, lo que provocó la muerte y el desprendimiento de los nódulos. La respuesta inicial a la sequía es reversible, pero en casos de déficit hídrico prolongado, la respuesta se vuelve irreversible. Esto pone de relieve el impacto crítico de la disponibilidad de agua en la relación simbiótica entre las leguminosas y los rizobios en el contexto de la fijación de nitrógeno (Gallace et al., 2019).

El exceso de agua o anegamiento, afecta a los socios involucrados en la relación simbiótica entre los rizobios y las leguminosas al inducir anaerobiosis, que es la falta de oxígeno, en el suelo (Andrews et al., 2017). El oxígeno es vital para la supervivencia de los rizobios que viven libremente en el suelo y para las raíces de la planta. El anegamiento provoca la muerte de las bacterias del suelo y crea condiciones de crecimiento desfavorables para la planta, impidiendo la nodulación y la fijación biológica de nitrógeno hasta eliminar los nódulos existentes (Gallace et al., 2019). Los efectos perjudiciales de las inundaciones son más pronunciados en las plantas que dependen principalmente de la fijación biológica de nitrógeno para satisfacer sus necesidades de nitrógeno en comparación con aquellas que obtienen nitrógeno del suelo. Esto sugiere que la fijación de nitrógeno es más sensible al anegamiento que las propias plantas. Las condiciones anaeróbicas creadas por el exceso de agua impactan gravemente el funcionamiento de la relación simbiótica, enfatizando la importancia de la aireación y el drenaje del suelo para el establecimiento exitoso de nódulos y la fijación de nitrógeno en cultivos de leguminosas (Silva, 1997).

El estrés causado por las altas temperaturas o la sequía suele ser temporal y reversible, mientras que el estrés salino tiende a ser más persistente y requiere que los organismos se adapten y prosperen en estas condiciones desafiantes (Fernández-Canigia, 2020). Varias cepas de especies de rizobios exhiben una variabilidad significativa en su tolerancia a los suelos salinos (Slattery et al., 2001). Las legumbres y el proceso de iniciación nodular son particularmente sensibles al estrés salino, probablemente debido a la inhibición del desarrollo del cabello absorbente. Si bien la fijación de nitrógeno (fijación de  $N_2$ ) es generalmente menos sensible a la salinidad en comparación con otros procesos fisiológicos, como la expansión de las hojas, aún puede verse afectada indirectamente (Fernández-Canigia, 2020). En el caso de la soya, por ejemplo, se forman una vez que se produce una fijación biológica de nitrógeno, pero esto puede verse influenciado por una reducción en la tasa de crecimiento del cultivo en condiciones de estrés salino (Bhuvaneswari et al., 1980).

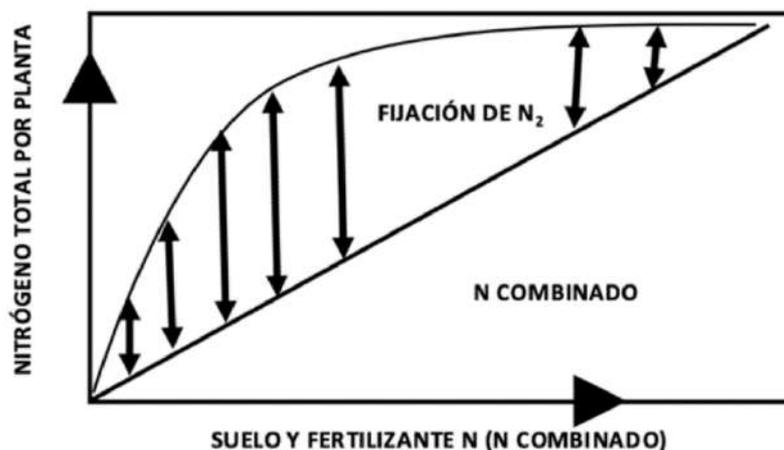
Las observaciones en la pampa argentina, han demostrado que las cepas de *Ensifer meliloti* adaptadas a condiciones salinas exhiben una mayor actividad enzimática incluidas la nitrogenasa, la sacarosa sintasa y la fosfoenolpiruvato carboxilasa. Además, estas cepas conducen a mayores concentraciones de osmolitos (como glucosa, fructosa y sacarosa) y promueven una mayor producción de biomasa aérea en las plantas de alfalfa (Gallace et al., 2019). Esto sugiere que ciertas cepas de rizobios han desarrollado mecanismos adaptativos para mejorar el desempeño de las plantas bajo estrés salino, enfatizando la importancia de las interacciones microbianas-plantas para hacer frente a condiciones ambientales desafiantes.

La acidez del suelo tiene un profundo impacto en varios aspectos de la simbiosis, que van desde la supervivencia y multiplicación de los rizobios en el suelo hasta los procesos de infección, nodulación y fijación de nitrógeno (Vlassak y Vanderleyden, 1997). La influencia de la acidez en la simbiosis puede ser directa, ya que ambos socios simbióticos deben soportar niveles de pH específicos, o indirecta, a través de la generación de toxicidades como aluminio y manganeso o deficiencias de nutrientes, por ejemplo, calcio, molibdeno, fósforo. La importancia de la acidez del suelo varía según el tipo de suelo (Fernández-Canigia, 2020). Generalmente, las especies de rizobios de rápido crecimiento tienden a ser más sensibles a valores bajos de pH que sus contrapartes de crecimiento lento. Por ejemplo, *E. meliloti*, un microsimbionte de la alfalfa, se ve notablemente afectado y casi desaparece en suelos con un pH inferior a 6,0 (Gallace et al., 2019). Por otro lado, *Bradyrhizobium japonicum*, un microsimbionte de la soya, muestra una mayor tolerancia a valores de pH más bajos (Bhuvaneswari et al., 1980). El impacto del pH en los nutrientes del suelo es crucial; los niveles bajos de pH pueden provocar deficiencias en la disponibilidad de nutrientes esenciales como el fósforo, que es vital para la fijación de nitrógeno. En los suelos ácidos se recomienda encalar antes de la siembra para ajustar los valores de pH más cerca de la neutralidad (pH 7). Esto ayuda a crear un entorno más favorable para las interacciones simbióticas, apoyando el crecimiento y desarrollo de las bacterias fijadoras de nitrógeno y sus plantas hospedadoras (Fernández-Canigia, 2020).

### **2.2.7. Relación del nitrógeno mineral frente a la incorporación biológica del nitrógeno en el suelo**

La influencia del nitrógeno mineral presente en el suelo (ya sea proveniente del suelo mismo o de fertilizantes) sobre la fijación biológica de nitrógeno se encuentra extensamente

documentada en leguminosas, así como en otros sistemas simbióticos de fijación de  $N_2$ . Es importante señalar que la presencia de nitrógeno mineral puede tanto incrementar como disminuir la fijación de  $N_2$ , y esta variación está sujeta a diversos factores, destacando entre ellos la tasa de suministro de nitrógeno (Marschner, 2012).



**Figura 4: Gráfico de la interrelación entre la fijación biológica de nitrógeno, la combinación con fertilizantes y la absorción bruta de nitrógeno por la planta**

Fuente: Adaptado de (Marschner, 2012)

Un incremento en la accesibilidad del nitrógeno combinado (originado tanto del suelo como de los fertilizantes nitrogenados) da como resultado un aumento asintótico en la cantidad total de nitrógeno por planta (**figura 4**). La principal influencia de los bajos niveles de nitrógeno combinado sobre la fijación biológica de nitrógeno en las leguminosas está asociada con el período de latencia entre la infección de las raíces y el inicio de la fijación de  $N_2$  (Marschner, 2012).

El nitrógeno combinado tiene un efecto inhibitorio sobre la iniciación y el desarrollo de los nódulos y la fijación de nitrógeno. Sin embargo, el grado de inhibición varía mucho según la especie de planta, las cepas de bacterias nódulos, las condiciones de crecimiento y el momento y nivel de aplicación de nitrógeno (Vincent, 1965).

La formación de nódulos y la intensificación de la actividad nodular se desencadenan cuando la semilla cuenta con reservas adecuadas de nitrógeno, en combinación con la presencia de nitrógeno mineral proveniente del suelo o de fertilizantes. Esta sincronización propicia un crecimiento vigoroso de las plantas durante las primeras semanas del establecimiento de las leguminosas (Hungria et al., 2005). Las observaciones sugieren que dosis moderadas de fertilizantes minerales, utilizadas como fuente inicial de nitrógeno, potencian tanto la

nodulación como la absorción general de nitrógeno derivado de la fijación de N<sub>2</sub> en la soya. Contrariamente, dosis elevadas de fertilizante disminuyen de manera significativa la formación de nódulos e interfieren con la eficacia de la fijación de N<sub>2</sub> (Marschner, 2012)

Con el aumento de las concentraciones de nitrógeno combinado, se observa una disminución en la actividad de la nitrogenasa y en el número de nódulos. En el caso de las arvejas, se ha notado que la exposición prolongada a niveles moderadamente altos de nitrógeno amoniacal (1 mM) no solo mejora la nodulación y la fijación de nitrógeno, sino que también estimula la tasa de multiplicación de pequeños nódulos en las raíces. Aunque un suministro elevado de nitrato generalmente inhibe la nodulación, existen variaciones genotípicas en la sensibilidad a los nitratos. En el frijol común, se observan diferencias en la inhibición de la nodulación debido a un alto aporte de nitratos, incluso entre diferentes cultivares (Marschner, 2012).

En el estudio de Ibáñez (2015) en el frijol común que se llevó a cabo en el Centro de Investigación del Altiplano Central, del Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas –ICTA- La Alameda, Chimaltenango. Se observó que la combinación del tratamiento de fertilización nitrogenada con *Rhizobium* resultó en un peso seco de follaje de 0.9401 g. Aunque no se encontraron diferencias estadísticas en los nódulos activos, pero si se obtuvo significancia entre las variedades en cuanto a los nódulos no activos, destacando ICTA Hunapú e ICTA Altense con las mayores cantidades. La fertilización con urea a una tasa de 25 kg ha<sup>-1</sup> exhibió el mayor peso seco de nódulos. El número de vainas por planta fue significativamente influenciado por la variedad de frijol, siendo ICTA Hunapú el de mayor cantidad. Se identificó una interacción notable entre la variedad y la dosis de urea en términos de granos por vaina y peso de 100 granos, mientras que no se observó un efecto atribuible a la inoculación de *Rhizobium*.

### **2.3. ANTECEDENTES**

En el estudio de Jiang et al. (2020), se evaluaron los efectos de diferentes concentraciones de nitrato sobre la nodulación de raíces en diversos genotipos de frijol común (*Phaseolus vulgaris*). Seis genotipos fueron inoculados con la misma cepa de rizobios y cultivados hidropónicamente en bolsas de crecimiento dentro de una cámara de crecimiento. Las plantas se expusieron a seis concentraciones de nitrato (0, 2.5, 5, 10, 15 y 20 mM) con un pH de 6.2 durante 4 semanas. Los genotipos utilizados fueron tres líneas endogámicas

recombinantes (RIL25, RIL46 y RIL70), dos parentales (Mist y Sanilac) y un mutante no nodulante (R99). Los resultados revelaron que pequeñas cantidades de nitrato (2.5 y 5 mM) promovieron la formación de nódulos y aumentaron su biomasa en comparación con las plantas del tratamiento control sin nitrato. Por el contrario, concentraciones de nitrato superiores a 10 mM inhibieron la nodulación, ocasionando reducciones en el número y la biomasa de los nódulos. La nodulación fue completamente suprimida por 15 mM de nitrato en todos los genotipos. Los análisis de regresión indicaron que 5 mM de nitrato es la concentración óptima para promover la nodulación, medida por el número total de nódulos formados, el número de nódulos efectivos formados y la biomasa de nódulos. En contraste, la fijación de nitrógeno se vio inhibida por todos los niveles de nitrato. No se observaron diferencias genotípicas en la nodulación entre los tres RIL y sus parentales; sin embargo, todos ellos difirieron significativamente de R99, el mutante no nodulante.

El estudio de Brenes et al. (2022) reveló que el número de nódulos en el cultivo de arveja fue significativamente mayor en el tratamiento C (*Rhizobium* + suelo andisol) en comparación con los tratamientos A (*Rhizobium* + arena) y B (*Rhizobium* + suelo andisol + urea). En el tratamiento B (tB), se aplicaron 19,5 g de urea cada 15 días hasta los 45 días después de la siembra (dds). Esta investigación destaca la importancia crucial de los microorganismos del suelo y las diversas propiedades del sustrato en la capacidad de las plantas para absorber nutrientes, especialmente nitrógeno, a través de la simbiosis con *Rhizobium*. Además, se observa claramente el efecto inhibitorio de los fertilizantes nitrogenados sobre la actividad de fijación microbiana en las arvejas, lo que subraya la importancia de regular el uso de estos fertilizantes en estos cultivos. En cuanto al peso seco, las raíces mostraron un mayor valor en el tratamiento tC=suelo andisol (2,34 g), seguido por tB=suelo andisol con aplicación de 58 g de urea/planta (0,8 g) y finalmente tA=arena (0,42 g). El peso seco de la parte aérea fue más alto en tC=suelo andisol (5,52 g), seguido por tA=arena (2,6 g) y tB=suelo andisol con aplicación de 58 g de urea/planta (2,18 g). Respecto al peso seco del nódulo, este alcanzó un valor máximo en tC=suelo andisol (1,34 g).

### **III. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1. UBICACIÓN DEL EXPERIMENTO**

La presente investigación se llevó a cabo en el invernadero del Departamento de Fitotecnia de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), situado en el distrito de La Molina, ciudad de Lima Metropolitana, Perú.

#### **3.2. MATERIALES**

##### **3.2.1. Sustratos inertes**

En esta investigación se emplearon dos tipos de sustratos: vermiculita expandida y arena fina. Ambos sustratos presentan características químicas casi inertes, lo que minimiza la posibilidad de alteraciones en los resultados esperados en consonancia con los objetivos planteados.

##### **3.2.1.1. Vermiculita expandida:**

La vermiculita expandida se obtiene mediante la exfoliación de un tipo específico de mica sometida a temperaturas superiores a 800 °C. Este material presenta una densidad aparente que oscila entre 90 y 140 kg/m<sup>3</sup>, y se encuentra en forma de escamas de 2 a 6 mm (Maroto, 2008). Según el autor, la vermiculita expandida tiene la capacidad de retener hasta 350 litros de agua por metro cúbico y muestra una adecuada capacidad de aireación, aunque tiende a compactarse con el tiempo. Asimismo, posee una alta capacidad de intercambio iónico estimada entre 80 y 120 meq/L. Las propiedades fisicoquímicas de la vermiculita expandida se detallan en la **tabla 4**.

**Tabla 4: Propiedades de la vermiculita expandida**

Propiedades	Valores
Porosidad total (%)	Mayor a 95
Retención de agua disponible (%)	Menor a 10
Capacidad de aireación (%)	Mayor a 50
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	0.50 – 0.192
pH	7
CIC (me/100g)	90 - 150
Mg (%)	9 - 12
K (%)	5 - 8

Fuente: (Abad y Noguera, 1997)

### **3.2.1.2. Arena fina:**

Para garantizar una porosidad adecuada con retención de agua mínima en los sustratos, se recomienda un rango de diámetro de partícula entre 0,5 y 2 mm. Partículas menores a 0,5 mm pueden ocasionar anoxia radicular, mientras que partículas mayores a 2 mm no absorben el agua de manera eficiente (Alvarado y Solano, 2002). Pire y Pereira (2003) evaluaron las características físicas de la arena fina, la cual presenta un diámetro de 0,05 a 1 mm, y determinaron un contenido de humedad del 1,6 %, una porosidad total del 37,3 %, una porosidad de aireación del 4,7 %, una retención de humedad del 32,6 % y una densidad aparente de 1,458 Mg/m<sup>3</sup>.

Entre las ventajas de la arena fina se encuentran su precio relativamente bajo, su estabilidad estructural y su facilidad para ser desinfectada y reutilizada. Sin embargo, también presenta desventajas, como una alta densidad aparente, una baja retención de agua y el impacto ambiental asociado a su extracción de playas. Estas consideraciones resaltan la importancia de evaluar cuidadosamente las propiedades y repercusiones de este material antes de seleccionarlo para aplicaciones específicas (Abad y Noguera, 1997).

### **3.2.2. Materiales biológicos**

#### **3.2.2.1. Frijol Canario Centenario**

La variedad Canario Centenario se desarrolló mediante la selección de líneas que fueron proporcionadas al programa de investigación y proyección social de leguminosas de grano

y oleaginosas de la UNALM en 1996. Esta variedad recientemente desarrollada se destaca por su alta productividad, con rendimientos que oscilan entre 2000 y 2500 kg ha<sup>-1</sup> en la costa, y 1500-1800 kg ha<sup>-1</sup> en la sierra baja. Por otro lado, exhibe una adaptación exitosa a climas templados y muestra resistencia a ciertos fitopatógenos como los virus, las royas y los oídium (Camarena et al., 2009).

### 3.2.2.2. *Rhizobium*

Se empleó la bacteria del género *Rhizobium* sp. como inoculante, ya que posee la capacidad de establecer una asociación simbiótica con el frijol. La cepa fue obtenida por el Laboratorio de Ecología Microbiana y Biotecnología “Marino Tabusso” de la UNALM. Estas cepas se caracterizan por su capacidad para formar colonias y multiplicarse de manera progresiva. Sus colonias se distinguen por ser cremosas, algunas con tonalidades anaranjadas, y presentan elasticidad con una producción significativa de mucosidad después de 24 horas de incubación.

## 3.3. TRATAMIENTO DE ESTUDIO

En los tratamientos experimentales se emplearon cuatro fuentes de fertilizantes inorgánicos: urea, nitrato de amonio, sulfato de amonio y fosfato diamónico (detalladas en la **tabla 5**). Estos fertilizantes se aplicaron en tres dosis de nitrógeno: 20, 40 y 80 ppm de N en 5 kg de sustrato (descritas en la **tabla 6**). Equivalentes en hectáreas, estas dosis corresponden a 40, 80 y 160 kg/ha, respectivamente. Todos los tratamientos, a excepción del control, fueron inoculados con *Rhizobium*.

**Tabla 5: Fuentes de fertilizantes nitrogenados**

Fuentes de nitrógeno		
F1	Urea	46 % N
F2	Nitrato de amonio	33 % N
F3	Sulfato de amonio	21 % N
F4	Fosfato diamónico	18 % N

**Tabla 6: Cantidad de aplicación de nitrógeno**

Dosis N	Maceta de 5 kg de sustrato
D1	20 ppm
D2	40 ppm
D3	80 ppm

**3.3.1. Distribución de los tratamientos**

Los tratamientos se distribuyeron en el invernadero de manera aleatoria en dos mesas como se detalla en la **figura 5**, donde se etiquetaron a las macetas con códigos de tres números  $\overline{FDR}$ , donde la F=Fuente Nitrogenada, D=dosis de nitrógeno, R=Repetición del tratamiento.

MESA 1			MESA 2		
102	105	101	106	104	103
115	113	114	111	116	112
124	125	121	123	122	126
135	133	134	131	136	132
211	215	213	212	216	214
226	224	225	223	221	222
235	233	234	236	232	231
311	314	313	312	315	316
325	322	326	321	323	324
334	331	333	336	335	332
415	416	412	414	413	411
421	425	426	422	423	424
433	431	435	436	432	434

**Figura 5: Aleatorización de las unidades experimentales de los tratamientos****3.3.2. Materiales de invernadero**

Se utilizaron en la investigación los siguientes insumos y equipos:

- 78 macetas de 5 kg
- Insecticidas y fungicidas
- Fertilizantes nitrogenados
- Fertilizantes fosfatado y potásico.
- Sobres de papel kraft

- Lápiz 2B
- Sobres de manila N° 8
- Cordel marcado a 40 cm
- Engrapador
- Libreta de anotaciones
- Cámara digital
- Balanza digital y gramera
- Chisguete de fumigar
- Ligas
- Plumón marcador permanente

### 3.4. MÉTODOS

#### 3.4.1. Métodos y procedimientos

Se instalaron 78 macetas con capacidad de 5 kg de sustrato, para la elaboración del sustrato, se mezcló la vermiculita y la arena en proporción 2:1. Previamente los sustratos fueron esterilizados por vapor durante 1 hora cada 24 horas durante tres veces continuas.

Una vez puestos los sustratos en las macetas se colocaron tres semillas de frijol var. Canario Centenario. previamente esterilizados con alcohol al 70 % (v/v) por un espacio de tres minutos cada uno. Luego, se eliminaron los restos del alcohol lavando las semillas en agua destilada estéril por tres veces.

Para la inoculación se siguió la metodología de Rincón (2010). Se utilizó la cepa *Rhizobium leguminosarum*, con una suspensión de  $10^6$ - $10^8$  cel./ml. Se mezcló 300 ml de agua destilada y 30 gr de azúcar (actúa como adherente), con los 20 ml del inóculo inicial. Se mezcló muy bien y con una pipeta se procedió a inocular a razón de 2 ml por semilla. 20 días después de la siembra, se volvió a inocular de nuevo, pero sin la dosis del azúcar.

Posterior a la germinación de las tres plántulas por maceta, se deshija a dos, quedando solo 1 planta por maceta. Esta planta fue la que se evaluó hasta la finalización de la investigación.

La fertilización nitrogenada se aplicó disolviéndola en soluciones nutritivas en dos momentos, la primera a los 20 días posterior a la siembra y la segunda a los 30 días posterior a la siembra, con las dosis descritas en la **tabla 7**, que son las cantidades de aplicación

convertidas de acuerdo a las concentraciones de nitrógeno que tienen cada uno de los fertilizantes inorgánicos.

El tratamiento testigo recibió fertilización nitrogenada de 10 ppm, la cual se asemeja al contenido que puede ser disponible para la planta extraído del suelo, ya que los sustratos vermiculita y la arena son inertes y no cuentan con nutrientes para que pueda desarrollarse la planta.

Las labores agrícolas que se realizaron en todas unidades experimentales y el tratamiento testigo fueron: el riego, la fertilización PK, aplicación de micronutrientes, el control de plagas y enfermedades.

La fertilización fosfatada y potásica se aplicó disolviéndola en soluciones nutritivas a todos los tratamientos incluido el control, con las dosis descritas en la **tabla 8**, que son las cantidades de aplicación convertidas de acuerdo a las concentraciones de potasio ( $K_2O$ ) y fósforo ( $P_2O_5$ ) que tienen cada uno de los fertilizantes.

Se instaló un termohigrómetro dentro del invernadero para medir el porcentaje de la humedad relativa y los máximos y mínimos de temperatura. Esto ayudó a poder contrastar con la temperatura y humedad del exterior y ver cómo está el ambiente dentro del invernadero. Con esto se tuvo un manejo más controlado en el riego y también la aireación dentro del invernadero.

**Tabla 7: Cantidad de aplicación de fertilizantes de fuentes nitrogenados**

<b>Fuente</b>	<b>Nitrógeno total</b>	<b>Repetición</b>	<b>Cantidad a aplicar (mg)</b>
Urea	20 ppm	R(1-6)	108.69
Urea	40 ppm	R(1-6)	217.39
Urea	80 ppm	R(1-6)	434.78
Nitrato de amonio	20 ppm	R(1-6)	151.51
Nitrato de amonio	40 ppm	R(1-6)	303.03
Nitrato de amonio	80 ppm	R(1-6)	606.06
Sulfato de amonio	20 ppm	R(1-6)	238.09
Sulfato de amonio	40 ppm	R(1-6)	476.19
Sulfato de amonio	80 ppm	R(1-6)	952.38
Fosfato diamónico	20 ppm	R(1-6)	277.77
Fosfato diamónico	40 ppm	R(1-6)	555.55
Fosfato diamónico	80 ppm	R(1-6)	1111.11

**Tabla 8: Fertilización fosfatada y potásica**

<b>Fertilizantes</b>	<b>SFT</b>	<b>KCl</b>
<b>Total</b>	332 mg	133 mg

### **3.4.2. Variables evaluadas en la investigación**

Las variables de estudio fueron la evaluación de la morfofisiología, la nodulación y el rendimiento del frijol. Para la evaluación morfofisiológica y nodulación se realizó en la etapa de floración, y para la evaluación del rendimiento se realizó en la etapa de madurez fisiológica. Por lo que, de las 6 repeticiones de cada tratamiento, se usaron tres repeticiones en la evaluación de la nodulación y 3 repeticiones en la evaluación de rendimiento. Las metodologías que se utilizaron son las que se muestran a continuación:

#### **3.4.2.1. Evaluación de variables morfofisiológicas**

La evaluación morfofisiológica fue durante la etapa de floración y se apegó al siguiente protocolo.

##### **1. Altura de la planta (cm)**

Tres plantas fueron seleccionadas al azar por cada tratamiento experimental, se calculó la altura desde la base del suelo hasta la punta del brote principal con una regla de 100 cm. Esta evaluación se llevó a cabo durante la fase de floración y el inicio de la fructificación. Además, estas tres plantas fueron empleadas para medir otras variables.

##### **2. Tamaño de la raíz (cm)**

Tres plantas fueron seleccionadas al azar por cada tratamiento experimental, se calculó el tamaño de la raíz midiendo desde el cuello radicular hasta la cofia de la raíz, con una regla de 100 cm. Esta evaluación se llevó a cabo durante la fase de floración y el inicio de la fructificación. Además, estas tres plantas fueron empleadas para medir otras variables.

### **3. Peso fresco del follaje (g)**

Tres plantas fueron seleccionadas al azar por cada tratamiento experimental, se calculó el peso fresco de la parte aérea de la planta. Se colocó cuidadosamente en una bolsa de papel Kraft. Posteriormente para su medición se empleó una balanza analítica.

### **4. Peso fresco de la raíz (g)**

Tres plantas fueron seleccionadas al azar por cada tratamiento experimental, se calculó el peso fresco de la parte radicular de la planta. Se colocó cuidadosamente en una bolsa de papel Kraft. Posteriormente para su medición se empleó una balanza analítica.

### **5. Peso seco del follaje (g)**

Tres plantas fueron seleccionadas al azar por cada tratamiento experimental. Se colocó la parte aérea de la planta a 50 °C en la estufa por 48 horas en una bolsa de papel Kraft. Posteriormente para su medición se empleó una balanza analítica.

### **6. Peso seco de la raíz (g)**

Tres plantas fueron seleccionadas al azar por cada tratamiento experimental. Se colocó la parte radicular de la planta a 50 °C en la estufa por 48 horas en una bolsa de papel Kraft. Posteriormente para su medición se empleó una balanza analítica.

### **7. Contenido total de nitrógeno foliar**

Se recolectó 100 hojas por cada tratamiento para posteriormente llevarlo al Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas y Fertilizantes (LASPAF) para su análisis.

#### **3.4.2.2. Evaluación de variables nodulares**

La evaluación del nódulo fue durante la etapa de floración y se apegó al siguiente protocolo.

##### **1. Número de nódulos por planta**

La cuantificación de los nódulos radiculares se realizó mediante el programa Image-J. Es un software diseñado para el procesamiento de imágenes digitales,

principalmente diseñado para aplicaciones en el ámbito científico. El cual puede medir áreas, contar objetos, etc.

## **2. Medición del área nodular (en cm<sup>2</sup>)**

La evaluación del área nodular se realizó mediante el programa Image-J. En el cual se puede tomar la medida del área total nodular de cada raíz.

## **3. Observación de la forma del nódulo**

Se establecieron dos categorías: redondas y/o alargadas, a partir de la observación de cinco nódulos seleccionados al azar.

## **4. Determinación de la posición de los nódulos**

La posición de los nódulos se identificó en función de su ubicación, categorizándolo en extremo superior, medio e inferior.

## **5. Coloración en el interior del nódulo**

Se seleccionaron y examinaron quince nódulos de tamaño sobresaliente. Cada nódulo fue cortado por la mitad para evaluar su efectividad, determinando su eficacia según la coloración. Se consideró que un nódulo era efectivo si su color variaba de rojo a marrón, indicando una alta efectividad. En contraste, si la coloración iba de verde a crema, se consideraba que el nódulo tenía una baja efectividad.

**Tabla 9: Escala de evaluación de la coloración del nódulo**

<b>Escala</b>	<b>Pigmento del nódulo</b>
1	Crema
2	Verdoso
3	Marrón
4	Rojizo

## **6. Cálculo del peso fresco de nódulos (mg)**

Se cuantificó el peso fresco de 100 nódulos de cada planta tomada al azar de cada unidad experimental del tratamiento. Se colocó cuidadosamente en una bolsa de

papel Kraft. Posteriormente para su medición se empleó una balanza gramera milimétrica tomando el valor promedio de los 100 nódulos.

#### **7. Cálculo del peso seco de nódulos (mg)**

Se cuantificó el peso seco de 100 nódulos de cada planta tomada al azar de cada unidad experimental del tratamiento. Se colocó a 50 °C en la estufa por 48 horas en una bolsa de papel Kraft. Posteriormente para su medición se empleó una balanza gramera milimétrica tomando el valor promedio de los 100 nódulos.

#### **3.4.2.3. Evaluación de variables para el rendimiento**

La evaluación del rendimiento fue durante la etapa de maduración y se apegó al siguiente protocolo.

##### **1. Número de vainas por planta**

Se cuantificó la cantidad de vainas cosechadas por planta, posteriormente se promedió los resultados de las unidades experimentales para cada tratamiento.

##### **2. Número de semillas por vaina**

Se cuantificó la cantidad de semillas por vaina, posteriormente se promedió los resultados de las unidades experimentales para cada tratamiento.

##### **3. Medición de longitud y diámetro de vaina (cm)**

Se calculó la longitud y el diámetro de la vaina con una regla de 30 cm, para lo cual se promedió los resultados de las unidades experimentales para cada tratamiento.

##### **4. Peso seco de cien semillas (g)**

Se calculó el peso seco de las semillas de las vainas maduras y se registró el promedio de las tres unidades experimentales para cada tratamiento. Se utilizó una balanza analítica para la medición de su peso.

## **5. Cálculo del peso fresco de follaje (g)**

Se calculó el peso fresco de la porción aérea seleccionando al azar tres unidades experimentales de cada tratamiento. Se utilizó una balanza analítica para la medición de su peso, y posteriormente, la parte aérea fue colocada en una bolsa de papel Kraft.

## **6. Cálculo del peso fresco de vaina (g)**

Se calculó el peso fresco de la vaina seleccionando al azar tres unidades experimentales de cada tratamiento. Se utilizó una balanza analítica para medir su peso, y posteriormente, la vaina fue colocada en una bolsa de papel Kraft.

## **7. Cálculo del peso seco de follaje (g)**

Se calculó el peso seco del follaje seleccionando al azar muestras de cada unidad experimental del tratamiento. Se colocó a 50 °C en la estufa por 48 horas. Se usó una balanza analítica para tomar su peso.

## **8. Cálculo del peso seco de vaina (g)**

Se calculó el peso seco de las vainas seleccionando al azar muestras de cada unidad experimental del tratamiento. Las vainas fueron sometidas a una temperatura de 50 °C en la estufa durante 48 horas, y se utilizó una balanza analítica para registrar su peso.

## **9. Cálculo del índice de cosecha (%)**

El índice de cosecha constituye un parámetro que refleja la eficacia de una variedad en términos de rendimiento. Se consideran más eficientes las variedades que acumulan más materia seca en la semilla en proporción a la biomasa total de la planta. Este índice se calculó utilizando datos sobre el peso total de las plantas y el peso seco de la semilla. La determinación del peso seco se llevó a cabo poniendo las muestras a un horno a una temperatura de 50 °C durante un periodo de 48 horas.

$$\% \text{ IC} = \frac{\text{Peso seco del grano} \times 100}{* \text{ Peso seco total}}$$

**\*= Abarca tallos, racimos, vainas, granos y hojas secas**

## 10. Cuantificación del rendimiento de grano seco (g planta<sup>-1</sup>)

Es el peso total de todas las semillas secas obtenidas de las vainas maduras en cada tratamiento fue meticulosamente medidas por una balanza analítica. Posteriormente, se calcularon los promedios de las tres repeticiones y se expresaron en gramos por planta.

### 3.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

#### 3.5.1. Diseño experimental

El ensayo que se instaló, siguió un modelo DCA en arreglo factorial 4 x 3, que consistió en 12 tratamientos experimentales y un tratamiento control, el factor 1: fuentes de nitrógeno y el factor 2: dosis de aplicación, con seis repeticiones por cada tratamiento.

Para el análisis de variancia se desarrolló de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + AB_{ij} + \epsilon_{ijk}$$

Para:

$i = 1, 2, \dots, r$  (4 fuentes de nitrógeno)

$j = 1, 2, \dots, t$  (3 dosis)

$k = 1, 2, \dots, t$  (6 repeticiones)

Donde:

$Y_{ijk}$  = observación correspondiente a la  $i$ -ésima fuente en el  $j$ -ésimo dosis y  $k$ -ésimo repetición.

$\mu$  = media general.

$A_i$  = Efecto de la  $i$ -ésima fuente.

$B_j$  = Efecto de la  $j$ -ésima dosis.

$\check{Y}_k$  = Efecto de la  $k$ -ésima repetición.

$(AB)_{ij}$  = Efecto de la interacción de los tratamientos y las dosis.

$\epsilon_{ijk}$  = Error

**Tabla 10: Grados de libertad considerando la interacción entre los factores**

Fuentes de variación	Grados de libertad	Número de G.L.	
		Sin el tratamiento	Con el tratamiento
		control	control
Fuentes	(a-1)	3	3
Dosis	(b-1)	2	2
Interacción	(a-1) (b-1)	6	6
Error experimental	ab (r-1)	24	26
Total	abr - 1	35	38

### 3.5.2. Tratamiento estadístico

Los resultados fueron sometidos al análisis de varianza (ANVA) de dos vías; y los promedios fueron comparados mediante la prueba de comparación de medias de la diferencia honestamente significativa (HSD) de Tukey ( $\alpha = 0.05$ ). Para los análisis estadísticos de las distintas variables se usó el software R-Studio y para las gráficas se usó el software Graphpad Prism 10.

## **IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **4.1. EVALUACIONES MORFOFISIOLÓGICAS**

Se detalla en las tablas los valores promedios de los tratamientos de las principales variables morfofisiológicas obtenidos en el estudio. Posteriormente se analiza un análisis de varianza de las variables para ver las diferencias significativas para cada uno de los factores y finalmente una prueba de evaluación de medias de los factores para cada variable morfofisiológica.

**Tabla 11: Resultados promedios de las variables morfofisiológicas evaluadas de los tratamientos**

Fuente	Dosis (ppm)	Altura de planta (cm)	Tamaño de raíz (cm)	Peso fresco (g)		Peso seco (g)	
				follaje	raíz	follaje	raíz
Urea	20	51.8	21	70.67	45.33	10.53	5.03
Urea	40	52.7	19.7	71.67	40.00	10.64	5.32
Urea	80	57.8	21.5	83.67	33.33	12.06	4.80
Nitrato de amonio	20	55.2	20.2	75.67	30.67	10.04	4.03
Nitrato de amonio	40	65	23.2	78.33	48.00	10.46	4.44
Nitrato de amonio	80	70.3	22.7	81.00	36.00	10.98	4.29
Sulfato de amonio	20	49.8	21.9	63.67	30.33	9.84	3.73
Sulfato de amonio	40	57.9	18.2	65.33	30.67	10.07	4.15
Sulfato de amonio	80	70.7	20.9	78.67	26.67	10.59	4.27
Fosfato diamónico	20	44	22.7	68.67	24.33	9.64	4.17
Fosfato diamónico	40	48.5	18.4	72.33	24.67	10.18	4.12
Fosfato diamónico	80	79.9	26.5	96.33	24.33	13.28	4.09
Control	Control	39.5	19.8	28.67	2.99	4.44	0.81
<b>Promedio</b>		<b>57.2</b>	<b>21.3</b>	<b>71.90</b>	<b>30.56</b>	<b>10.21</b>	<b>4.10</b>

**Tabla 12: Cuadro de análisis de varianza de las variables morfofisiológicas evaluadas en la investigación**

Fuente de variación	G.L.	Altura de planta (cm)	Tamaño de raíz (cm)	Peso fresco (g)		Peso seco (g)	
				follaje	raíz	follaje	raíz
Fuente	3	359.1***	8.9	1654.6***	972.6***	28.3***	10.2***
Dosis	2	1200.5***	28.1	813.3***	99.5**	9.9***	0.2
Fuente: dosis	6	163.5***	14.4	81.8	86.7**	1.6*	0.1
Error residual	26	18.0	11.7	49.2	16.7	0.6	0.3
Total	38						
<b>C.V. (%)</b>		7.4	16.1	9.75	13.39	7.78	14.90
<b>Promedio</b>		<b>57.2</b>	<b>21.3</b>	<b>71.90</b>	<b>30.56</b>	<b>10.21</b>	<b>4.10</b>

C.V. (%) Coeficiente de variación Significación estadística: \* (0.01<p<0.05), \*\* (0.001<p<0.01), \*\*\* (p<0.001).

**Tabla 13: Prueba de comparación de medias de Tukey para evaluar las variables morfofisiológicas en función del factor fuente de nitrógeno**

Fuente	Altura de planta (cm)	Tamaño de raíz (cm)	Peso fresco (g)		Peso seco (g)	
			follaje	raíz	follaje	raíz
Nitrato de amonio	63.5 a	22.0 a	78.33 ab	38.22 a	10.49 a	4.25 ab
Sulfato de amonio	59.5 ab	20.3 a	69.22 b	29.22 b	10.17 b	4.05 c
Fosfato diamónico	57.4 b	22.5 a	79.11 a	24.44 b	11.03 a	4.13 b
Urea	54.1 b	20.8 a	75.33 ab	39.56 a	11.08 a	5.05 a
Control	39.5 c	19.8 a	28.67 c	2.99 c	4.44 b	0.81 c

Significación estadística:  $p < 0,05$  (Los valores dentro de una columna seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes ( $P > 0.05$ ), según la prueba de comparación de medias HSD de Tukey).

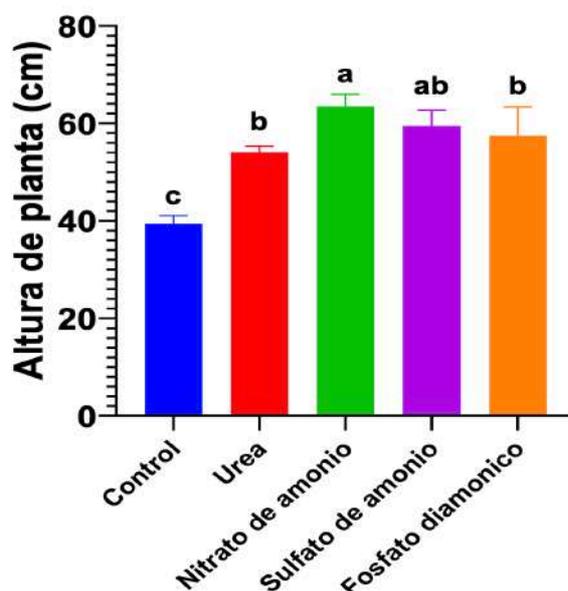
**Tabla 14: Prueba de comparación de medias de Tukey para evaluar las variables morfofisiológicas en función del factor dosis de nitrógeno**

Dosis (ppm)	Altura de planta (cm)	Tamaño de raíz (cm)	Peso fresco (g)		Peso seco (g)	
			follaje	raíz	follaje	raíz
80	69.7 a	22.9 a	84.92 a	30.08 b	11.73 a	4.36 a
40	56 b	19.9 a	71.92 b	35.83 a	10.34 b	4.51 a
20	50.2 c	21.5 a	69.67 b	32.67 ab	10.01 b	4.24 a
Control	39.5 d	19.8 a	28.67 c	2.99 c	4.44 c	0.81 b

**Significación estadística:  $p < 0,05$  (Los valores dentro de una columna seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes ( $P > 0.05$ ), según la prueba de comparación de medias HSD de Tukey).**

#### 4.1.1. Altura de planta (cm)

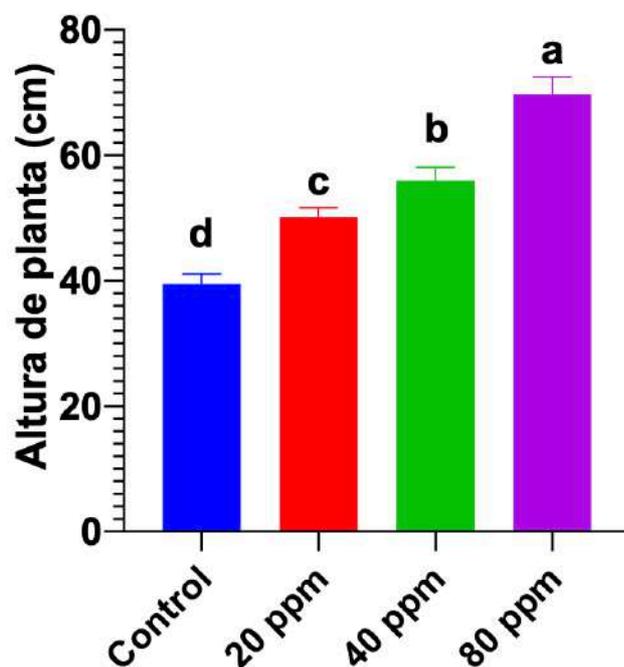
Los resultados promedio de la altura de las plantas en los diferentes tratamientos se presentan en la **Tabla 11**. Se observa que el tratamiento con fosfato diamónico y 80 ppm de N alcanzó la mayor altura, con un valor de 79,9 cm, mientras que el tratamiento control presentó la altura más baja, con 39,5 cm. El promedio general de altura de las plantas fue de 57,2 cm. El análisis de varianza, detallado en la **Tabla 12**, reveló una alta significancia estadística para la fuente de nitrógeno, la dosis de fertilización y la interacción entre la fuente y la dosis. El coeficiente de variación fue del 7,4 %.



**Figura 6: Efecto de diferentes fuentes de nitrógeno en la altura de planta (cm) del frijol Canario Centenario**

Barras verticales, error estándar de la media. Letras diferentes, medias de los valores correspondientes a cada tratamiento difieren entre sí significativamente ( $p > 0,05$ ).

La prueba de medias según Tukey, aplicada a la altura de las plantas en función del factor fuente de nitrógeno (**Tabla 13 y Figura 6**), reveló diferencias estadísticas significativas. El nitrato de amonio se posicionó como la fuente de nitrógeno con mayor valor promedio, alcanzando los 63,5 cm, superando estadísticamente al sulfato de amonio, que registró un valor de 59,5 cm. Por otro lado, no se encontraron diferencias significativas entre la fuente de fosfato diamónico (57,4 cm) y la fuente de urea (54,1 cm).



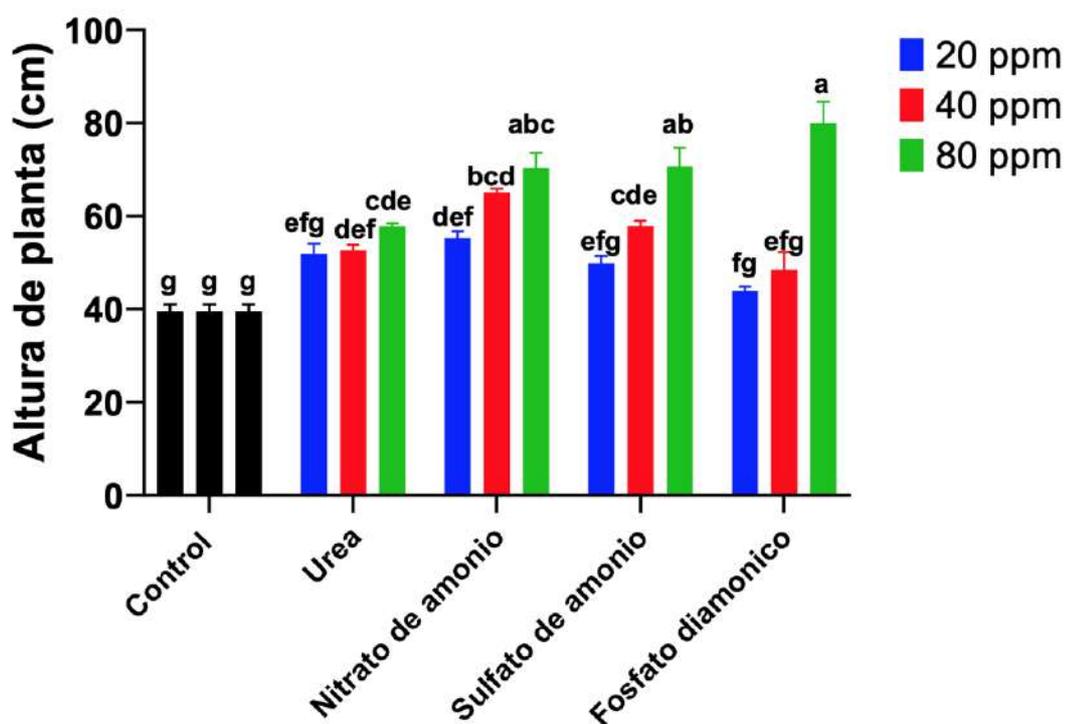
**Figura 7: Efecto de dosis crecientes de nitrógeno en la altura de planta (cm) del frijol Canario Centenario**

Al realizar la prueba de medias según Tukey de la altura de la planta sobre el factor dosis de fertilización que se detalla en la **tabla 14** y en la **figura 7**. Se halló diferencias estadísticas, donde la dosis de 80 ppm de N fue la que presentó mayor valor con 69.7 cm, superando estadísticamente a la dosis de 40 ppm de N que registró un valor de 56 cm, a la dosis de 20 ppm de N que registró un valor de 50.2 cm y por último la dosis que registró un menor valor fue el tratamiento control con un valor de 39.5 cm.

Las plantas mostraron un crecimiento máximo cuando se les suministró una concentración de nitrógeno de 80 ppm, ya que los niveles más altos de nitrógeno influyeron positivamente en su desarrollo en altura (Monsalve et al., 2009). En la investigación de Moudiongui y Rinaudo (1987), demostró que el incremento de la dosis de nitrato de amonio inoculada con *Rhizobium* en la leguminosa *Sesbania rostrata*, dio efecto positivo en el tamaño, con una dosis de 1.5 mM (120 mg) dio 105.8 cm, con una dosis de 3 mM (240 mg) dio 122.6 cm y con una dosis de 6 mM (480 mg) dio 127 cm.

**Tabla 15: Prueba de comparación de medias de Tukey de la variable altura de planta (cm) del frijol Canario Centenario**

TRATAMIENTOS	ALTURA (cm)
FDA:80	79.9 a
SA:80	70.7 ab
NAM:80	70.3 abc
NAM:40	65 bcd
SA:40	57.9 cde
UREA:80	57.8 cde
NAM:20	55.2 def
UREA:40	52.7 def
UREA:20	51.7 efg
SA:20	49.8 efg
FDA:40	48.5 efg
FDA:20	44 fg
CONTROL	39.5 g



**Figura 8: Efecto de fuentes y dosis de nitrógeno en la altura de planta (cm) del frijol Canario Centenario**

Tras el carbono, el nitrógeno (N) es el componente que las plantas requieren en cantidades más significativas (Marschner, 2012). Aproximadamente, entre el 1 – 5 % de la materia seca total de las plantas está compuesto por nitrógeno (Marschner, 2012). Este elemento es esencial en la formación de proteínas, ácidos nucleicos, clorofila, coenzimas, fitohormonas y metabolitos secundarios, siendo un componente fundamental para diversos procesos metabólicos (Marschner, 2012). Hasta el 81,5 - 87,1 % del N absorbido por las raíces de la soya y fijado por los nódulos de las raíces se suministró para el desarrollo de la planta (Zhang et al., 2020). Por lo tanto, la disponibilidad de nitrógeno en las raíces juega un rol fundamental en el desarrollo de las plantas. Como se observa en la **tabla 15** y la **figura 8**, la altura máxima se observó con el tratamiento de fosfato diamónico con dosis de 80 ppm de N con un valor de 79.9 cm de altura, donde la concentración del fósforo que posee el fertilizante ayudó a fortalecer este resultado. Según Olivera et al., (2004), se considera importante en el metabolismo energético de las plantas y en la fijación de nitrógeno (N<sub>2</sub>) al fósforo, debido a la considerable demanda que se tiene de ATP en la reacción de la enzima nitrogenasa.

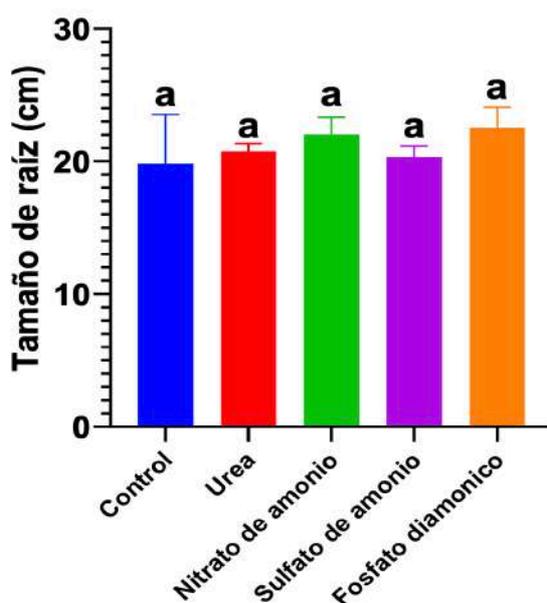
El tratamiento que mostró el valor más bajo fue el control, y uno de los factores que contribuyeron a esto es la deficiencia de nitrógeno. Para que las plantas alcancen un crecimiento, desarrollo y reproducción eficientes, es necesario que reciban cantidades apropiadas, pero no excesivas, de nitrógeno. (Marschner, 2012). En el estudio de Jiang et al. (2020), las plantas se volvieron más robustas con hojas más verdes y más grandes cuando las concentraciones de nitrato aumentaron de 0 a 20 mM después de dos a tres semanas de siembra. A niveles bajos o nulos de nitrato (2,5 mM), los genotipos difieren en el verdor de las hojas (contenido de clorofila). En particular, R99 tenía hojas amarillas anormales, mientras que los otros cinco genotipos (Mist, Sanilac, RIL25, RIL46 y RIL70) que pudieron fijar nitrógeno tenían hojas más verdes.

El valor promedio general de altura de planta del frijol Canario Centenario que se obtuvo fue de 57.2 cm, comparado con otros autores, es mayor a los que obtuvo Espinoza (2009) y Cántaro (2015) que obtuvieron un promedio de 38.02 y 38.64 cm respectivamente; y siendo menor a lo obtenido por Ocaña (2016) con 65.24 cm. Los datos obtenidos por los investigadores son en producción en campo y con otros factores de evaluación. La metodología que usó Espinoza fue evaluar 16 genotipos seleccionados de frijol var. Canario Centenario a una distancia de siembra de 20 cm, dando una mayor densidad de plantas por hectárea. Cántaro evaluó la fertilización nitrogenada con tres tipos de cepas de *Rhizobium* y

un tratamiento químico a una distancia de siembra de 30 cm. Ocaña evaluó la fertilización nitrogenada con el fertilizante nitrato de amonio con una dosis de 80 kg ha<sup>-1</sup> de N, a una distancia de siembra de 20 cm.

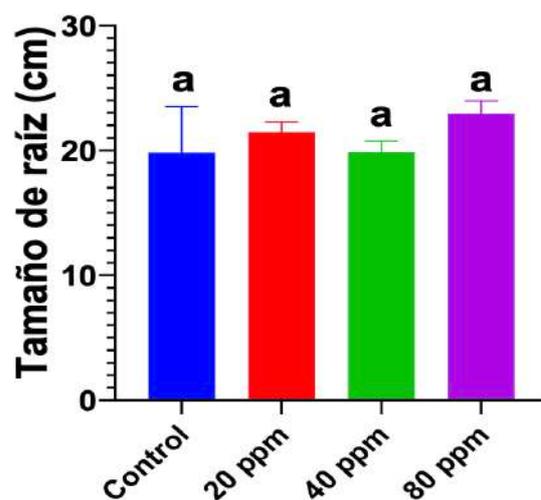
#### 4.1.2. Tamaño de la raíz

Los hallazgos promedio del tamaño de la raíz de los tratamientos evaluados se detallan en la **tabla 11**. Se observa que el tratamiento con fosfato diamónico y 80 ppm de N mostró el mayor tamaño, alcanzando 26.5 cm, mientras que el tratamiento con sulfato de amonio y 40 ppm de N exhibió el valor más bajo con 18.2 cm. El promedio general del tamaño fue de 21.3 cm. Al realizar el análisis de varianza como se muestra en la **tabla 12**, no se encontró diferencias significativas para la fuente de nitrógeno, la dosis de fertilización y para la relación de la fuente entre la dosis, el coeficiente de variación fue de 16.1 %.



**Figura 9: Efecto de diferentes fuentes de nitrógeno en el tamaño de raíz (cm) del frijol Canario Centenario**

En la **figura 9**, se muestran los valores del tamaño de la raíz en relación con las fuentes de nitrógeno, como se observa en la **tabla 12** de la prueba de ANVA, no se encuentran diferencias significativas entre sí. El tamaño de raíz promedio del fertilizante fosfato diamónico fue de 22.5 cm, del nitrato de amonio fue de 22 cm, de la urea 20.8 cm y del sulfato de amonio fue de 20.3 cm.

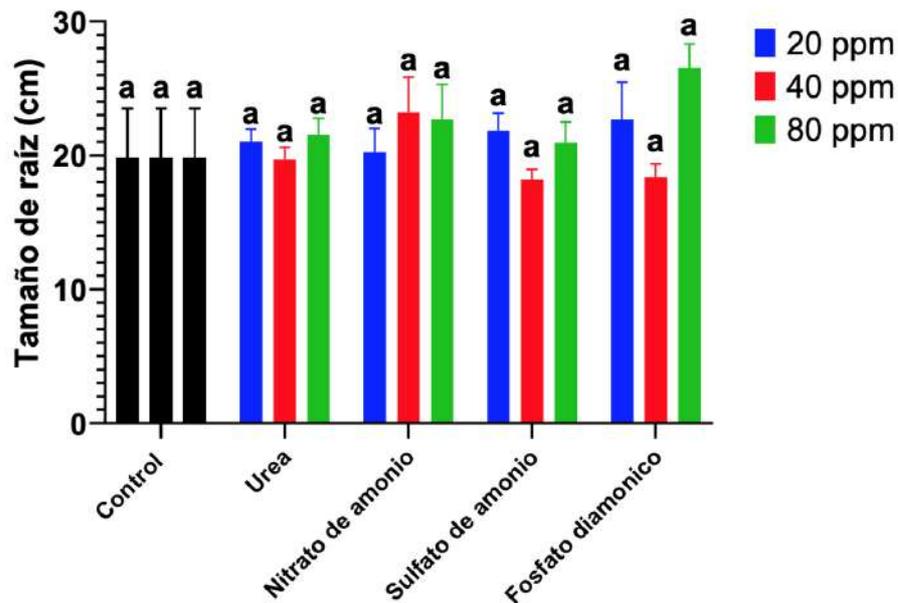


**Figura 10: Efecto de dosis crecientes de nitrógeno en el tamaño de la raíz (cm) del frijol Canario Centenario**

En la **figura 10**, se muestran los valores del tamaño de la raíz en relación con las dosis de fertilización, como se observa en la **tabla 12** de la prueba de ANVA, no se encuentran diferencias significativas entre sí. El tamaño de raíz promedio de la dosis de 80 ppm de N fue 69.7 cm, de la dosis de 20 ppm de N fue de 21.5 cm y de la dosis 40 ppm de N fue de 19.9 cm.

**Tabla 16: Tamaño de la raíz (cm) del frijol Canario Centenario**

TRATAMIENTOS	TAMAÑO DE LA RAÍZ (cm)
FDA:80	26.5 a
NAM:40	23.2 a
NAM:80	22.7 a
FDA:20	22.7 a
SA:20	21.9 a
UREA:80	21.5 a
UREA:20	21.0 a
SA:80	20.9 a
NAM:20	20.2 a
CONTROL	19.8 a
UREA:40	19.7 a
FDA:40	18.4 a
SA:40	18.2 a



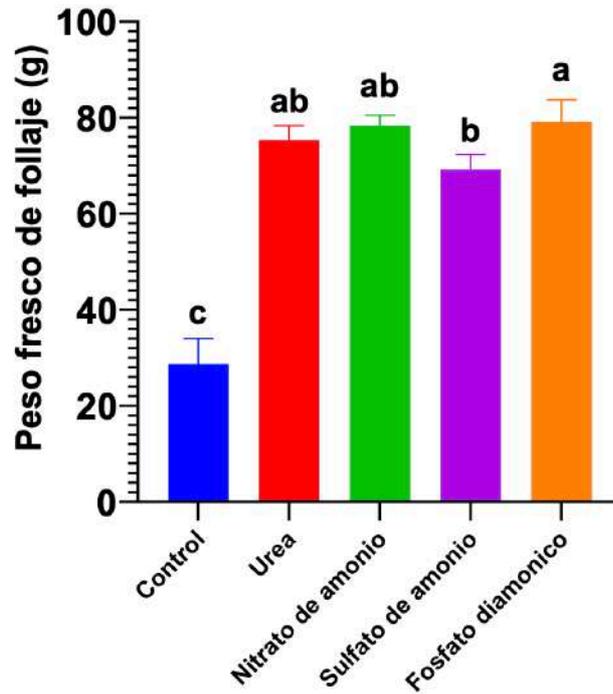
**Figura 11: Efecto de fuentes y dosis de nitrógeno en el tamaño de la raíz (cm) del frijol Canario Centenario**

Como se observa en la **tabla 16** y la **figura 11**, el mayor tamaño de la raíz se registró en el tratamiento fosfato diamónico con la dosis de 80 ppm de N con un valor de 26.5 cm, lo cual no se llegó a encontrar diferencias estadísticas con los demás tratamientos.

El tamaño de las raíces depende mucho de los nutrientes como el nitrato, fosfato y magnesio (Marschner, 2012). La correcta aplicación del nitrógeno y fósforo mejora el crecimiento de las raíces (Ma et al., 2009).

#### **4.1.3. Peso fresco de follaje (g)**

Los hallazgos promedio del peso fresco del follaje de los tratamientos evaluados se detallan en la **tabla 11**. Se observa que el tratamiento con fosfato diamónico y 80 ppm de N mostró el mayor peso, alcanzando 96.33 g, mientras que el tratamiento control exhibió el valor más bajo con 28.67 g. El promedio general del peso fue de 71.90 g. Al realizar el análisis de varianza como se muestra en la **tabla 12**, se identificó alta significación estadística para la fuente de nitrógeno, la dosis de fertilización y no halló diferencias significativas para la relación de la fuente entre la dosis, el coeficiente de variación fue de 9.751 %.

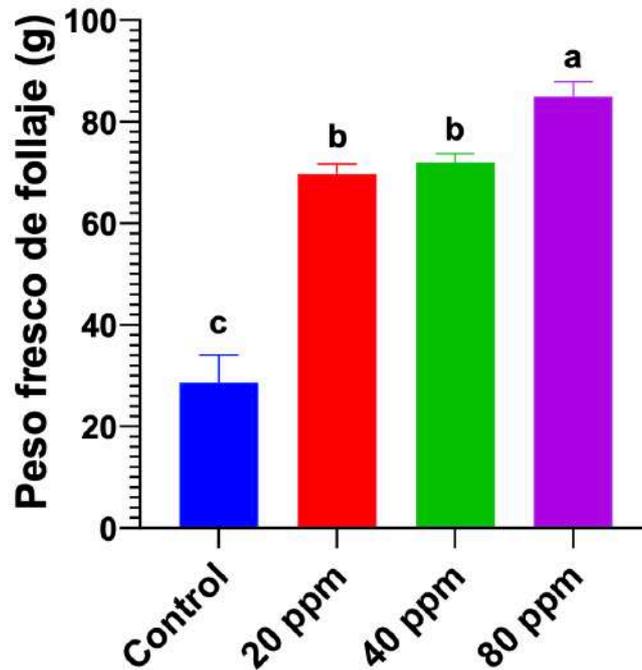


**Figura 12: Efecto de diferentes fuentes de nitrógeno en el peso fresco de follaje (g) del frijol Canario Centenario**

Al realizar la prueba de medias según Tukey del peso fresco del follaje sobre el factor fuente de nitrógeno como se detalla en la **tabla 13** y en la **figura 12**. Se halló diferencias estadísticas entre la fuente de fosfato diamónico que fue la que presentó mayor valor con 79.11 g, superando estadísticamente a la fuente de nitrato de amonio y urea que registraron un valor de 78.33 y 75.33 g respectivamente, ambas no muestran diferencias estadísticas entre sí y la fuente de sulfato de amonio registró un valor de 69.22 g.

Altas cantidades de N y P inoculadas con *Rhizobium* estimularon una mayor biomasa vegetal de *Pisum sativum* L. que los granos (Chuma et al., 2022).

Una comparación de diferentes fuentes de N mostró que el crecimiento de las plántulas (peso fresco o seco) siempre fue mayor en nitrato que varias fuentes de N reducido (Lahav et al., 1976). Sin embargo, la urea fue mejor que otras fuentes de N reducido “glutamina, malato de amonio y otras sales de amonio en legumbres” (Cheema y Ahmad, 2000).



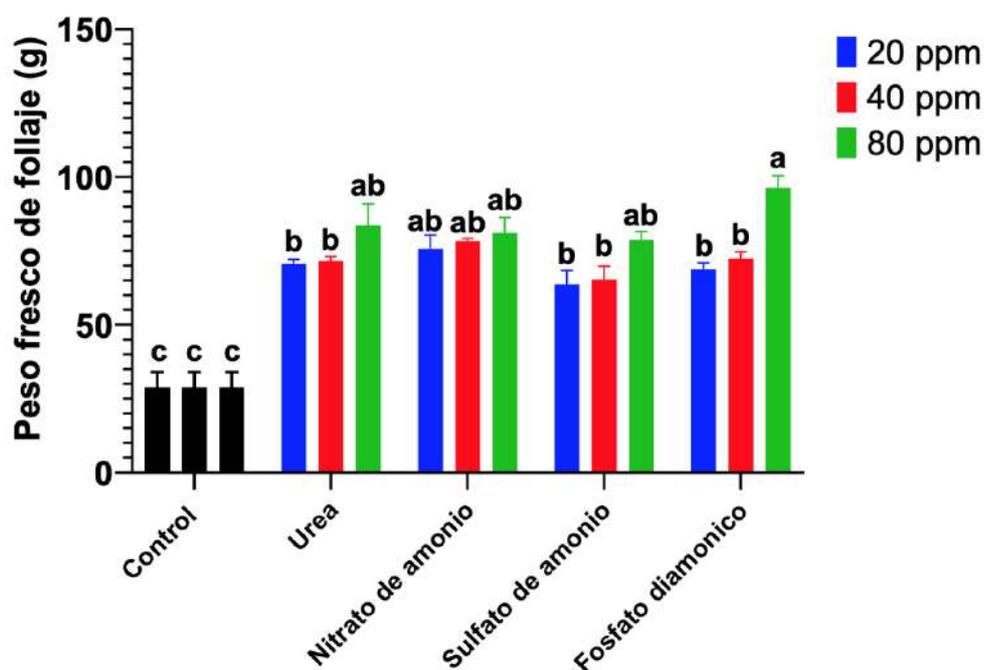
**Figura 13: Efecto de dosis crecientes de nitrógeno en el peso fresco del forraje (g) del frijol Canario Centenario**

Al realizar la prueba de medias según Tukey del peso fresco del follaje sobre el factor dosis de fertilización como se detalla en la **tabla 14** y la **figura 13**. Se halló diferencias estadísticas entre la dosis de 80 ppm de N que fue la que presentó mayor valor con 84.92 g, superando estadísticamente a la dosis de 40 ppm de N y 20 ppm de N que registraron un valor de 71.92 y 69.67 g respectivamente, ambas no muestran diferencias estadísticas entre sí.

En la investigación de Chuma (2022), en el cultivo de arveja (*Pisum sativum* L.) donde se aplicaron tres dosis de fosfato diamónico (100, 150 y 200 kg ha<sup>-1</sup>) en la inoculación con *Rhizobium* con tres niveles de densidad de siembra, demostró que conforme aumenta la dosis de aplicación, aumenta la biomasa dando el mayor valor la aplicación de 200 kg ha<sup>-1</sup>, pero que también conforme se aumenta la densidad de siembra se reduce la biomasa.

**Tabla 17: Prueba de comparación de medias de Tukey de la variable peso fresco del follaje (g) del frijol Canario Centenario**

TRATAMIENTOS	PESO FRESCO DEL FOLLAJE (g)
FDA:80	96.33 a
UREA:80	83.67 ab
NAM:80	81.00 ab
SA:80	78.67 ab
NAM:40	78.33 ab
NAM:20	75.67 ab
FDA:40	72.33 b
UREA:40	71.67 b
UREA:20	70.67 b
FDA:20	68.67 b
SA:40	65.33 b
SA:20	63.67 b
CONTROL	28.67 c



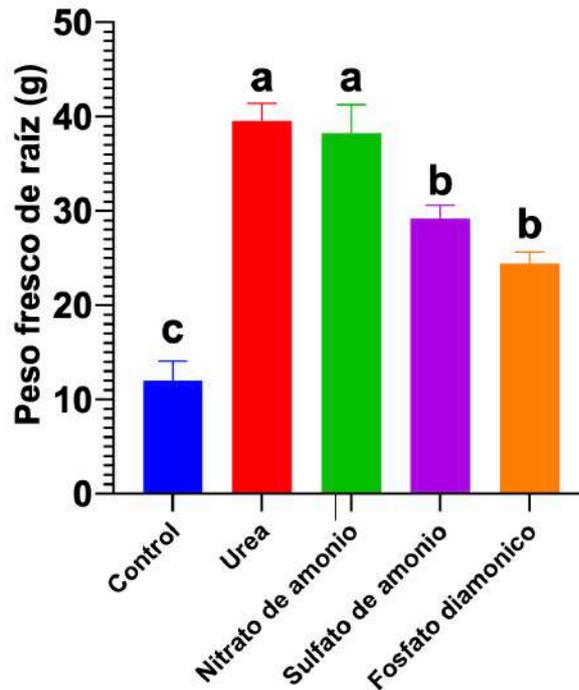
**Figura 14: Efecto de fuentes y dosis de nitrógeno en el peso fresco del forraje (g) del frijol Canario Centenario**

Como se observa en la **tabla 17** y la **figura 14**, el mayor peso fresco de follaje se registró en el tratamiento fosfato diamónico con la dosis de 80 ppm de N con un valor de 96.333 g, llegándose a encontrar diferencias estadísticas con los demás tratamientos. Según Izquierdo (1988), reporta que la aplicación de superfosfato incrementa significativamente el peso fresco en frijol al igual que Alinaitwe (2019) que la aplicación de fertilizantes DAP combinados con la inoculación de rizobio aumentó el crecimiento del cultivo de frijol con la dosis de 75 kg ha<sup>-1</sup>. La dosis de 80 ppm de nitrógeno registró los mayores pesos frescos, debido a que el nitrógeno es promotor al crecimiento en las plantas de frijol común.

El valor promedio general del peso fresco del follaje del frijol Canario Centenario que se obtuvo fue de 71.90 g es mayor comparado a lo que obtuvo Cántaro (2015), con un valor promedio de 36.75 g. El dato obtenido por el investigador fue a base de una producción en campo y con otros factores de evaluación.

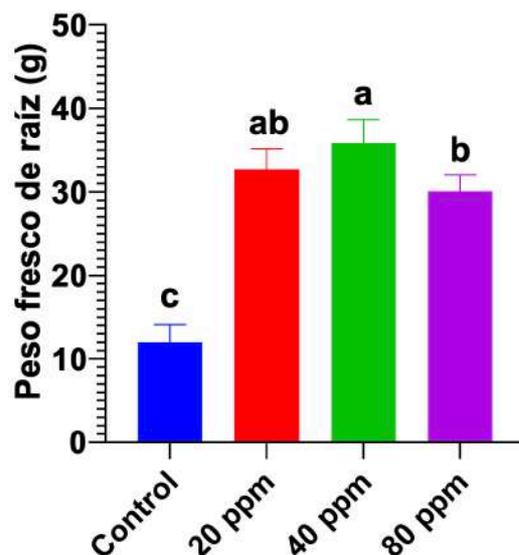
#### **4.1.4. Peso fresco de raíces (g)**

Los hallazgos promedio del peso fresco de las raíces de los tratamientos evaluados se detallan en la **tabla 11**. Se observa que el tratamiento con nitrato de amonio y 40 ppm de N mostró el mayor peso, alcanzando 48.00 g, mientras que el tratamiento control exhibió el valor más bajo con 2.99 g. El promedio general del peso fue de 30.56 g. Al realizar el análisis de varianza, detallado en la **tabla 12**, se identificó una alta significancia estadística para la fuente de nitrógeno, la dosis de fertilización y la relación entre la fuente y la dosis. El coeficiente de variación fue de 13.387 %.



**Figura 15: Efecto de diferentes fuentes de nitrógeno en el peso fresco de raíces (g) del frijol Canario Centenario**

Al realizar la prueba de medias según Tukey del peso fresco de las raíces sobre el factor fuente de nitrógeno como se detalla en la **tabla 13** y en la **figura 15**. La fuente de urea y nitrato de amonio fueron las que presentaron los mayores valores con 39.56 y 38.22 g respectivamente, ambas no muestran diferencias estadísticas entre sí, superando estadísticamente a la fuente de sulfato de amonio y fosfato diamónico que registraron un valor de 29.22 y 24.44 g respectivamente, ambas no muestran diferencias estadísticas entre sí.

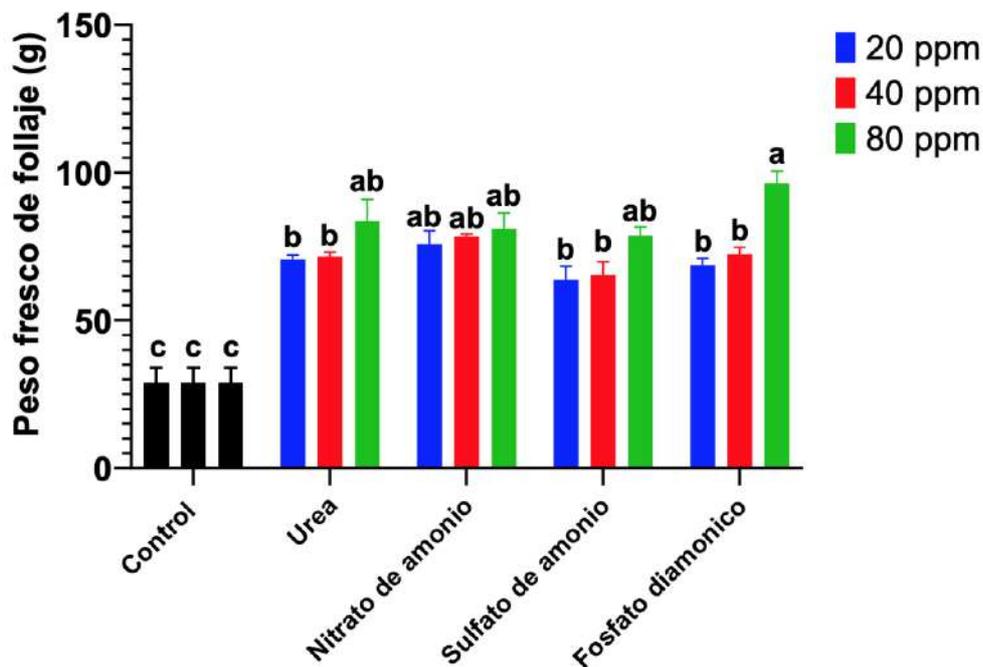


**Figura 16: Efecto de dosis crecientes de nitrógeno el peso fresco de raíces (g) del frijol Canario Centenario**

Al realizar la prueba de medias según Tukey del peso fresco de las raíces sobre el factor dosis de fertilización como se detalla en la **tabla 14** y en la **figura 16**. Se halló diferencias estadísticas donde la dosis de 40 ppm de N fue la que presentó mayor valor con 35.83 g, superando estadísticamente a la dosis de 20 ppm de N que registró un valor de 32.67 g y a la dosis de 80 ppm de N que registró un valor de 30.08 g.

**Tabla 18: Prueba de comparación de medias de Tukey de la variable peso fresco de la raíz (g) del frijol Canario Centenario**

TRATAMIENTOS	PESO FRESCO DE LA RAÍZ (g)
NAM:40	48.00 a
UREA:20	45.33 ab
UREA:40	40.00 abc
NAM:80	36.00 abcd
UREA:80	33.33 bcd
NAM:20	30.67 cd
SA:40	30.67 cd
SA:20	30.33 cd
SA:80	26.67 d
FDA:40	24.67 d
FDA:20	24.33 d
FDA:80	24.33 d
CONTROL	2.99 e



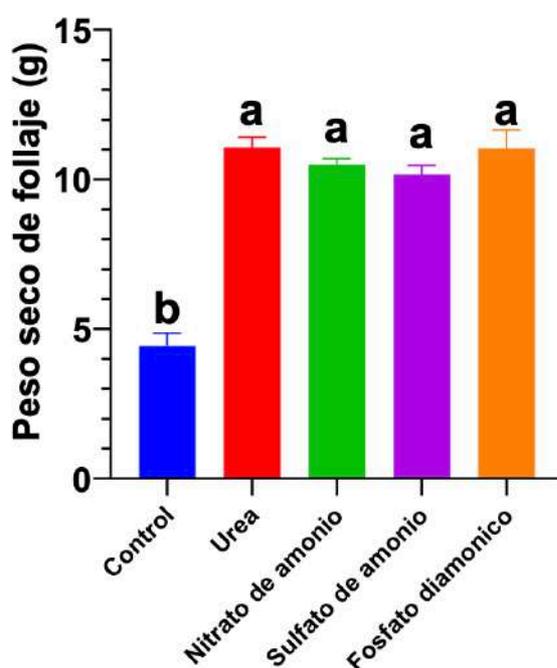
**Figura 17: Efecto de fuentes y dosis de nitrógeno en el peso fresco de raíces (g) del frijol Canario Centenario**

Como se observa en la **tabla 18** y la **figura 17**, el mayor peso fresco de raíz se registró en el tratamiento nitrato de amonio con la dosis de 40 ppm de N con un valor de 48 g, llegándose a encontrar diferencias estadísticas con los demás tratamientos. Hasta el 12,9 - 18,5 % del N absorbido por las raíces de la soya y fijado por los nódulos de las raíces se suministró para el desarrollo de las raíces y nódulos (Zhang et al., 2020). Según Coutts y Philipson (1977) el nitrógeno es a menudo el nutriente más eficaz en términos de estimulación localizada del crecimiento de las raíces; el fósforo muestra algún efecto y el potasio ninguno. Ciertos microorganismos pueden estimular considerablemente el crecimiento de las raíces y a menudo se les conoce como microorganismos de la rizósfera y promotores del crecimiento vegetal (PGPR) que influyen en el crecimiento de las raíces principalmente mejorando la disponibilidad de nutrientes, produciendo fitohormonas e inhibiendo patógenos (Dutta y Podile, 2010).

El valor promedio general del peso fresco de la raíz del frijol Canario Centenario que se obtuvo fue de 30.56 g es mayor comparado a lo que obtuvo Cántaro (2015), con un valor promedio de 2.72 g. El dato obtenido por el investigador fue a base de una producción en campo y con otros factores de evaluación.

#### 4.1.5. Peso seco de follaje (g)

Los hallazgos promedio del peso seco del follaje de los tratamientos evaluados se detallan en la **tabla 11**. Se observa que el tratamiento con fosfato diamónico y 80 ppm de N mostró el mayor peso, alcanzando 13.28 g, mientras que el tratamiento control exhibió el valor más bajo con 4.44 g. El promedio general del peso fue de 10.21 g. Al realizar el análisis de varianza, detallado en la **tabla 12**, se encontró una significancia estadística alta para la fuente de nitrógeno, la dosis de fertilización y la relación entre la fuente y la dosis. El coeficiente de variación fue de 7.784 %.

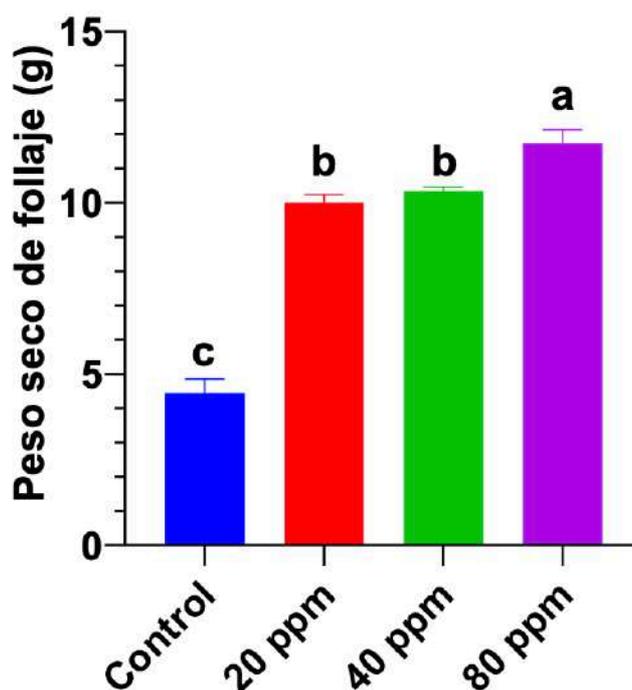


**Figura 18: Efecto de diferentes fuentes de nitrógeno en el peso seco del follaje (g) del frijol Canario Centenario**

En la **figura 18**, se muestran los valores del peso seco del follaje en relación con las fuentes de nitrógeno, como se observa en la **tabla 12** de la prueba de ANVA, no se encuentran diferencias significativas entre sí. El peso seco promedio de la urea fue de 11.08 g, del fosfato diamónico fue de 11.03 g, del nitrato de amonio fue de 10.49 g y del sulfato de amonio fue de 10.17 g.

En el trabajo de investigación de Sousa (2022), donde se aplicó el fertilizante en forma de urea, con un total de 90 kg ha<sup>-1</sup> de N, en 3 fases: siembra (P), fase fenológica (V4) y fase

fenológica (R5) en la planta de frijol, en dos campos experimentales. Los tratamientos utilizados fueron: P<sub>0</sub>V<sub>40</sub>R<sub>50</sub>, P<sub>0</sub>V<sub>45</sub>R<sub>545</sub>, P<sub>0</sub>V<sub>90</sub>R<sub>50</sub>, P<sub>0</sub>V<sub>40</sub>R<sub>590</sub>, P<sub>30</sub>V<sub>430</sub>R<sub>530</sub>, P<sub>30</sub>V<sub>460</sub>R<sub>50</sub>, P<sub>30</sub>V<sub>40</sub>R<sub>560</sub>, P<sub>60</sub>V<sub>430</sub>R<sub>50</sub>, P<sub>60</sub>V<sub>40</sub>R<sub>530</sub> y P<sub>90</sub>V<sub>40</sub>R<sub>50</sub>. Todos los tratamientos fueron inoculados con inóculo de turba que contenía la cepa comercial SEMIA 4077 (*Rhizobium tropici*). El tratamiento fertilizado evaluado en prefloración que dio el valor más alto de peso seco de follaje fue P<sub>30</sub>V<sub>460</sub>R<sub>50</sub> con 13.52 g y el que dio el menor valor fue P<sub>0</sub>V<sub>45</sub>R<sub>545</sub> con 7.72 g, y el tratamiento testigo obtuvo 6.75 g.



**Figura 19:** Efecto de dosis crecientes de nitrógeno en el peso seco del follaje (g) del frijol *Canario Centenario*

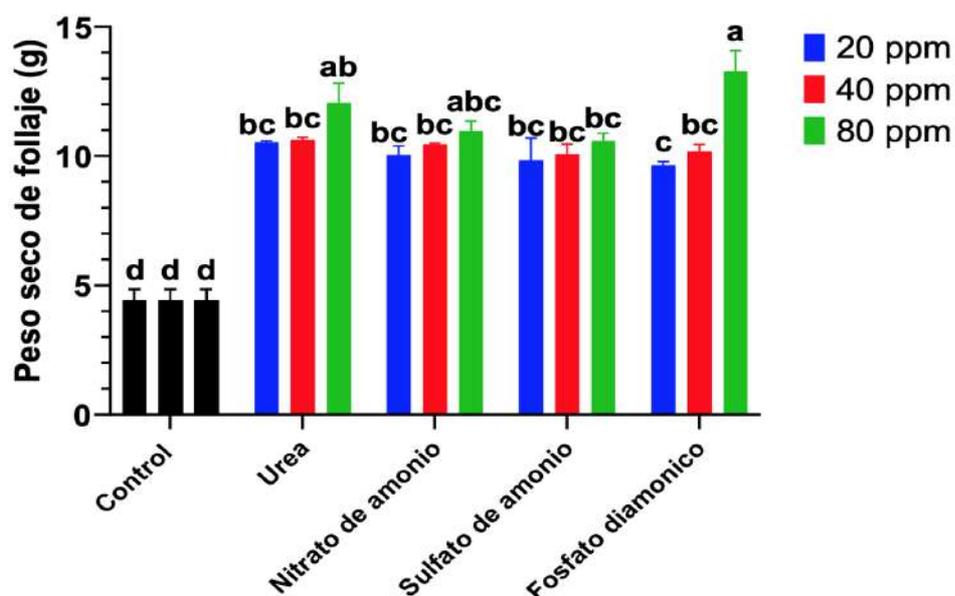
Al realizar la prueba de medias según Tukey del peso seco del follaje sobre el factor dosis de fertilización como se detalla en la **tabla 14** y en la **figura 19**. Se identificaron diferencias estadísticas significativas entre la dosis de 80 ppm de N, que fue la que exhibió el valor más elevado con 11.73 g, superando estadísticamente a las dosis de 40 ppm de N y 20 ppm de N, que registraron 10.34 y 10.01 g respectivamente. No se observaron diferencias estadísticas significativas entre estas dos últimas.

En la investigación de Moudiongui y Rinaudo (1987), demostró que el incremento de la dosis de nitrato de amonio inoculada con *Rhizobium* en la leguminosa *Sesbania rostrata*, dio

efecto positivo en el peso seco del follaje con una dosis de 1.5 mM (120 mg) dio 7.45 g y con una dosis de 3 mM (240 mg) dio 8.31 g y con una dosis de 6 mM (480 mg) 9.38 g.

**Tabla 19: Prueba de comparación de medias de Tukey de la variable peso seco del follaje (g) del frijol Canario Centenario**

TRATAMIENTOS	PESO SECO DEL FOLLAJE (g)
FDA:80	13.28 a
UREA:80	12.06 ab
NAM:80	10.98 abc
UREA:40	10.64 bc
SA:80	10.59 bc
UREA:20	10.53 bc
NAM:40	10.46 bc
FDA:40	10.18 bc
SA:40	10.07 bc
NAM:20	10.04 bc
SA:20	9.84 bc
FDA:20	9.64 c
CONTROL	4.44 d



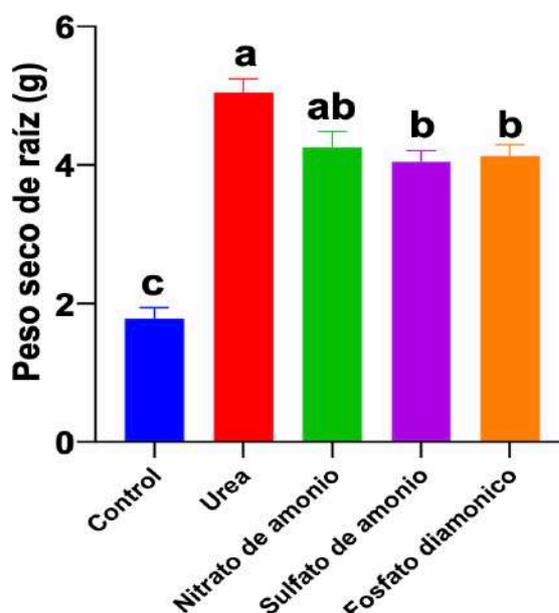
**Figura 20: Efecto de fuentes y dosis de nitrógeno en el peso seco del follaje (g) del frijol Canario Centenario**

Como se observa en la **tabla 19** y la **figura 20**, el mayor peso seco de follaje se registró en el tratamiento fosfato diamónico con la dosis de 80 ppm de N con un valor de 13.28 g, llegándose a encontrar diferencias estadísticas con los demás tratamientos. Los tratamientos con dosis de 80 ppm de nitrógeno fueron los que registraron los mayores pesos frescos.

El valor promedio general del peso seco del follaje del frijol Canario Centenario que se obtuvo fue de 10.21 g es mayor comparado a lo que obtuvo Cántaro (2015), con un valor promedio de 9.07 g. El dato obtenido por el investigador fue a base de una producción en campo y con otros factores de evaluación.

#### 4.1.6. Peso seco de raíces (g)

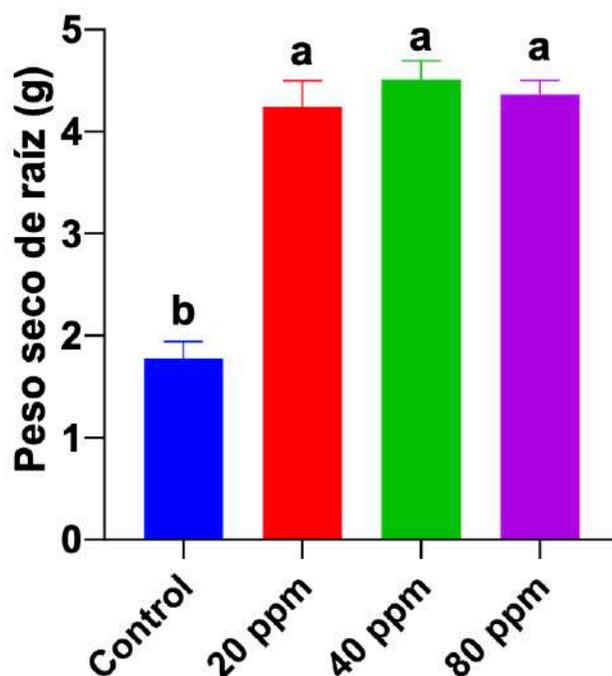
Los hallazgos promedio del peso seco de las raíces de los tratamientos evaluados se detallan en la **tabla 11**. Se observa que el tratamiento con urea y 40 ppm de N mostró el mayor peso, alcanzando 5.32 g, mientras que el tratamiento control exhibió el valor más bajo con 0.81 g. El promedio general del peso fue de 4.10 g. Al realizar el análisis de varianza, que se encuentra en la **tabla 12**, se identificó una alta significación estadística para la fuente de nitrógeno. No se identificaron diferencias significativas para la dosis de fertilización ni para la relación de la fuente entre la dosis. El coeficiente de variación obtenido fue del 14.897 %.



**Figura 21: Efecto de diferentes fuentes de nitrógeno en el peso seco de raíces (g) del frijol Canario Centenario**

Al realizar la prueba de medias según Tukey del peso seco de las raíces sobre el factor fuente de nitrógeno como se detalla en la **tabla 13** y en la **figura 21**. Se halló diferencias estadísticas entre la fuente de urea que fue la que presentó el mayor valor con 5.05 g, superando estadísticamente a la fuente de nitrato de amonio que registró un valor de 4.25 g, a la fuente de fosfato diamónico que registró un valor de 4.13 g, y por último el sulfato de amonio que registró un valor de 4.05 g, los tres últimos no muestran diferencias estadísticas entre sí respectivamente.

En el trabajo de investigación de Sousa (2022), con el tratamiento combinado de *Rhizobium* y urea evaluada en prefloración. Dio el valor más alto de peso seco de raíces en el tratamiento P<sub>60</sub>V<sub>40</sub>R<sub>530</sub> con 0.95 mg y el que dio el menor valor fue en el tratamiento P<sub>0</sub>V<sub>490</sub>R<sub>50</sub> con 0.45 mg, y el tratamiento testigo obtuvo 0.57 mg.

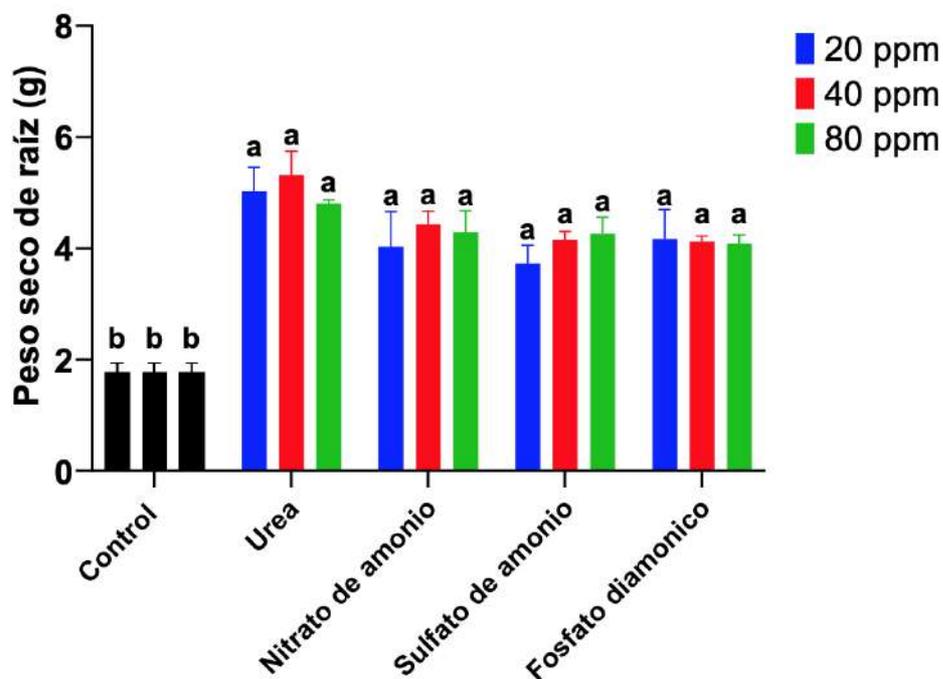


**Figura 22: Efecto de dosis crecientes de nitrógeno en el peso seco de raíces (g) del frijol Canario Centenario**

En la **figura 22**, se muestran los valores del peso seco de las raíces en relación con las dosis de fertilización, como se observa en la **tabla 12** de la prueba de ANVA, no se encuentran diferencias significativas entre sí. Las dosis de 40 mg, 80 mg y 20 ppm de N que obtuvieron valores de 4.51, 4.36 y 4.24 g respectivamente.

**Tabla 20: Prueba de comparación de medias de Tukey de la variable peso seco de la raíz (g) del frijol Canario Centenario**

TRATAMIENTOS	PESO SECO DE LA RAÍZ (g)
UREA:40	5.32 a
UREA:20	5.03 a
UREA:80	4.80 a
NAM:40	4.44 a
NAM:80	4.29 a
SA:80	4.27 a
FDA:20	4.17 a
SA:40	4.15 a
FDA:40	4.12 a
FDA:80	4.09 a
NAM:20	4.03 a
SA:20	3.73 a
CONTROL	0.81 b



**Figura 23: Efecto de fuentes y dosis de nitrógeno en el peso seco de raíces (g) del frijol Canario Centenario**

Como se observa en la **tabla 20** y la **figura 23**, el mayor peso seco de raíz se registró en el tratamiento de la urea con la dosis de 40 ppm de N con un valor de 5.32 g, no se llegó a encontrar diferencias estadísticas entre los tratamientos a excepción del tratamiento control que registró el menor valor.

El valor promedio general del peso seco de la raíz del frijol Canario Centenario que se obtuvo fue de 4.10 g es mayor comparado a lo que obtuvo Cántaro (2015), con un valor promedio de 2.64 g. El dato obtenido por el investigador fue a base de una producción en campo y con otros factores de evaluación.

#### 4.1.7. Contenido total de nitrógeno foliar

El nitrógeno (N) es esencial para el desarrollo de las plantas y constituye una proporción significativa de su materia seca total, comprendiendo aproximadamente entre el 1 % y el 5 %. Este elemento desempeña un papel integral en la formación de proteínas, ácidos nucleicos, clorofila, coenzimas, fitohormonas y metabolitos secundarios (Marschner, 2012).

**Tabla 21: Contenido de nitrógeno foliar (g) de frijol Canario Centenario**

Tratamientos	Contenido de nitrógeno foliar (g/planta)
Urea:80	0.690
Nitrato:80	0.654
Fosfato:80	0.638
Sulfato:80	0.594
Fosfato:40	0.565
Nitrato:40	0.563
Fosfato:20	0.550
Urea:40	0.527
Sulfato:40	0.482
Sulfato:20	0.460
Urea:20	0.453
Nitrato:20	0.438
Control	0.180

El tratamiento urea con dosis de 80 ppm de N registró el mayor contenido de nitrógeno con 0.690 g y el tratamiento control fue el que obtuvo el menor contenido de nitrógeno con 0.180

g (**tabla 21**). Estos cálculos se obtuvieron a base del análisis foliar de nitrógeno por el laboratorio de suelos de la UNALM. Los tratamientos con dosis de 80 ppm de N, registraron los mayores valores del contenido de nitrógeno.

En el estudio de Hamdi (1978), en el cultivo de frijol caupí, se usó los fertilizantes de urea y sulfato de amonio inoculados con *Rhizobium*. Las dosis del nitrógeno aplicado fueron (0, 5, 10, 20 y 40 kg de N/feccan), en unidades utilizadas en Perú sería (0, 12, 24, 48 y 96 kg de N/ha). En nuestra investigación las dosis aplicadas fueron de 20, 40 y 80 ppm de N, llevadas a hectáreas sería 40, 80 y 160 kg ha<sup>-1</sup> de nitrógeno. La cantidad de nitrógeno por planta encontrada en la dosis de 0, 12, 24, 48 y 96 kg de N/ha de urea fueron 120, 122, 150, 195 y 121 mg respectivamente y en la dosis de 0, 12, 24, 48 y 96 kg de N/ha de sulfato de amonio se obtuvieron 120, 122, 111, 140 y 125 mg respectivamente. En el frijol caupí al aumentar la dosis de urea aumenta el contenido de nitrógeno en la planta, pero se detiene en la dosis de 48 kg de N/ha, y empieza a decrecer en la dosis de 96 kg de N/ha. En comparación con nuestra investigación en el frijol Canario Centenario, conforme aumenta la dosis de urea aumenta la concentración de nitrógeno en la planta. En el fertilizante sulfato de amonio al aumentar la dosis de 0 a 12 kg de N/ha aumenta el contenido de nitrógeno en la planta, luego disminuye en la dosis 24 kg de N/ha, luego aumenta en la dosis 48 kg de N/ha y luego disminuye en la dosis 96 kg, mostrando una tendencia no precisa. En comparación con nuestra investigación en el frijol Canario Centenario, conforme aumenta la dosis de sulfato de amonio aumenta la concentración de nitrógeno en la planta. En ambas investigaciones el contenido de nitrógeno en la planta dio el valor más alto en el tratamiento de la urea en relación al sulfato de amonio.

En la investigación de Moudiongui y Rinaudo (1987), demostró que el incremento de la dosis de nitrato de amonio inoculada con *Rhizobium* en la leguminosa *Sesbania rostrata*, dio efecto positivo en el contenido total de la planta, con una dosis de 1.5 mM (120 mg) dio 0.242 g, con una dosis de 3 mM (240 mg) dio 0.291 g y con una dosis de 6 mM (480 mg) dio 0.420 g total de nitrógeno por planta respectivamente.

## **4.2. EVALUACIONES DE LA NODULACIÓN**

A continuación, se detalla en las tablas los valores promedios de los tratamientos de las principales variables de la nodulación obtenidos en el estudio. Luego, se lleva a cabo un análisis de varianza para examinar las diferencias significativas entre las variables para cada factor. Finalmente, se realiza una prueba de comparación de medias para evaluar los factores en relación con cada variable de nodulación.

**Tabla 22: Resultados promedios de las variables de la nodulación evaluadas de los tratamientos**

<b>Factor fuente</b>	<b>Factor dosis</b>	<b>Número de nódulos por planta</b>	<b>Efectividad nodular</b>	<b>Área nodular (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Forma de nódulos</b>	<b>Posición de nódulos</b>	<b>Color interno del nódulo</b>	<b>Peso fresco de nódulos (mg)</b>	<b>Peso seco de nódulos (mg)</b>
Urea	20	50	87 %	0.929	Redonda	todas	6R, 7M y 2V	2.08	0.11
Urea	40	100	60 %	1.789	Redonda	todas	4R, 5M, 4V y 2C	4.39	0.22
Urea	80	37	13 %	0.623	Redonda	Medio-Inferior	2M, 9V y 4C	1.13	0.06
Nitrato de amonio	20	74	73 %	1.280	Redonda	todas	5R y 6M, 2V y 2C	4.22	0.21
Nitrato de amonio	40	89	60 %	1.790	Redonda	todas	5R, 4M y 6V	4.54	0.22
Nitrato de amonio	80	12	7 %	0.205	Redonda	Medio-Inferior	1M, 12V y 2C	0.73	0.05
Sulfato de amonio	20	17	53 %	0.237	Redonda	todas	1 R, 7 M, 4V y 3C	2.19	0.12
Sulfato de amonio	40	77	40 %	1.433	Redonda	todas	6M y 9V	2.83	0.14
Sulfato de amonio	80	10	0 %	0.182	Redonda	Medio-Inferior	8V y 7C	0.46	0.03
Fosfato diamónico	20	62	60 %	1.055	Redonda	Medio-Inferior	2R, 7M y 6V	3.19	0.15
Fosfato diamónico	40	76	40 %	1.516	Redonda	todas	2R, 4M y 9V	4.78	0.23
Fosfato diamónico	80	16	0 %	0.265	Redonda	todas	9V y 6C	0.94	0.05
<b>Promedio</b>		<b>51</b>	<b>41 %</b>	<b>0.942</b>				<b>2.63</b>	<b>0.13</b>

**Tabla 23: Cuadro de análisis de varianza de de las variables de la nodulación evaluadas en la investigación**

Fuente de variación	G.L.	Número de nódulos por planta	Efectividad nodular	Área nodular (cm <sup>2</sup> )	Peso fresco de nódulos (mg)	Peso seco de nódulos u (mg)
Fuente	3	1357	0.034**	0.473	317.09***	0.657***
Dosis	2	13308***	0.424***	5.211***	3394.68***	7.797***
Fuente: dosis	6	662	0.26*	0.182	121.67**	0.265***
Error residual	24	723	0.0027	0.268	24.03	0.038
Total	35					
<b>C.V. (%)</b>		<b>51.792</b>	<b>12.67</b>	<b>54.878</b>	<b>18.672</b>	<b>14.860</b>
<b>Promedio</b>		<b>51</b>	<b>0.41</b>	<b>0.94</b>	<b>2.63</b>	<b>0.13</b>

C.V. (%) Coeficiente de variación

Significación estadística: \* (0.01<p<0.05), \*\* (0.001<p<0.01), \*\*\* (p<0.001).

**Tabla 24: Prueba de comparación de medias de Tukey de las variables de la nodulación en función del factor fuente de nitrógeno**

Fuente	Número de nódulos por planta	Efectividad nodular	Área nodular (cm <sup>2</sup> )	Peso fresco de nódulos (mg)	Peso seco de nódulos (mg)
Urea	62 a	53 % a	1.114 a	2.53 a	0.13 b
Nitrato de amonio	58 a	47 % b	1.092 a	3.17 a	0.16 a
Fosfato diamónico	51 a	31 % c	0.945 a	2.97 a	0.14 ab
Sulfato de amonio	34 a	33 % c	0.617 a	1.83 b	0.10 c

Significación estadística: p < 0,05 (Los valores dentro de una columna seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes (P > 0.05), según la prueba de comparación de medias HSD de Tukey).

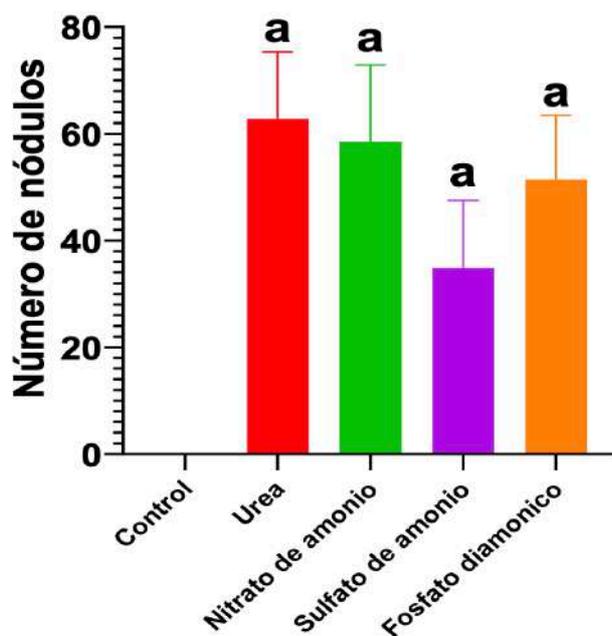
**Tabla 25: Prueba de comparación de medias de Tukey de las variables de nodulación en función del factor dosis de nitrógeno**

<b>Fuente</b>	<b>Número de nódulos por planta</b>	<b>Efectividad nodular</b>	<b>Área nodular (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Peso fresco de nódulos (mg)</b>	<b>Peso seco de nódulos (mg)</b>
40	85 <b>a</b>	68 % <b>a</b>	1.632 <b>a</b>	4.14 <b>a</b>	0.20 <b>a</b>
20	51 <b>b</b>	50 % <b>b</b>	0.875 <b>b</b>	2.92 <b>b</b>	0.15 <b>b</b>
80	19 <b>c</b>	5 % <b>c</b>	0.319 <b>c</b>	0.81 <b>c</b>	0.04 <b>c</b>

**Significación estadística:  $p < 0,05$  (Los valores dentro de una columna seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes ( $P > 0.05$ ), según la prueba de comparación de medias HSD de Tukey).**

#### 4.2.1. Número de nódulos por planta

Los resultados promedio del número de nódulos en las raíces de los tratamientos evaluados se detallan en la **tabla 22**. Se observa que el tratamiento con urea y 40 ppm de N mostró el mayor número de nódulos, alcanzando 100 nódulos, mientras que el tratamiento de sulfato de amonio y 80 ppm de N, exhibió el menor valor con 10 nódulos. El promedio general de nódulos fue de 51 nódulos. Al realizar el análisis de varianza que se encuentra en la **tabla 23**, se identificó una alta significancia estadística para la dosis de fertilización, pero no se encontraron diferencias significativas para la fuente de nitrógeno ni para la relación entre la fuente y la dosis. El coeficiente de variación fue del 51.792 %, mostrando una media aritmética no representativa, por ende, el conjunto de datos no es "Homogéneo".

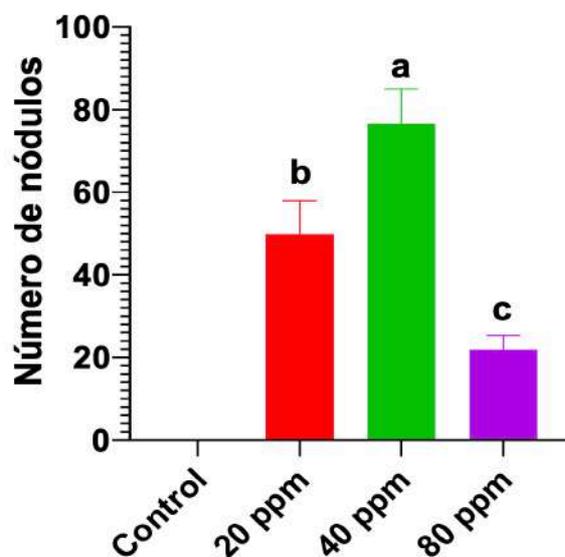


**Figura 24: Efecto de diferentes fuentes de nitrógeno en el número de nódulos del frijol Canario Centenario**

En la **figura 24**, se muestran los valores de los números de nódulos en relación con las fuentes de nitrógeno, como se observa en la **tabla 23** de la prueba de ANVA, no se encuentran diferencias significativas entre sí. El número de nódulos promedio de la urea fue de 62, del nitrato de amonio fue de 58, del fosfato diamónico fue de 51 y del sulfato de amonio fue de 34.

La urea parece bastante atractiva como fuente de N ya que permite una extensa nodulación de las leguminosas en relación con el  $\text{NO}_3^-$  (Cheema y Ahmad, 2000).

En el trabajo de investigación de Sousa (2022), con el tratamiento combinado de *Rhizobium* y urea evaluada en prefloración, dio el valor más alto de nódulos en los tratamientos  $\text{P}_0\text{V}_{490}\text{R}_{50}$  y  $\text{P}_0\text{V}_{40}\text{R}_{590}$  con 48 unidades y el que dio el menor valor fue el tratamiento  $\text{P}_{60}\text{V}_{40}\text{R}_{530}$  con 10 unidades, y el tratamiento testigo obtuvo 86 unidades.

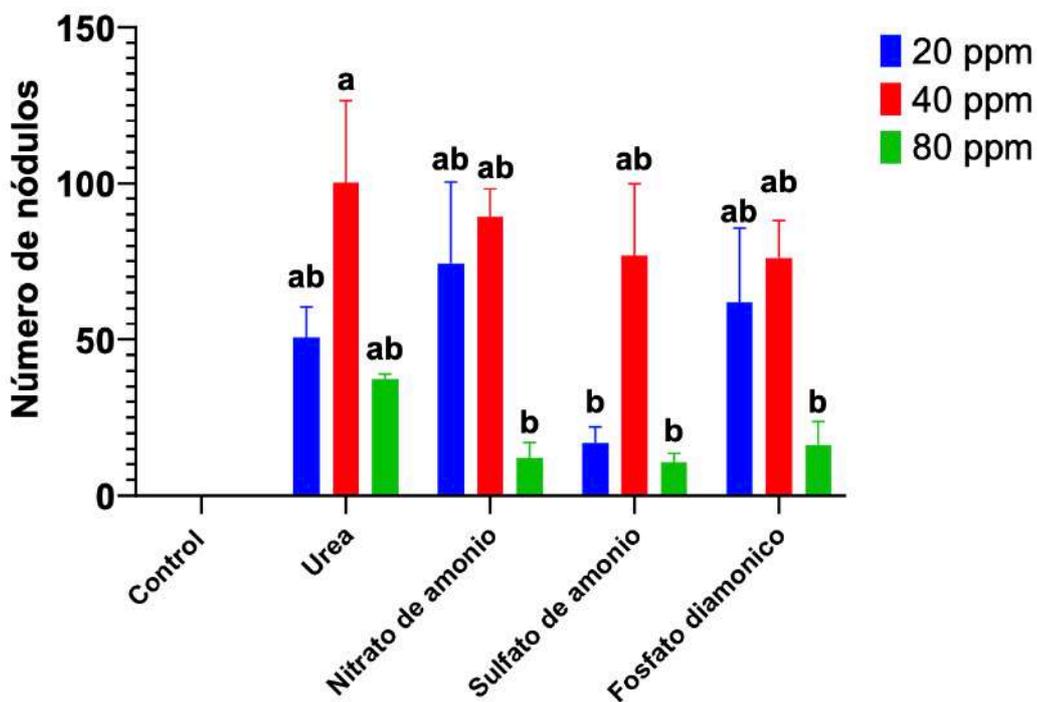


**Figura 25: Efecto de dosis crecientes de nitrógeno en el número de nódulos del frijol Canario Centenario**

Al realizar la prueba de medias según Tukey del número de nódulos de las raíces sobre el factor dosis de fertilización como se detalla en la **tabla 25** y en la **figura 25**, se encontró alta significación estadística. Donde la dosis de 40 ppm de N fue la que presentó mayor valor con 85 nódulos, superando estadísticamente a la dosis de 20 ppm de N que registró un valor de 51 nódulos y por último la dosis que presentó un menor valor fue la dosis de 80 ppm de N con un valor de 19 nódulos.

**Tabla 26: Prueba de comparación de medias de Tukey de la variable número de nódulos en la raíz del frijol Canario Centenario**

TRATAMIENTOS	NÚMEROS DE NÓDULOS
UREA:40	100 a
NAM:40	89 ab
SA:40	77 ab
FDA:40	76 ab
NAM:20	74 ab
FDA:20	62 ab
UREA:20	50 ab
UREA:80	37 ab
SA:20	17 b
FDA:80	16 b
NAM:80	12 b
SA:80	10 b



**Figura 26: Efecto de fuentes y dosis de nitrógeno en el número de nódulos del frijol Canario Centenario**

Según se evidencia en la **tabla 26** y la **figura 26**, el tratamiento que utilizó urea con una dosis de 40 ppm de N mostró el número más elevado de nódulos, registrando un valor de 100 nódulos. Se observaron diferencias estadísticas significativas en comparación con los

demás tratamientos. El proceso de formación de nódulos implica interacciones entre los rizobios (bacterias fijadoras de nitrógeno) y las plantas hospedantes, lo que resulta en el desarrollo de nódulos en las raíces (Dénarié et al., 1993). El género *Phaseolus* posee nódulos de tipo determinado, quiere decir que se origina en la corteza externa de los pelos radiculares, lo cual no mantiene un meristemo activo y tienen un ciclo de vida más limitado (Marschner, 2012). Suministrar bajas cantidades de fertilizantes minerales como la principal fuente de nitrógeno en el suelo incrementó la formación de nódulos en la soya y la cantidad total de nitrógeno obtenido mediante la fijación de  $N_2$ . Sin embargo, tasas elevadas de fertilizantes disminuyeron significativamente la nodulación e inhibieron la fijación de  $N_2$ . Por lo cual se deduce que la concentración de 80 ppm de N inhibió la formación de nódulos dando la menor cantidad de nódulos (Hungria et al., 2005).

En el caso de la dosis de los fertilizantes que fueron 20, 40 y 80 mg de N por kg de sustrato llevado a hectáreas sería 40, 80 y 160 kg ha<sup>-1</sup> de nitrógeno, en comparación con la investigación de Sousa (2022) en frijol común, en unos de sus tratamientos se asemeja a nuestro estudio, que es el momento de aplicación del fertilizante, en el cual nosotros aplicamos en el estadio fenológico V3-V4, y ellos en el estadio V4 con el tratamiento P<sub>0</sub>V<sub>4</sub><sub>90</sub>R<sub>50</sub> el cual dio un número de nódulos de 48 unidades. En relación a nuestra investigación estaría entre la dosis de 40 y 80 ppm de N de la urea, que dio un número de nódulos de 100 y 37 unidades respectivamente.

En la investigación de Moudiongui y Rinaudo (1987), demostró que el incremento de la dosis de nitrato de amonio inoculada con *Rhizobium* en la leguminosa *Sesbania rostrata*, dio efecto negativo en la nodulación de la planta, con una dosis de 1.5 mM (120 mg) dio 84.2 unidades, con una dosis de 3 mM (240 mg) dio 0 unidades y con una dosis de 6 mM (480 mg) dio 0 unidades de nódulos en las raíces de la planta respectivamente.

En el estudio de Jiang et al. (2020), en frijol común el número de nódulos conforme aumenta la dosis de nitrato en 0, 2.5, 5, 10, 20 mM, se obtuvieron 153, 248, 262, 143, 45 y 13 unidades respectivamente. El número total de nódulos disminuyó con el aumento de las concentraciones de nitrato de forma cuadrática.

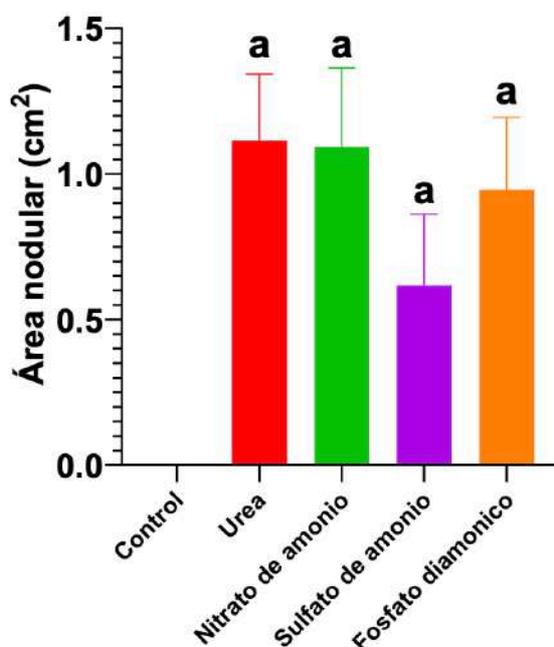
El valor promedio general del número de nódulos del frijol Canario Centenario que se obtuvo fue de 51.92 nódulos, comparado con otros autores, es mayor a los que obtuvo Cántaro (2015), Núñez (2011) y Villanueva (2009) que obtuvieron un promedio de 10.29, 12 y 16

nódulos respectivamente; y siendo menor a lo obtenido por Gonzales (2013) con 56.3 nódulos. Los datos obtenidos por los investigadores son en producción en campo y con otros factores de evaluación. La metodología que usó Núñez fue inocular dos cepas de *Rhizobium* con microorganismos eficaces, Villanueva fue incorporar dos cepas de *Rhizobium* con abono orgánico y Gonzales fue inocular varias cepas con tres variedades de frijol.

#### 4.2.2. Área nodular (cm<sup>2</sup>)

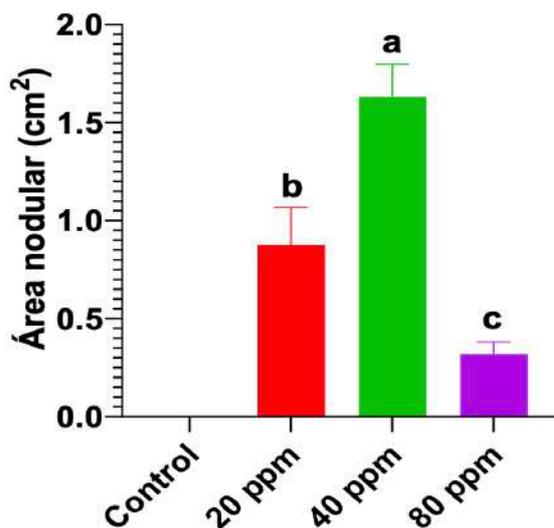
Los resultados promedio del tamaño de los nódulos de la raíz de los tratamientos evaluados se detallan en la **tabla 22**. Se observa que el tratamiento con nitrato de amonio y 40 ppm de N mostró la mayor área nodular, alcanzando 1.790 cm<sup>2</sup>, mientras que el tratamiento de sulfato de amonio y 80 ppm de N, exhibió el menor valor con 0.182 cm<sup>2</sup>.

El promedio general de área nodular fue de 0.942 cm<sup>2</sup>. Al realizar el análisis de varianza que se encuentra en la **tabla 23**, se identificó una alta significancia estadística para la variable de la dosis de fertilización, mientras que no se identificaron diferencias significativas para la fuente de nitrógeno ni para la relación entre la fuente y la dosis. El coeficiente de variación asociado fue del 54.878 %, mostrando una media aritmética no representativa, por ende, el conjunto de datos no es "Homogéneo".



**Figura 27: Efecto de diferentes fuentes de nitrógeno en el área nodular (cm<sup>2</sup>) del frijol Canario Centenario**

En la **figura 27**, se muestran los valores del área nodular en relación con las fuentes de nitrógeno, como se observa en la **tabla 23** de la prueba de ANVA, no se encuentran diferencias significativas entre sí. El área nodular promedio de la urea fue de  $1.114 \text{ cm}^2$ , del nitrato de amonio fue de  $1.092 \text{ cm}^2$ , del fosfato diamónico fue de  $0.945 \text{ cm}^2$  y del sulfato de amonio fue de  $0.617 \text{ cm}^2$ .

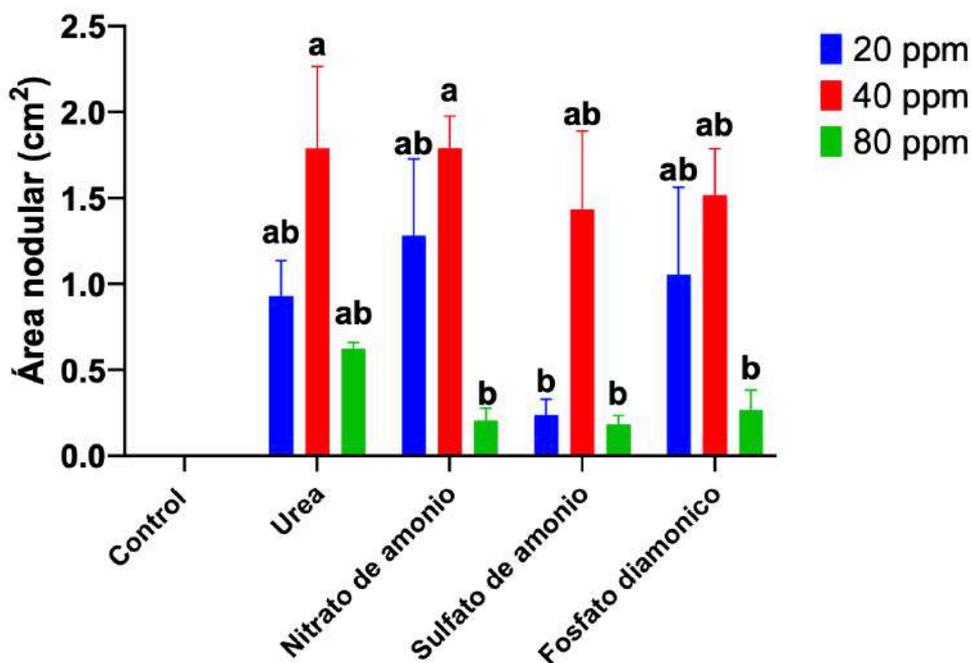


**Figura 28: Efecto de dosis crecientes de nitrógeno en el área nodular ( $\text{cm}^2$ ) del frijol Canario Centenario**

Al realizar la prueba de medias según Tukey del área nodular sobre el factor dosis de fertilización como se detalla en la **tabla 25** y en la **figura 28**, se encontró alta significación estadística. Donde la dosis de 40 ppm de N fue la que presentó mayor valor con  $1.632 \text{ cm}^2$ , superando estadísticamente a la dosis de 20 ppm de N que registró un valor de  $0.875 \text{ cm}^2$  y por último la dosis que registró un menor valor fue la dosis de 80 ppm de N con un valor de  $0.319 \text{ cm}^2$ .

**Tabla 27: Prueba de comparación de medias de Tukey de la variable área nodular (cm<sup>2</sup>) en la raíz del frijol Canario Centenario**

TRATAMIENTOS	ÁREA NODULAR (cm <sup>2</sup> )
NAM:40	1.790 a
UREA:40	1.789 a
FDA:40	1.516 ab
SA:40	1.433 ab
NAM:20	1.280 ab
FDA:20	1.055 ab
UREA:20	0.929 ab
UREA:80	0.623 ab
FDA:80	0.265 b
SA:20	0.237 b
NAM:80	0.205 b
SA:80	0.182 b



**Figura 29: Efecto de fuentes y dosis de nitrógeno en el área nodular (cm<sup>2</sup>) del frijol Canario Centenario**

Como se observa en la **tabla 27** y la **figura 29**, las mayores áreas nodulares se registraron en los tratamientos de nitrato de amonio y urea con las dosis de 40 ppm de N con valores de 1.790 cm<sup>2</sup> y 1.789 cm<sup>2</sup> respectivamente, no llegándose a encontrar diferencias estadísticas entre sí. Cuando se incrementa la dosis de la fertilización nitrogenada, la actividad nitrogenasa y el número de nódulos decrece (Scherer y Danzeisen, 1980), además la

formación de los nódulos es más sensible al nitrato que al amonio (Marschner, 2012). El fertilizante nitrato de amonio en su composición nitrogenada contiene la mitad de nitrato y la otra mitad de amonio; en contraparte la urea al reaccionar con el agua se convierte en carbamato de amonio, que posteriormente se convertirá en amonio o amoniaco por lo cual se llega a deducir que a la dosis 40 ppm de nitrógeno promueve la formación de una mayor área nodular. En el estudio de Jiang et al. (2020), las plantas de estos genotipos que se desarrollaron en soluciones relativamente bajas en nitrato (2,5 y 5 mM) produjeron nódulos de raíz más grandes y rosados en comparación con aquellas en concentraciones libres de nitrato o altas en nitrato (mayor o igual a 10 mM).

Los tratamientos con fosfato diamónico y sulfato de amonio, ambos con una dosis de 40 mg, exhibieron valores de 1.516 cm<sup>2</sup> y 1.433 cm<sup>2</sup> respectivamente, sin que se identificaran diferencias significativas entre ellos. A pesar de que el fósforo desempeña un papel crucial en la fijación de N<sub>2</sub>, la concentración mínima requerida para la nodulación es de 0.5 μ por litro de solución, este requisito surge de la demanda sustancial de ATP generado mediante la reacción de la nitrogenasa (Cassmann et al., 1980), y el azufre también es importante en la fijación del nitrógeno ya que ayuda en la actividad nitrogenasa como parte de las proteínas de hierro presentes en la leghemoglobina (Jeong y Jang, 2006). Otras condiciones del suelo que impactan el desarrollo de los rizobios son la acidez, alcalinidad, salinidad, temperatura, humedad, fertilidad (que incluye deficiencias de nutrientes) y la estructura física. Estos factores también influyen en los procesos de infección y nodulación (Slattery et al., 2001). En este caso los fertilizantes de sulfato de amonio y fosfato diamónico tienen un índice de acidez alto (Tisdale et al., 1985), por lo cual inhibe la formación de los nódulos en cuanto incrementa la dosis.

El valor promedio general del área nodular del frijol Canario Centenario con fertilización nitrogenada que se obtuvo fue de 0.94 cm<sup>2</sup>, es mayor comparado con lo que obtuvo Cántaro (2015), con un valor promedio de 0.29 cm<sup>2</sup>. El dato obtenido por el investigador fue a base de una producción en campo y con otros factores de evaluación.

#### **4.2.3. Forma de nódulos**

Los nódulos presentes en el sistema radicular de los distintos tratamientos fueron de forma redonda, como se detalla en la **tabla 22**, y no se identificaron diferencias estadísticas entre ellos. Según Cubero y Moreno (1996) la forma de los nódulos en frijoles es de tipo redonda.

Comparado con otros autores en sus investigaciones en el frijol canario con pruebas de fertilización nitrogenada, Vilchez (2015) trabajo con la variedad molinero PLV 1-3, obtuvo la forma redonda y Cántaro (2015) trabajo con la variedad centenario, obtuvo la forma redonda- elíptica. Los datos obtenidos por los investigadores son en producción en campo y con otros factores de evaluación. La metodología que usó Vilchez fue incorporar urea con contenido de N de 80 kg ha<sup>-1</sup>, en suelos de la molina con incidencia de bacterias de *Rhizobium*, a una separación de 0.4 m entre plantas.

#### **4.2.4. Posición de los nódulos**

La ubicación de los nódulos, según se detalla en la **tabla 28**, indica que en los tratamientos con urea (20 y 40 ppm), nitrato de amonio (20 y 40 ppm), sulfato de amonio (20 y 40 ppm), fosfato diamónico (40 y 80 ppm), los nódulos se distribuyen a lo largo de toda la raíz. En cambio, los tratamientos urea con dosis de 80 ppm, nitrato de amonio con dosis de 80 ppm, sulfato de amonio con dosis de 80 ppm y fosfato diamónico con dosis de 20 ppm, muestran que la posición de los nódulos se encuentra en la parte media a inferior de la raíz. Según Racca (1986), los nódulos ubicados en las raíces laterales tienen menor actividad nitrogenasa con respecto a los nódulos ubicados sobre la raíz principal. Comparado con otros autores en sus investigaciones en el frijol canario con pruebas de fertilización nitrogenada, Vilchez (2015) obtuvo que la posición de los nódulos se encontró a nivel de toda la raíz con predominancia en la parte superior y Cántaro (2015) obtuvo que la posición de los nódulos se encontró a nivel de toda la raíz con predominancia en la parte media e inferior. Los datos obtenidos por los investigadores son en producción en campo y con otros factores de evaluación.

**Tabla 28: Posición de los nódulos en la raíz del frijol Canario Centenario**

TRATAMIENTOS	POSICIÓN DE LOS NÓDULOS
UREA:20	todas
UREA:40	todas
UREA:80	Medio-Inferior
NAM:20	todas
NAM:40	todas
NAM:80	Medio-Inferior
SA:20	todas
SA:40	todas
SA:80	Medio-Inferior
FDA:20	Medio-Inferior
FDA:40	todas
FDA:80	todas

#### 4.2.5. Color interno del nódulo

En el proceso de examinar la coloración de los nódulos, se procedió a cortarlos por la mitad, permitiendo la visualización de tonalidades como rojo, marrón, verde y crema, que indican el grado de eficacia del nódulo. Según la escala del CIAT (1988b), la coloración que va desde rojo hasta marrón es distintiva de nódulos eficientes, con alta capacidad para fijar nitrógeno. Esta tonalidad se atribuye a la presencia de leghemoglobina, una ferro-hemoproteína formada en la simbiosis de la raíz con la bacteria y que se encuentra en el citoplasma de la célula infectada. En contraste, la coloración verdosa a crema es característica de nódulos no efectivos en la fijación de nitrógeno.

**Tabla 29: Coloración y nódulos efectivos observados en planta de frijol Canario Centenario**

TRATAMIENTOS	COLOR DE NÓDULOS	NÓDULOS EFECTIVOS	% EFICIENCIA
UREA:20	6R, 7M y 2V	13	87 %
UREA:40	4R, 5M, 4V y 2C	9	60 %
UREA:80	2M, 9V y 4C	2	13 %
NAM:20	5R y 6M, 2V y 2C	11	73 %
NAM:40	5R, 4M y 6V	9	60 %
NAM:80	1M, 12V y 2C	1	7 %
SA:20	1R, 7M, 4V y 3C	8	53 %
SA:40	6M y 9V	6	40 %
SA:80	8V y 7C	0	0 %
FDA:20	2R, 7M y 6V	9	60 %
FDA:40	2R, 4M y 9V	6	40 %
FDA:80	9V y 6C	0	0 %

R=rojo, M=marrón, V=verde y C=crema

Como se observa en la **tabla 29**, la mayor eficiencia nodular se registró en el tratamiento de urea con la dosis de 20 ppm de N con un valor de 87 %. Los tratamientos sulfato de amonio y fosfato diamónico con dosis de dosis de 80 ppm de N registraron los valores más bajos de eficiencia que fue de 0 %.

En la investigación de Moudiongui y Rinaudo (1987), demostró que el incremento de la dosis de nitrato de amonio inoculada con *Rhizobium* en la leguminosa arbustiva *Sesbania rostrata*, dio efecto negativo en la efectividad nodular. La efectividad de los nódulos radiculares disminuyó en un 81 % en la dosis de 1,5 mM (120 mg) y se inhibió completamente en la dosis 3,0 mM (240 mg) a más dosis de aplicación de nitrógeno. Según Fernández-Pascual (2002), El nitrato inhibe la nodulación y la fijación de nitrógeno, aunque no está totalmente demostrado, parece que la inhibición de la nodulación se debe a que el nitrato se une a algún receptor específico del *Rhizobium* sobre la raíz de la leguminosa impidiendo la nodulación. La aplicación de nitrato de amonio 20 mM (1.6 g) produce una reducción de la actividad nitrogenasa y de la respiración del sistema radicular, acompañada de una elevada resistencia a la difusión de oxígeno. Además, la aplicación de nitrato induce cambios en la morfología de la corteza nodular. La alteración más notable es el bloqueo de

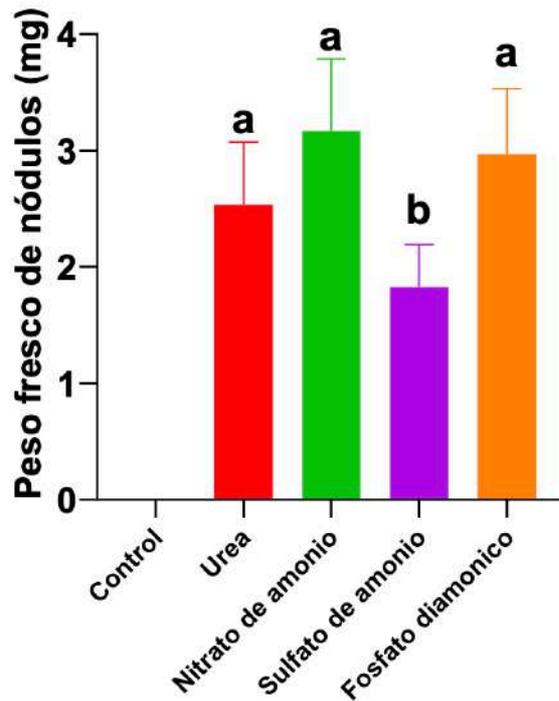
los espacios de la corteza media por una sustancia glicosídica, identificada posteriormente como una glicoproteína (De Lorenzo et al., 1993). En nuestra investigación en el cultivo de frijol Canario Centenario, en la dosis de 80 ppm de N, el nitrato de amonio mostró una pequeña tolerancia al *Rhizobium*, a comparación del fertilizante fosfato diamónico y sulfato de amonio los cuales fueron inhibidos completamente en la efectividad nodular.

En el estudio de Jiang et al. (2020), en frijol común el número de nódulos rojos y blancos conforme aumenta la dosis de nitrato fueron los siguientes: La coloración roja con la dosis 0, 2.5, 5, 10, 20 mM obtuvieron 3, 124, 148, 36, 1 y 0 unidades respectivamente. La coloración blanca con la dosis 0, 2.5, 5, 10, 20 mM obtuvieron 92, 110, 141, 97, 47 y 13 unidades respectivamente. Se deduce que conforme aumenta la dosis los nódulos efectivos decrecen y en las dosis de 15 y 20 mM ya no es efectiva la fijación de nitrógeno.

Comparado con otro autor en su investigación en el frijol canario con pruebas de fertilización nitrogenada Cántaro (2015), obtuvo que la eficiencia de los nódulos fue de 20 %. Los datos obtenidos por los investigadores son en producción en campo y con otros factores de evaluación.

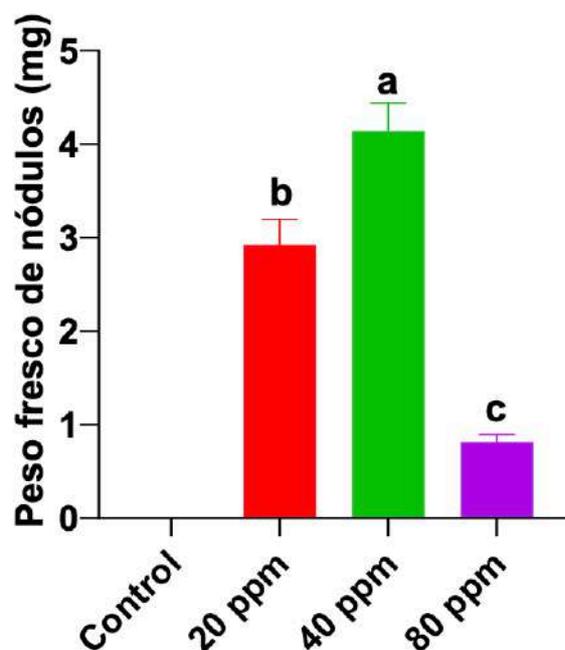
#### **4.2.6. Peso fresco de nódulos (mg)**

Los resultados promedio del peso fresco de los nódulos de los tratamientos evaluados se detallan en la **tabla 22**. Se observa que el tratamiento con fosfato diamónico y 40 ppm de N mostró el mayor número de nódulos, alcanzando 4.78 mg, mientras que el tratamiento de sulfato de amonio y 80 ppm de N, exhibió el menor valor con 0.46 mg. El promedio general del peso fue de 2.63 mg. Al realizar el análisis de varianza como se observa en la **tabla 23**, se identificó una alta significancia estadística para la fuente de nitrógeno, la dosis de fertilización y la relación entre la fuente y la dosis. El coeficiente de variación fue del 18.672 %.



**Figura 30: Efecto de diferentes fuentes de nitrógeno en el peso fresco de nódulos (mg) del frijol Canario Centenario**

Al realizar la prueba de medias según Tukey del peso fresco de nódulos sobre el factor fuente de nitrógeno como se detalla en la **tabla 24** y en la **figura 30**. La fuente de nitrato de amonio, fosfato diamónico y urea fueron las que presentaron los mayores valores con 3.17, 2.97 y 2.53 g respectivamente, las tres fuentes no muestran diferencias estadísticas entre sí, superando estadísticamente a la fuente de sulfato de amonio que registró un valor de 1.83 mg.

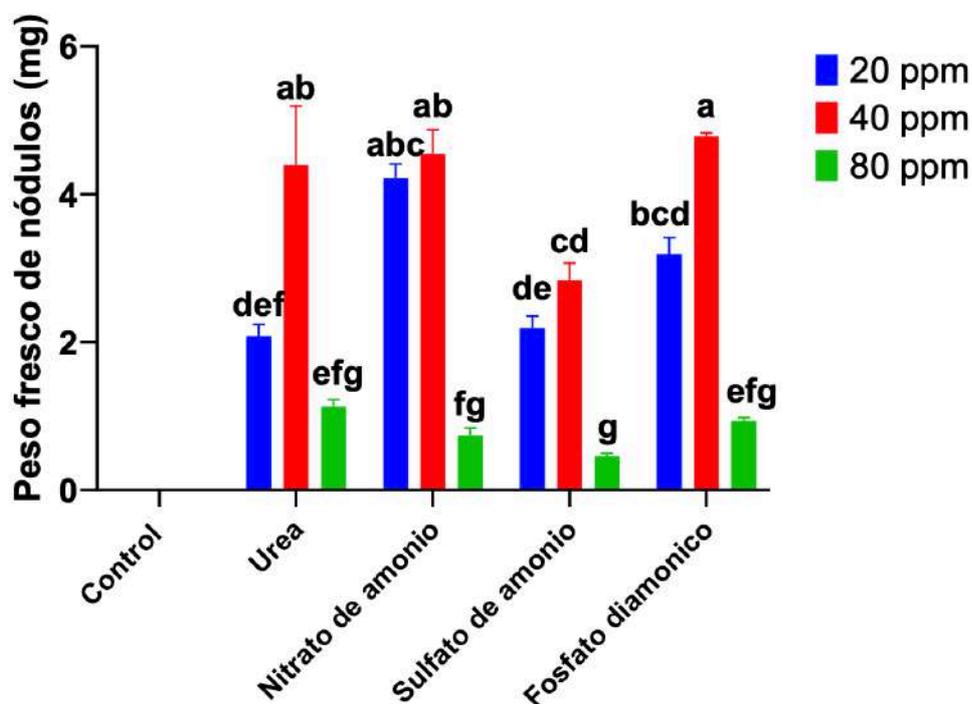


**Figura 31: Efecto de dosis crecientes de nitrógeno en el peso fresco de nódulos (mg) del frijol Canario Centenario**

Al realizar la prueba de medias según Tukey del peso fresco de nódulos sobre el factor dosis de fertilización como se detalla en la **tabla 25** y en la **figura 31**, se encontró alta significación estadística. Donde la dosis de 40 ppm de N fue la que presentó mayor valor con 4.14 mg, superando estadísticamente a la dosis de 20 ppm de N que registró un valor de 2.92 mg y por último la dosis que registró un menor valor fue la dosis de 80 ppm de N que registró un valor de 0.81 mg.

**Tabla 30: Prueba de comparación de medias de Tukey de la variable peso fresco de nódulos (mg) del frijol Canario Centenario**

TRATAMIENTOS	PESO FRESCO DE NÓDULOS (mg)
FDA:40	4.78 <b>a</b>
NAM:40	4.54 <b>ab</b>
UREA:40	4.39 <b>ab</b>
NAM:20	4.22 <b>abc</b>
FDA:20	3.19 <b>bcd</b>
SA:40	2.83 <b>cd</b>
SA:20	2.19 <b>de</b>
UREA:20	2.08 <b>def</b>
UREA:80	1.13 <b>efg</b>
FDA:80	0.94 <b>efg</b>
NAM:80	0.73 <b>fg</b>
SA:80	0.46 <b>g</b>



**Figura 32: Efecto de fuentes y dosis de nitrógeno en el peso fresco de nódulos (mg) del frijol Canario Centenario**

Como se observa en la **tabla 30** y la **figura 32**, el mayor peso fresco de nódulos se registró en el tratamiento fosfato diamónico con la dosis de 40 ppm de N con un valor de 4.78 mg, llegándose a encontrar diferencias estadísticas con los demás tratamientos. Los menores pesos fresco se encontraron en la dosis de 80 ppm de N, los tratamientos de urea y fosfato diamónico con valores de 1.13 y 0.94 mg respectivamente, no mostraron diferencias estadísticas entre sí, y los tratamientos de nitrato de amonio y sulfato de amonio con valores de 0.73 y 0.46 mg respectivamente, sí mostraron diferencias estadísticas entre sí.

La nodulación y la fijación de  $N_2$  demandan un suministro adecuado de fósforo. Cuando la concentración de fósforo en la planta desciende por debajo del 0,2 %, tanto la nodulación como la fijación de  $N_2$  se vuelven prácticamente insignificantes. Si la concentración cae por debajo del 0,1 %, ni siquiera se forman nódulos. En condiciones óptimas de crecimiento, con factores favorables como temperatura y humedad, la leguminosa inicia la señalización a las bacterias y participa activamente en la formación de nódulos. Sin embargo, factores ambientales, como el exceso de nitrógeno o diversos tipos de estrés, pueden incidir directamente en este proceso (Fernández-Canigia, 2020).

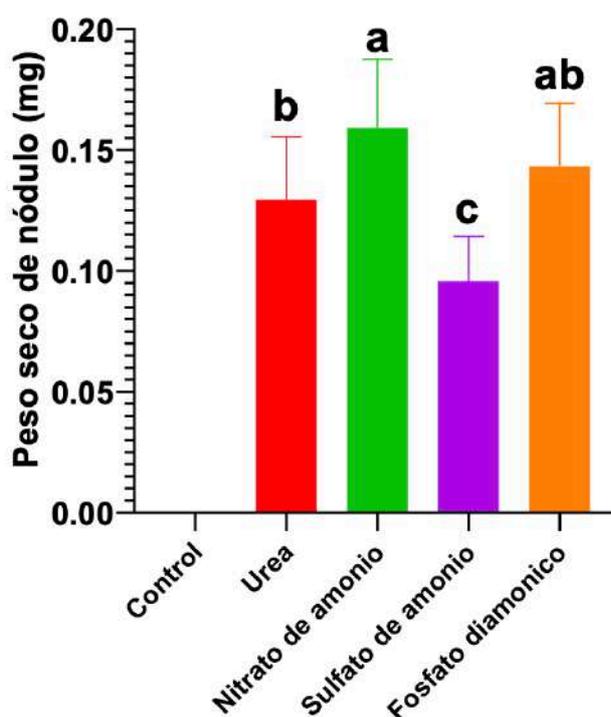
En la investigación de Hamdi (1978), en los fertilizantes de urea y sulfato de amonio inoculados con *Rhizobium* en el frijol caupí, los pesos frescos de los nódulos tienen un margen decreciente en conforme aumenta la dosis del nitrógeno del fertilizante (0, 5, 10, 20 y 40 kg de N/feddan), en unidades utilizadas en Perú sería (0, 12, 24, 48 y 96 kg de N/ha). En nuestra investigación las dosis aplicadas fueron de 20, 40 y 80 ppm de N, llevadas a hectáreas sería 40, 80 y 160 kg ha<sup>-1</sup> de nitrógeno. En la dosis de 0, 12, 24, 48 y 96 kg de N/ha de urea se obtuvieron 0.8, 0.6, 0.78, 0.82 y 0.45 g/planta respectivamente y en la dosis de 0, 12, 24, 48 y 96 kg de N/ha de sulfato de amonio se obtuvieron 0.8, 0.53, 0.58, 0.62 y 0.39 g/planta respectivamente. En el frijol caupí al aumentar la dosis de 48 a 96 kg de N/ha trajo una disminución en el peso fresco de los nódulos, en cambio en el frijol Canario Centenario al aumentar la dosis de 40 a 80 kg de N/ha trajo un aumento en el peso fresco de los nódulos. En ambas investigaciones el valor más alto de los fertilizantes fue la urea en relación al sulfato de amonio, y con tendencia a decrecer el peso fresco de los nódulos conforme aumenta la dosis del fertilizante.

El valor promedio general del peso fresco de nódulos del frijol Canario Centenario con fertilización nitrogenada que se obtuvo fue de 2.62 mg, es mayor comparado con lo que

obtuvo Cántaro (2015), con un valor promedio de 1.30 mg. El dato obtenido por el investigador fue a base de una producción en campo y con otros factores de evaluación.

#### 4.2.7. Peso seco de nódulos (mg)

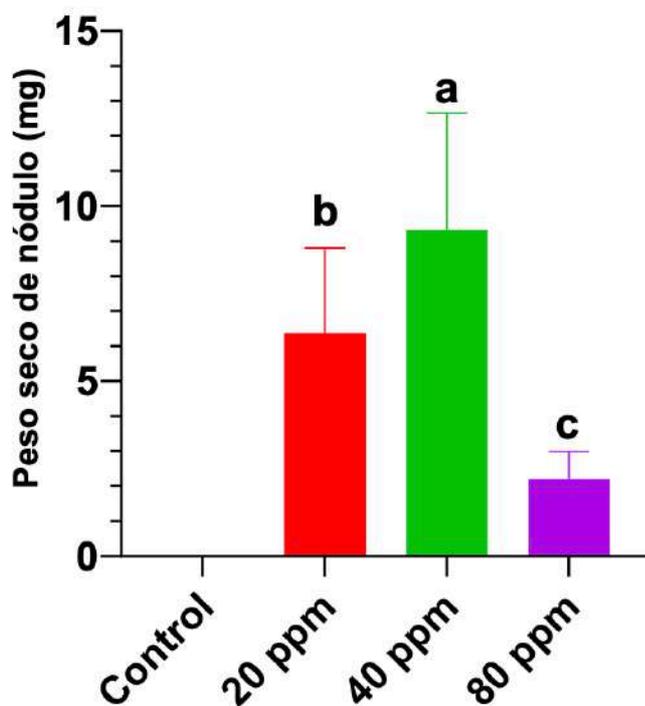
Los resultados promedio del peso seco de los nódulos de los tratamientos evaluados se detallan en la **tabla 22**. Se observa que el tratamiento con fosfato diamónico y 40 ppm de N mostró el mayor número de nódulos, alcanzando 0.23 mg, mientras que el tratamiento de sulfato de amonio y 80 ppm de N, exhibió el menor valor con 0.03 mg. El promedio general del peso fue de 0.13 mg. Al realizar el análisis de varianza como se observa en la **tabla 23**, se identificó una alta significancia estadística para la fuente de nitrógeno, la dosis de fertilización y la relación entre la fuente y la dosis. El coeficiente de variación fue del 14.860 %.



**Figura 33: Efecto de diferentes fuentes de nitrógeno en el peso seco de nódulos (mg) del frijol Canario Centenario**

Al realizar la prueba de medias según Tukey del peso seco de nódulos sobre el factor fuente de nitrógeno como se detalla en la **tabla 24** y en la **figura 33**. Se halló diferencias estadísticas entre la fuente de nitrato de amonio que presentó el mayor valor con 0.16 mg, superando estadísticamente a la fuente de fosfato diamónico que registró un valor de 0.14 mg, a la

fuentes de urea que registró un valor de 0.13 mg, y por último a la fuente sulfato de amonio que registró un valor de 0.10 mg.

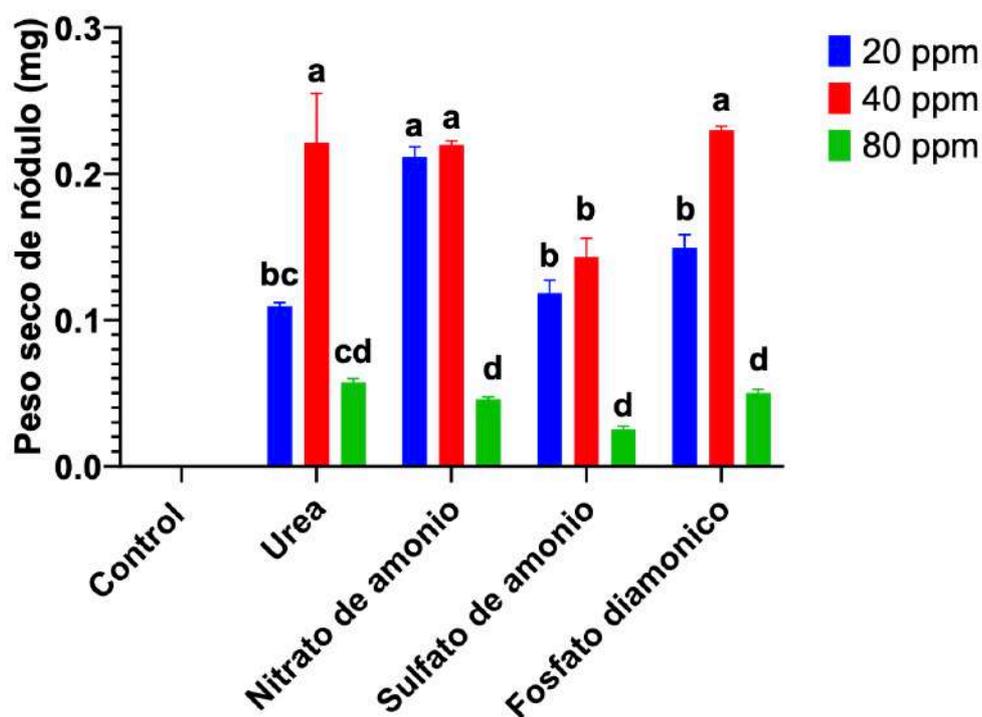


**Figura 34: Efecto de dosis crecientes de nitrógeno en el peso seco de nódulos (mg) del frijol Canario Centenario**

Al realizar la prueba de medias según Tukey del peso seco de nódulos sobre el factor dosis de fertilización como se detalla en la **tabla 25** y en la **figura 34**, se encontró alta significación estadística. Donde la dosis de 40 ppm de N fue la que presentó mayor valor con 0.20 mg, superando estadísticamente a la dosis de 20 ppm de N que registró un valor de 0.15 mg y por último la dosis que registró un menor valor fue la dosis de 80 ppm de N con un valor de 0.04 mg.

**Tabla 31: Prueba de comparación de medias de Tukey de la variable peso seco de nódulo (mg) del frijol Canario Centenario**

TRATAMIENTOS	PESO SECO DE NÓDULO (mg)
FDA:40	0.23 a
UREA:40	0.22 a
NAM:40	0.22 a
NAM:20	0.21 a
FDA:20	0.15 b
SA:40	0.14 b
SA:20	0.12 b
UREA:20	0.11 bc
UREA:80	0.06 cd
FDA:80	0.05 d
NAM:80	0.05 d
SA:80	0.03 d



**Figura 35: Efecto de fuentes y dosis de nitrógeno en el peso seco de nódulo (mg) del frijol Canario Centenario**

Como se observa en la **tabla 31** y la **figura 35**, los mayores pesos secos de nódulos se registraron en los tratamientos fosfato diamónico, urea, nitrato de amonio con dosis de 40 ppm de N y nitrato de amonio con dosis de 20 ppm de N con valores de 0.23, 0.22, 0.22 y 0.21 mg, no llegándose a encontrar diferencias estadísticas entre sí. Y el tratamiento que registró un menor valor fue sulfato de amonio con una dosis de 80 ppm de N.

En el estudio de Jiang et al. (2020), en frijol común en el peso seco de los nódulos por planta conforme aumenta la dosis de nitrato en 0, 2.5, 5, 10, 20 mM, se obtuvieron 42.1, 90, 106.3, 29.4, 0 y 0 mg respectivamente. El peso seco de los nódulos se asoció negativamente con las concentraciones de nitrato de forma cuadrática.

El valor promedio general del peso seco de nódulos del frijol Canario Centenario con fertilización nitrogenada que se obtuvo fue de 0.13 mg, es menor comparado con lo que obtuvo Cántaro (2015), con un valor promedio de 0.20 mg. El dato obtenido por el investigador fue a base de una producción en campo y con otros factores de evaluación.

#### **4.3. EVALUACIONES DEL RENDIMIENTO**

A continuación, se presentan en las tablas los valores promedio de los tratamientos para las principales variables de rendimiento obtenidos en el estudio. Luego, se realiza un análisis de varianza de las variables para identificar las diferencias significativas para cada uno de los factores, seguido de una prueba de evaluación de medias de los factores para cada variable de rendimiento.

**Tabla 32: Resultados promedios de las variables del rendimiento evaluados en los tratamientos**

Factor fuente	Factor dosis	Número de vainas por planta	Número de granos por vaina	Longitud de vainas (cm)	Ancho de vainas (cm)	Peso fresco planta (g)	Peso fresco vainas (g)	Peso seco planta (g)	Peso seco vainas (g)	Índice de cosecha (%)	peso de 100 semillas (g)	Rendimiento (g planta <sup>-1</sup> )
Urea	20	20.67	3.44	11.6	1.1	45.67	84.67	15.38	20.14	52.03	55.33	39.38
Urea	40	22.67	3.39	11.8	1.1	49.33	85.67	16.23	22.48	52.00	54.57	41.89
Urea	80	23.00	3.45	11.3	1.1	50.00	84.00	14.41	24.22	52.34	54.21	42.99
Nitrato de amonio	20	21.33	3.46	11.7	1.1	50.67	81.33	15.14	19.28	53.63	54.27	40.05
Nitrato de amonio	40	24.33	3.49	11.8	1	56.00	85.33	16.31	23.35	53.98	54.65	46.45
Nitrato de amonio	80	24.00	3.44	11.4	1.1	54.33	83.00	15.87	22.53	53.51	53.25	44.02
Sulfato de amonio	20	18.67	3.29	10.8	1.1	38.33	73.33	14.14	18.20	48.98	50.45	31.03
Sulfato de amonio	40	18.00	3.31	11	1	41.00	74.00	14.93	17.79	49.93	54.69	32.63
Sulfato de amonio	80	15.67	3.34	11.1	1	36.33	59.33	14.53	16.57	46.13	50.88	26.64
Fosfato diamónico	20	21.33	3.34	11.5	1.1	52.33	84.67	15.12	20.47	50.05	50.09	35.73
Fosfato diamónico	40	22.00	3.51	11.3	1.1	53.00	82.67	15.42	20.73	53.46	53.85	41.57
Fosfato diamónico	80	21.67	3.49	11.2	1.1	59.00	81.33	16.09	20.87	51.97	53.36	40.31
Control	Control	8.33	3.52	10.3	1.1	38.33	34.00	6.91	8.48	49.06	50.84	14.92
<b>Promedio</b>		<b>20.12</b>	<b>3.42</b>	<b>11.3</b>	<b>1.1</b>	<b>48.02</b>	<b>76.41</b>	<b>14.65</b>	<b>19.62</b>	<b>51.31</b>	<b>53.11</b>	<b>36.74</b>

**Tabla 33: Cuadro de análisis de varianza de de las variables de rendimiento evaluadas en la investigación**

Fuente de variación	G.L.	Número de vainas por planta	Número de granos por vaina	Longitud de vainas (cm)	Ancho de vainas (cm)	Peso fresco planta (g)	Peso fresco vainas (g)	Peso seco planta (g)	Peso seco vainas (g)	Índice de cosecha (%)	peso de 100 semillas (g)	Rendimiento (g planta <sup>-1</sup> )
Fuente	4	156.26 <sup>***</sup>	0.037	1.411 <sup>***</sup>	0.008 <sup>**</sup>	446.6 <sup>***</sup>	1832.6 <sup>***</sup>	50.65 <sup>***</sup>	131.36 <sup>***</sup>	38.58 <sup>***</sup>	12.684	40454 <sup>***</sup>
Dosis	2	4.69	0.007	0.199 <sup>*</sup>	0.002	39.1	85.0	1.86	9.57	6.47	15.059	3261
Fuente: dosis	6	5.32	0.007	0.103	0.001	18.8	47.8	0.96	6.42	4.77	4.721	68454
Error residual	26	4.38	0.020	0.055	0.001	12.1	41.2	1.11	6.30	4.31	10.626	1053
Total	38											
<b>C.V. (%)</b>		<b>10.403</b>	<b>4.172</b>	<b>2.093</b>	<b>4.149</b>	<b>7.228</b>	<b>8.403</b>	<b>7.180</b>	<b>12.792</b>	<b>4.047</b>	<b>6.138</b>	<b>13.858</b>
<b>Promedio</b>		<b>20.12</b>	<b>3.42</b>	<b>11.3</b>	<b>1.1</b>	<b>48.02</b>	<b>76.41</b>	<b>14.65</b>	<b>19.62</b>	<b>51.31</b>	<b>53.11</b>	<b>36.74</b>

C.V. (%) Coeficiente de variación

Significación estadística: <sup>\*</sup> (0.01<p<0.05), <sup>\*\*</sup> (0.001<p<0.01), <sup>\*\*\*</sup> (p<0.001).

**Tabla 34: Prueba de comparación de medias de Tukey de las variables de rendimiento en función del factor fuente de nitrógeno**

Fuente	Número de vainas por planta	Número de granos por vaina	Longitud de vainas (cm)	Ancho de vainas (cm)	Peso fresco planta (g)	Peso fresco vainas (g)	Peso seco planta (g)	Peso seco vainas (g)	Índice de cosecha (%)	peso de 100 semillas (g)	Rendimiento (g planta <sup>-1</sup> )
Nitrato de amonio	23.22 a	3.47 a	11.6 a	1.1 ab	53.67 a	83.22 a	15.77 a	21.72 a	53.71 a	54.14 a	43.51 a
Urea	22.11 a	3.43 a	11.5 a	1.1 ab	48.33 b	84.78 a	15.34 a	22.28 a	52.13 ab	54.45 a	41.42 a
Fosfato diamónico	21.67 a	3.45 a	11.3 a	1.1 a	54.78 a	82.89 a	15.54 a	20.69 ab	51.83 ab	52.36 a	39.20 a
Sulfato de amonio	17.44 b	3.32 a	11 b	1.0 b	38.56 c	68.89 b	14.54 a	17.52 b	48.34 c	52.11 a	30.10 b
Control	8.33 c	3.52 a	10.3 c	1.1 a	38.33 c	34.00 c	6.91 b	8.48 c	49.06 bc	51.19 a	14.92 c

Significación estadística:  $p < 0,05$  (Los valores dentro de una columna seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes ( $P > 0.05$ ), según la prueba de comparación de medias HSD de Tukey).

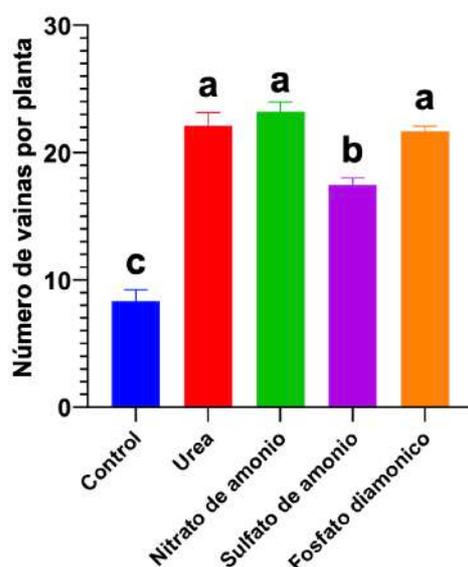
**Tabla 35: Prueba de comparación de medias de Tukey de las variables de rendimiento en función del factor fuente de nitrógeno**

<b>Dosis</b>	<b>Número de vainas por planta</b>	<b>Número de granos por vaina</b>	<b>Longitud de vainas (cm)</b>	<b>Ancho de vainas (cm)</b>	<b>Peso fresco planta (g)</b>	<b>Peso fresco vainas (g)</b>	<b>Peso seco planta (g)</b>	<b>Peso seco vainas (g)</b>	<b>Índice de cosecha (%)</b>	<b>peso de 100 semillas (g)</b>	<b>Rendimiento (g planta<sup>-1</sup>)</b>
40	21.75 a	3.52 a	11.5 a	1.1 a	49.83 a	81.92 a	15.72 a	21.09 a	52.34 a	54.53 a	40.63 a
80	21.08 a	3.43 a	11.2 a	1.1 a	49.92 a	76.92 a	15.22 a	21.05 a	50.99 a	52.89 a	38.49 a
20	20.50 a	3.43 a	11.4 a	1.1 a	46.75 a	81.00 a	14.95 a	19.52 a	51.17 a	52.38 a	36.55 a
Control	8.33 b	3.39 a	10.3 b	1.1 a	38.33 b	34.00 b	6.91 b	8.48 b	49.06 a	51.19 a	14.92 b

Significación estadística:  $p < 0,05$  (Los valores dentro de una columna seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes ( $P > 0.05$ ), según la prueba de comparación de medias HSD de Tukey).

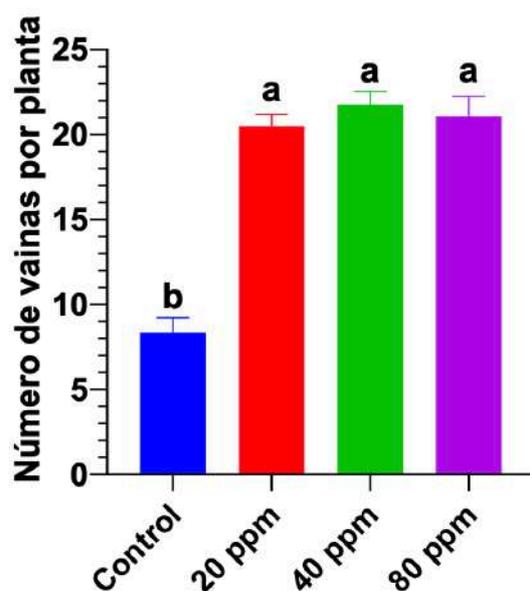
### 4.3.1. Número de vainas por planta

Los resultados promedio del número de vainas por planta de los tratamientos evaluados se detallan en la **tabla 32**. Se observa que el tratamiento con nitrato de amonio y 40 ppm de N mostró el mayor número de vainas, alcanzando 24.33 vainas, mientras que el tratamiento control, exhibió el menor valor con 8.33 vainas. El promedio general del número de vainas fue de 20.12 vainas. Al realizar el análisis de varianza como se observa en la **tabla 33**, se identificó una alta significancia estadística para la fuente de nitrógeno, mientras que no se identificaron diferencias significativas para la dosis de fertilización ni para la relación entre la fuente y la dosis. El coeficiente de variación asociado a estos resultados fue del 10.403 %.



**Figura 36: Efecto de diferentes fuentes de nitrógeno en el número de vainas por planta del frijol Canario Centenario**

Al realizar la prueba de medias según Tukey del número de vainas por planta sobre el factor fuente de nitrógeno, como se detalla en la **tabla 34** y en la **figura 36**. La fuente de nitrato de amonio, urea y fosfato diamónico fueron las que presentaron los mayores valores con 23.22, 22.11 y 21.67 vainas respectivamente, las tres fuentes no muestran diferencias estadísticas entre sí, superando estadísticamente a la fuente de sulfato de amonio registró un valor de 17.44 vainas.

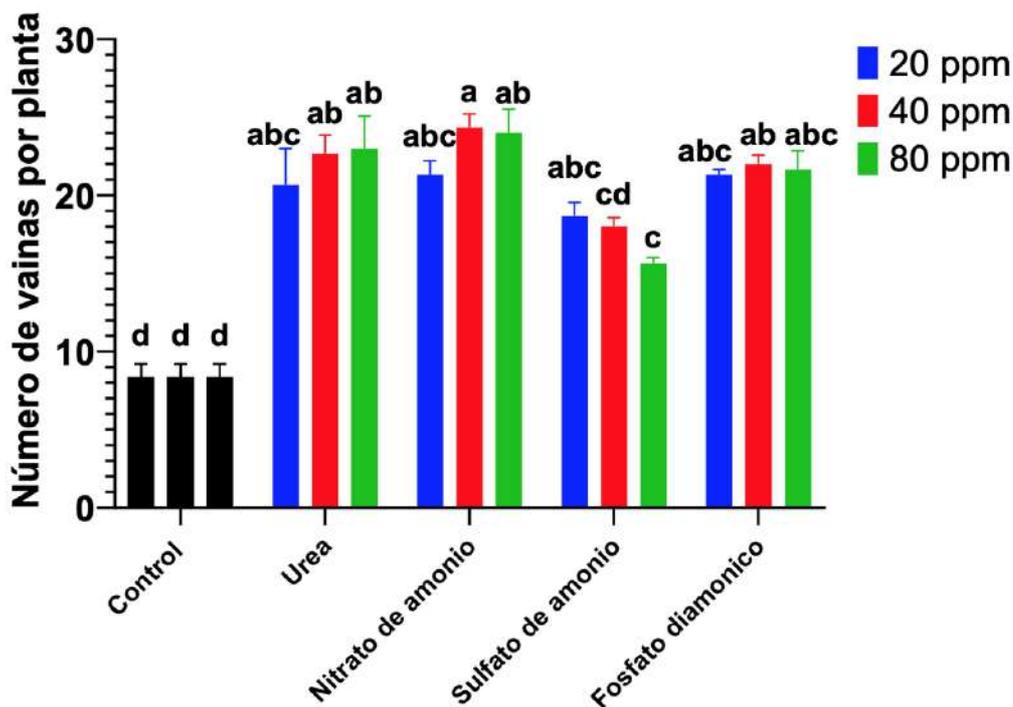


**Figura 37: Efecto de dosis crecientes de nitrógeno en el número de vainas por planta del frijol Canario Centenario**

En la **figura 37**, se muestran los valores del número de vainas por planta en relación con las dosis de fertilización, como se observa en la **tabla 33** de la prueba de ANVA, no se encuentran diferencias significativas entre sí. Las dosis de 40, 80 y 20 ppm de N obtuvieron valores de 21.75, 21.08 y 20.50 vainas respectivamente.

**Tabla 36: Prueba de comparación de medias de Tukey de la variable número de vainas por planta del frijol Canario Centenario**

TRATAMIENTOS	NÚMERO DE VAINAS POR PLANTA
NAM:40	24.33 a
NAM:80	24.00 ab
UREA:80	23.00 ab
UREA:40	22.67 ab
FDA:40	22.00 ab
FDA:80	21.67 abc
FDA:20	21.33 abc
NAM:20	21.33 abc
UREA:20	20.67 abc
SA:20	18.67 abc
SA:40	18.00 cd
SA:80	15.66 c
CONTROL	8.33 d



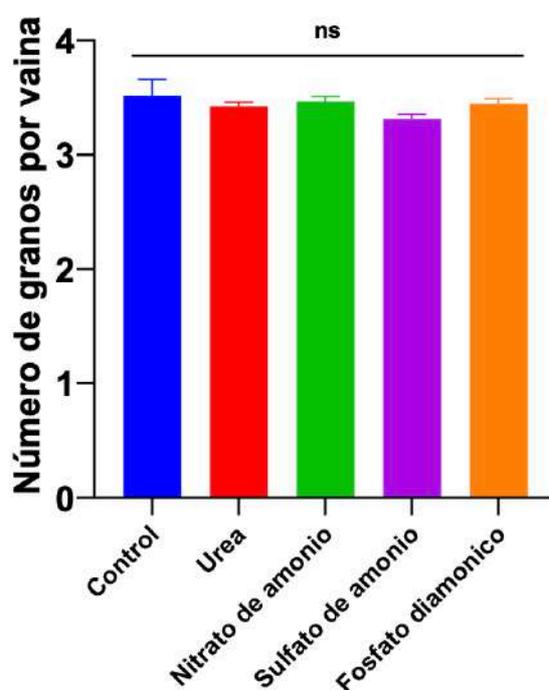
**Figura 38: Efecto de fuentes y dosis de nitrógeno en el número de vainas por planta del frijol Canario Centenario**

Como se observa en la **tabla 36** y la **figura 38**, el mayor número de vainas se registró en el tratamiento nitrato de amonio con la dosis de 40 ppm de N con un valor de 24.33 vainas, llegándose a encontrar diferencias estadísticas con los demás tratamientos. El tratamiento control fue el que obtuvo el menor valor.

El valor promedio general del número de vainas por planta del frijol Canario Centenario que se obtuvo fue de 20.12 vainas, comparado con otros autores, es mayor a los que obtuvo Espinoza (2009), Puente (2020) y Ocaña (2016) que obtuvieron un promedio de 15.04, 18.43 y 18.57 vainas respectivamente; y siendo menor a lo obtenido por Cántaro (2015) y Núñez (2011) con 21.44 y 24 vainas respectivamente. Los datos obtenidos por los investigadores son en producción en campo y con otros factores de evaluación. La metodología que empleó Puente fue ver el comportamiento de líneas de frijol entre ellas la variedad centenaria en condiciones de la molina.

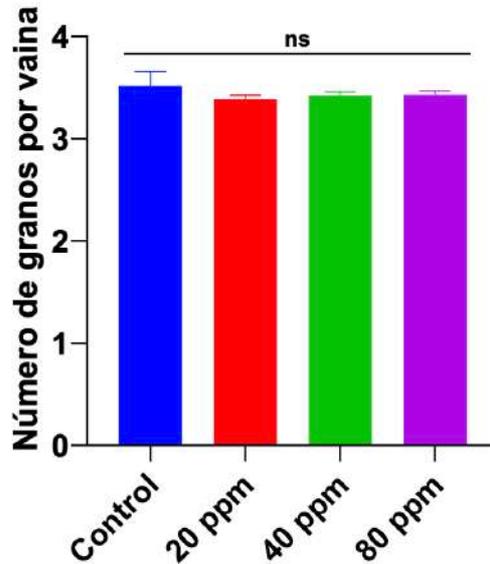
#### 4.3.2. Número de granos por vaina

Los resultados promedio del número de granos por vainas de los tratamientos evaluados se detallan en la **tabla 32**. Se observa que el tratamiento control mostró el mayor número de granos, alcanzando 3.52 granos, mientras que el tratamiento con sulfato de amonio y 20 ppm de N, exhibió el menor valor con 3.29 granos. El promedio general del número de vainas fue de 3.42 granos. Al realizar el análisis de varianza como se observa en la **tabla 33**, no se identificó significancia estadística para la fuente de nitrógeno, para la dosis de fertilización y para la relación de la fuente entre la dosis, siendo el coeficiente de variación fue de 4.172 %.



**Figura 39: Efecto de diferentes fuentes de nitrógeno en el número de granos por vaina del frijol Canario Centenario**

En la **figura 39**, se muestran los valores del número de semillas por vaina en relación con las fuentes de nitrógeno, como se observa en la **tabla 33** de la prueba de ANVA, no se encuentran diferencias significativas entre sí. El número de semillas por vaina promedio del fertilizante nitrato de amonio fue de 3.47 granos, del fosfato diamónico fue de 3.45 granos, de la urea fue de 3.43 granos y del sulfato de amonio fue de 3.29 granos.

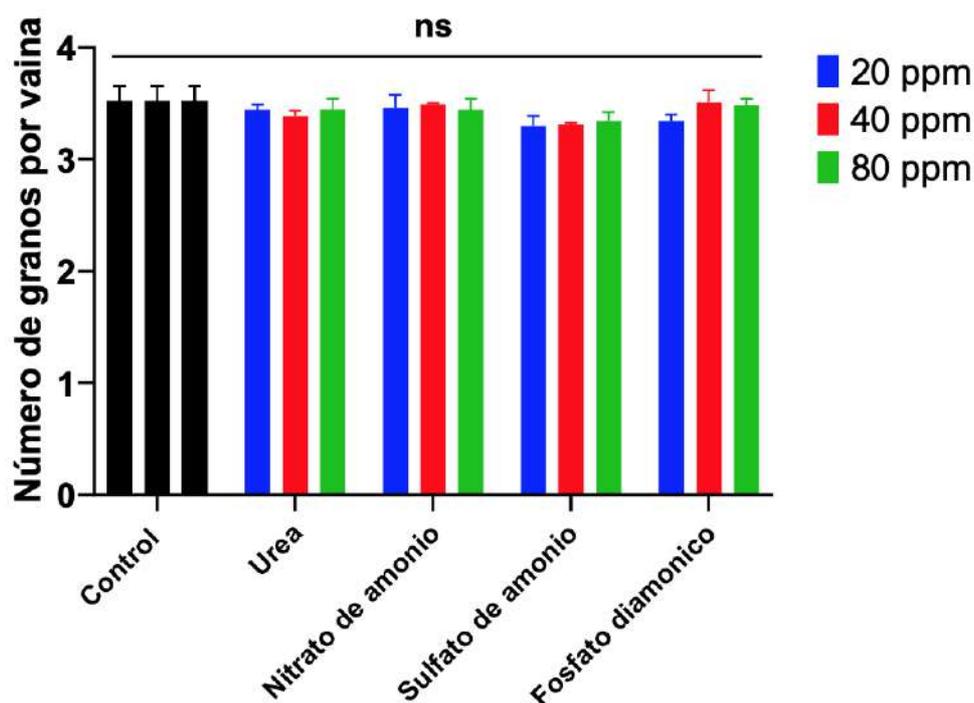


**Figura 40: Efecto de dosis crecientes de nitrógeno en el número de granos por vaina del frijol Canario Centenario**

En la **figura 40**, se muestran los valores del número de semillas por vainas en relación con las dosis de fertilización, como se observa en la **tabla 33** de la prueba de ANVA, no se encuentran diferencias significativas entre sí. Las dosis de 40 mg, 80 y 20 de N que obtuvieron valores de 3.52, 3.43 y 3.43 granos respectivamente.

**Tabla 37: Prueba de comparación de medias de Tukey de la variable número de granos por vaina del frijol Canario Centenario**

TRATAMIENTOS	NÚMERO DE GRANOS POR VAINA
CONTROL	3.52 a
FDA:40	3.51 a
NAM:40	3.49 a
FDA:80	3.49 a
NAM:20	3.46 a
UREA:80	3.45 a
NAM:80	3.44 a
UREA:20	3.44 a
UREA:40	3.39 a
FDA:20	3.34 a
SA:80	3.34 a
SA:40	3.31 a
SA:20	3.29 a



**Figura 41: Efecto de fuentes y dosis de nitrógeno en el número de granos por vaina del frijol Canario Centenario**

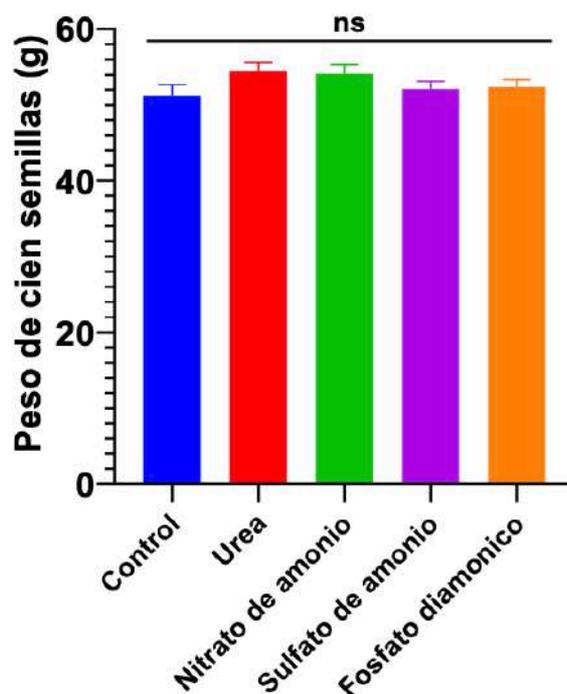
En la **tabla 37** y la **figura 41**, el mayor número de semillas por vainas se registró en el tratamiento control con un valor de 3.52 granos, no llegándose a encontrar diferencias estadísticas con los demás tratamientos.

El valor promedio general del número de semillas por vainas del frijol Canario Centenario que se obtuvo fue de 3.42 granos, comparado con otros autores, es menor a lo obtenido por Cántaro (2015), Espinoza (2009) y Ocaña (2016) con 3.53, 3.64 y 4.08 granos respectivamente. Los datos obtenidos por los investigadores son en producción en campo y con otros factores de evaluación.

#### 4.3.3. Peso de 100 semillas (g)

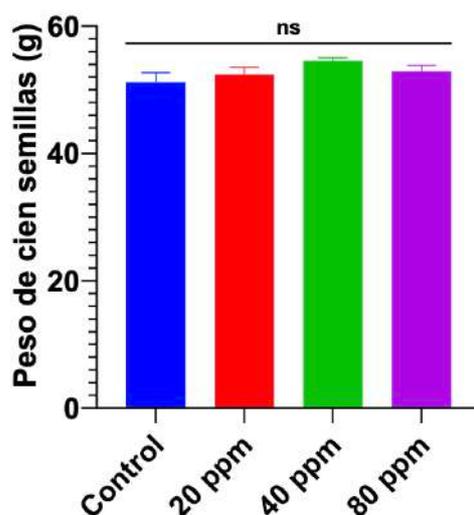
Los resultados promedio del peso de 100 semillas de los tratamientos evaluados se detallan en la **tabla 32**. Se observa que el tratamiento con urea y 20 ppm de N, mostró el mayor peso, alcanzando 54.78 g, mientras que el tratamiento con fosfato diamónico y 20 ppm de N, exhibió el menor valor con 50.11 g. El promedio general del peso fue de 53.11 g. Al realizar el análisis de varianza como se observa en la **tabla 33**, no se identificó una alta significancia

estadística para la fuente de nitrógeno, la dosis de fertilización y la relación entre la fuente y la dosis. El coeficiente de variación asociado a estos resultados fue del 6.138 %.



**Figura 42: Efecto de diferentes fuentes de nitrógeno en el peso de 100 semillas (g) del frijol Canario Centenario**

En la **figura 42**, se muestran los valores del peso de 100 semillas en relación con las fuentes de nitrógeno, como se observa en la **tabla 33** de la prueba de ANVA, no se encuentran diferencias significativas entre sí. El peso de 100 semillas promedio de la urea fue de 54.45 g, del nitrato de amonio fue de 54.14 g, del fosfato diamónico fue de 52.36 g y del sulfato de amonio fue de 52.11 g.

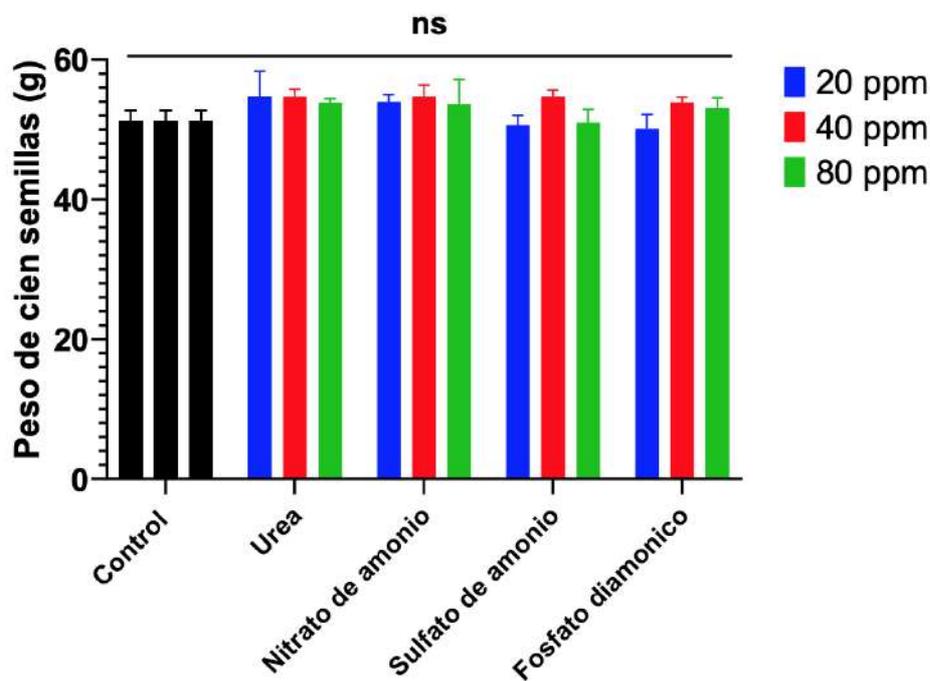


**Figura 43: Efecto de dosis crecientes de nitrógeno en el peso de 100 semillas (g) del frijol Canario Centenario**

En la **figura 43**, se muestran los valores del peso de 100 semillas en relación con las dosis de fertilización, como se observa en la **tabla 33** de la prueba de ANVA, no se encuentran diferencias significativas entre sí. Las dosis de 40 mg, 80 y 20 de N que obtuvieron valores de 54.53, 52.89 y 52.38 g respectivamente.

**Tabla 38: Prueba de comparación de medias de Tukey de la variable peso de 100 semillas (g) del frijol Canario Centenario**

TRATAMIENTOS	PESO DE 100 SEMILLAS (g)
UREA:20	54.78 a
NAM:40	54.75 a
SA:40	54.74 a
UREA:40	54.73 a
NAM:20	54.00 a
FDA:40	53.88 a
UREA:80	53.84 a
NAM:80	53.68 a
FDA:80	53.09 a
CONTROL	51.19 a
SA:80	50.96 a
SA:20	50.64 a
FDA:20	50.11 a



**Figura 44: Efecto de fuentes y dosis de nitrógeno en el peso de 100 semillas (g) del frijol Canary Centenario**

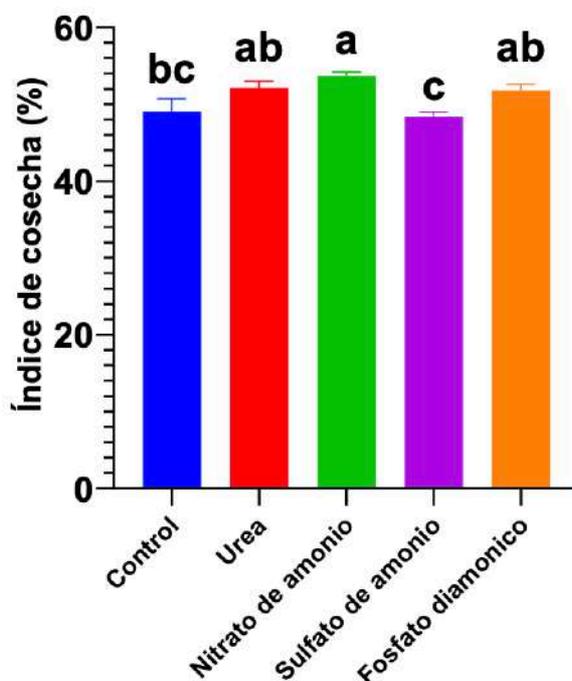
Como se observa en la **tabla 38** y la **figura 44**, el mayor peso de 100 semillas se registró en el tratamiento urea con la dosis de 20 ppm de N con un valor de 54.78 g, no llegándose a encontrar diferencias estadísticas con los demás tratamientos.

El valor promedio general del peso de 100 semillas por planta del frijol Canary Centenario que se obtuvo fue de 53.11 g, comparado con otros autores, es mayor a los que obtuvo Farfán (1996), Camarena et al. (2009), Espinoza (2009), Ocaña (2016) y Núñez (2011) que obtuvieron un promedio de 24.5, 35.8, 39.28, 41.56 y 42.31 g respectivamente; y siendo menor a lo obtenido por Cántaro (2015) y Flores (2008) con 60.1 y 159.34 g respectivamente. Los datos obtenidos por los investigadores son en producción en campo y con otros factores de evaluación.

#### 4.3.4. Índice de cosecha (%)

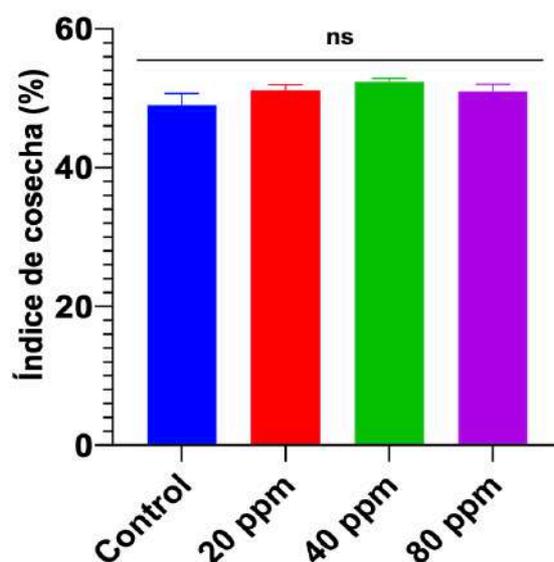
Los resultados promedio del índice de cosecha de los tratamientos evaluados se detallan en la **tabla 32**. Se observa que el tratamiento con nitrato de amonio y 20 ppm de N, mostró el mayor porcentaje, alcanzando 53.97 %, mientras que el tratamiento con sulfato de amonio y 80 ppm de N, exhibió el menor valor con 46.13 %. El promedio general del índice de cosecha

fue de 51.11 %. Al realizar el análisis de varianza como se observa en la **tabla 33**, se identificó una alta significancia estadística para la fuente de nitrógeno. Sin embargo, no se observaron diferencias significativas para la dosis de fertilización y para la relación entre la fuente y la dosis. El coeficiente de variación asociado a estos resultados fue del 4.047 %.



**Figura 45: Efecto de diferentes fuentes de nitrógeno en el índice de cosecha (%) del frijol Canario Centenario**

Al realizar la prueba de medias según Tukey del índice de cosecha sobre el factor fuente de nitrógeno como se detalla en la **tabla 34** y en la **figura 45**, se halló diferencias estadísticas entre la fuente de nitrato de amonio que fue la que presentó mayor valor con 53.71 %, superando estadísticamente a la fuente de urea y fosfato diamónico que registraron un valor de 52.13 % y 51.83 % respectivamente, ambas no muestran diferencias estadísticas entre sí, y por último la fuente que registró un menor valor fue sulfato de amonio con un valor de 48.34 %.

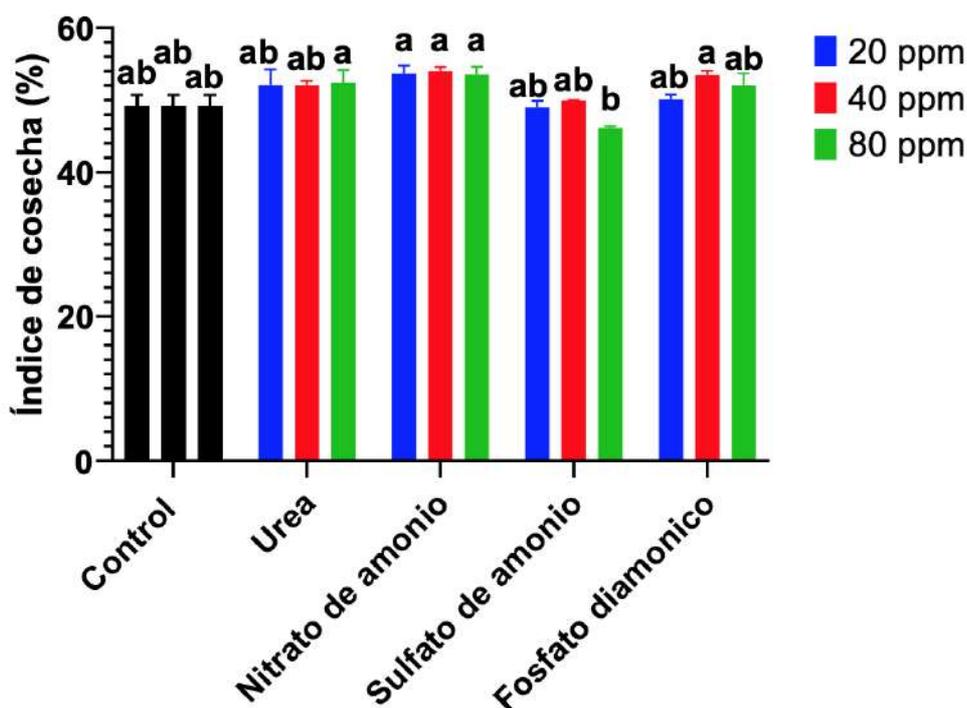


**Figura 46: Efecto de dosis crecientes de nitrógeno en el índice de cosecha (%) del frijol Canario Centenario**

En la **figura 46**, se muestran los valores del índice de cosecha (%) en relación con las dosis de fertilización, como se observa en la **tabla 33** de la prueba de ANVA, no se encuentran diferencias significativas entre sí. El índice de cosecha de la dosis 40 N fue de 52.34 %, de la dosis 20 N fue de 51.17 % y de la dosis 80 N fue de 50.99 %

**Tabla 39: Prueba de comparación de medias de Tukey de la variable índice de cosecha (%) del frijol Canario Centenario**

TRATAMIENTOS	ÍNDICE DE COSECHA (%)
NAM:40	53.98 a
NAM:20	53.63 a
NAM:80	53.51 a
FDA:40	53.46 a
UREA:80	52.34 a
UREA:20	52.03 ab
UREA:40	52.00 ab
FDA:80	51.97 ab
FDA:20	50.05 ab
SA:40	49.93 ab
CONTROL	49.06 ab
SA:20	48.98 ab
SA:80	46.13 b



**Figura 47: Efecto de fuentes y dosis de nitrógeno en el índice de cosecha (%) del frijol Canario Centenario**

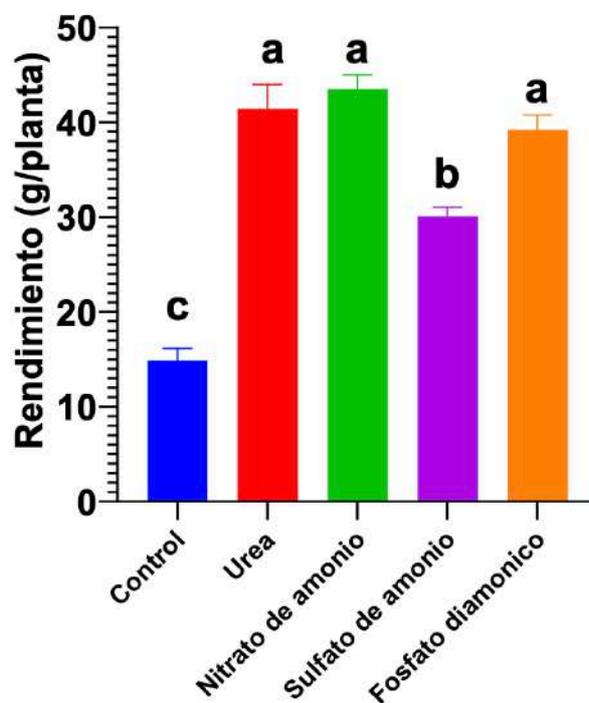
Como se observa en la **tabla 39** y la **figura 47**, el mayor índice de cosecha se registró en el tratamiento nitrato de amonio con la dosis de 40 ppm de N con un valor de 53.98 %, llegándose a encontrar diferencias estadísticas con los demás tratamientos. El tratamiento sulfato de amonio con dosis de 80 ppm de N fue el que obtuvo el menor valor.

El valor promedio general del índice de cosecha del frijol Canario Centenario con fertilización nitrogenada que se obtuvo fue de 51.11 %, es menor comparado con lo que obtuvo Cántaro (2015), con un valor promedio de 60.22 %. El dato obtenido por el investigador fue a base de una producción en campo.

#### 4.3.5. Rendimiento de grano seco ( $\text{g planta}^{-1}$ )

Los resultados promedio del rendimiento de los tratamientos evaluados se detallan en la **tabla 32**. Se observa que el tratamiento con nitrato de amonio y 40 ppm de N, mostró el mayor rendimiento, alcanzando  $46.45 \text{ g planta}^{-1}$ , mientras que el tratamiento control, exhibió el menor valor con  $14.92 \text{ g planta}^{-1}$ . El promedio general del rendimiento fue de  $36.74 \text{ g planta}^{-1}$ . Al realizar el análisis de varianza como se observa en la **tabla 33**, se identificó una alta significancia estadística para la fuente de nitrógeno. Sin embargo, no se observaron

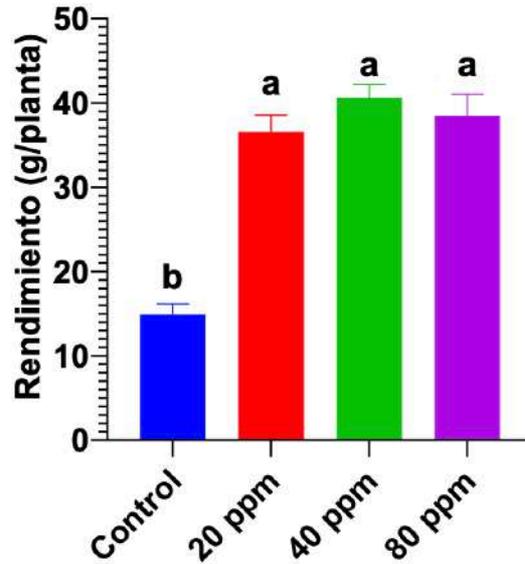
diferencias significativas para la dosis de fertilización y para la relación entre la fuente y la dosis. El coeficiente de variación asociado a estos resultados fue del 13.858 %.



**Figura 48: Efecto de diferentes fuentes de nitrógeno en el rendimiento (g/planta) del frijol Canario Centenario**

Al realizar la prueba de medias según Tukey del rendimiento sobre el factor fuente de nitrógeno como se detalla en la **tabla 34** y en la **figura 48**, la fuente de nitrato de amonio, urea y fosfato diamónico fueron las que registraron los mayores valores con 43.51, 41.42 y 39.20 g planta<sup>-1</sup> respectivamente, las tres fuentes no muestran diferencias estadísticas entre sí, superando estadísticamente a la fuente de sulfato de amonio registró un valor de 30.10 g planta<sup>-1</sup>.

En el trabajo de investigación de Sousa (2022), en frijol común, donde se aplicó la urea, con un total de 90 kg ha<sup>-1</sup> de N y evaluado en prefloración. Dio en el tratamiento (P<sub>0</sub>V<sub>445</sub>R<sub>545</sub>) el valor más alto con 29.38 g planta<sup>-1</sup> y el tratamiento que dio el menor valor fue (P<sub>60</sub>V<sub>40</sub>R<sub>530</sub>) con 21.77 g planta<sup>-1</sup>, y el tratamiento testigo obtuvo 26.78 g planta<sup>-1</sup>.

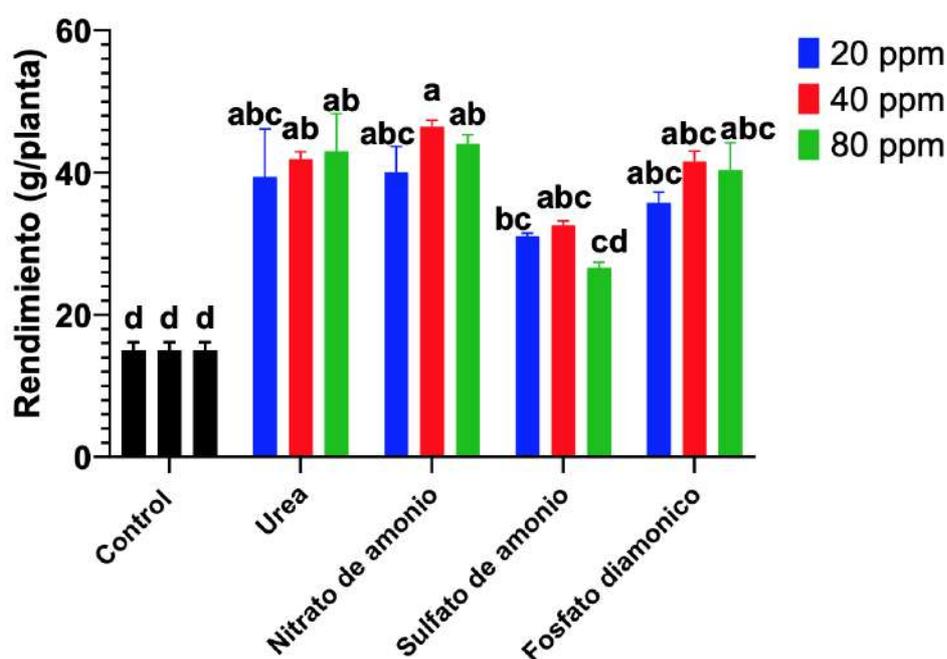


**Figura 49: Efecto de dosis crecientes de nitrógeno en el rendimiento (g/planta) del frijol Canario Centenario**

En la **figura 49**, se muestran los valores del rendimiento ( $\text{g planta}^{-1}$ ) en relación con las dosis de nitrógeno, como se observa en la **tabla 33** de la prueba de ANVA, no se encuentran diferencias significativas entre sí. Las dosis de 40 mg, 80 y 20 de N que obtuvieron valores de 40.63, 38.49 y 36.55  $\text{g planta}^{-1}$  respectivamente.

**Tabla 40: Prueba de comparación de medias de Tukey de la variable rendimiento ( $\text{g planta}^{-1}$ ) del frijol Canario Centenario**

TRATAMIENTOS	RENDIMIENTO ( $\text{g planta}^{-1}$ )
NAM:40	46.45 a
NAM:80	44.02 ab
UREA:80	42.99 ab
UREA:40	41.89 ab
FDA:40	41.57 abc
FDA:80	40.31 abc
NAM:20	40.05 abc
UREA:20	39.38 abc
FDA:20	35.73 abc
SA:40	32.63 abc
SA:20	31.03 bc
SA:80	26.64 cd
CONTROL	14.92 d



**Figura 50: Efecto de fuentes y dosis de nitrógeno en el rendimiento (g/planta) del frijol Canario Centenario**

Como se observa en la **tabla 40** y la **figura 50**, el mayor rendimiento se registró en el tratamiento nitrato de amonio con la dosis de 40 ppm de N con un valor de  $46.45 \text{ g planta}^{-1}$ , llegándose a encontrar diferencias estadísticas con los demás tratamientos. Esto se debe ya que el fertilizante de nitrato de amonio posee dos formas de disponibilidad que la mitad está de forma nítrica y la otra mitad de forma amoniacal, el primero tiene un efecto de absorción inmediata y el segundo tiene un efecto de absorción a largo plazo, además por su carga (+) queda retenido por los coloides inorgánicos del suelo (Navarro y Navarro, 2014). El nitrato de amonio con la dosis 40 ppm de N, obtuvo una mayor área nodular con  $1.790 \text{ cm}^2$  al 60 % de eficiencia. Uno de los factores críticos en la nodulación es el pH, siendo este fertilizante el que tiene el menor índice de acidez en comparación de los otros con  $63 \text{ kg CaCO}_3/100 \text{ kg}$  de NA (IFDC, 1979). Según la investigación de Habete y Bushasha (2019), tanto la aplicación de fertilizante N como la inoculación de *Rhizobium* aumentaron el peso de cien semillas y el rendimiento de semillas por hectárea. El fertilizante que registró el menor valor fue sulfato de amonio con dosis de 80 ppm de N con un valor de  $26.64 \text{ g planta}^{-1}$ . Esto se debe ya que el fertilizante sulfato de amonio su forma de disponibilidad es en la forma amoniacal, es por esta razón que queda retenido por la fracción coloidal del suelo, y a la hora

de segregarse libera iones  $\text{SO}_4^-$  (Navarro y Navarro, 2014), por eso este fertilizante llega a ser ácido, cuyo índice de acidez es de con 110 kg  $\text{CaCO}_3/100$  kg de SA (IFDC, 1979), como se muestra en el **anexo 2** obtuvo el menor pH con 5.68 y la mayor conductividad eléctrica de 4172  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , es por ello que se recomienda en usos de suelos salinos-sódicos (Navarro y Navarro, 2014). Debido al efecto acidificante puede inmovilizar el fósforo inhibiendo la nodulación (Fernández-Canigia, 2020). El sulfato de amonio con la dosis 80 ppm de N, obtuvo la menor área nodular con 0.182  $\text{cm}^2$  al 0 % de eficiencia.

En el caso de la dosis de los fertilizantes que fueron 20, 40 y 80 mg de nitrógeno por kg de sustrato llevado a hectáreas sería 40, 80 y 160 kg  $\text{ha}^{-1}$  de N, en comparación con la investigación de Sousa (2022) en frijol común, en unos de sus tratamientos se asemeja a nuestro estudio, que es el momento de aplicación del fertilizante, en el cual nosotros aplicamos en el estadio fenológico V3-V4, y ellos en el estadio V4 con el tratamiento  $\text{P}_0\text{V4}_{90}\text{R5}_0$  el cual dio un rendimiento de 29.25 g  $\text{planta}^{-1}$ . En relación a nuestra investigación estaría entre la dosis de 40 y 80 ppm de N de la urea que dio un rendimiento de 41.89 y 42.99 g  $\text{planta}^{-1}$  respectivamente.

La adición de fertilizante nitrogenado (100 kg  $\text{ha}^{-1}$ ) retrasó la floración y la madurez, aumentó el rendimiento, pero inhibió la fijación de nitrógeno (% FBN) en 22 genotipos de frijoles comunes evaluados en el estudio actual durante tres años (Reinprecht et al., 2020).

El valor promedio general del rendimiento (g  $\text{planta}^{-1}$ ) del frijol Canario Centenario que se obtuvo fue de 36.74 g  $\text{planta}^{-1}$ , comparado con otros autores, es mayor a los que obtuvo Espinoza (2009), Ocaña (2016), Núñez (2011) y Puente (2020) que obtuvieron un promedio de 20.85, 33.63, 34.28 y 36.55 g  $\text{planta}^{-1}$  respectivamente; y siendo menor a lo obtenido por Cántaro (2015) con 45.49 g  $\text{planta}^{-1}$  respectivamente. Los datos obtenidos por los investigadores son en producción en campo y con otros factores de evaluación.

## V. CONCLUSIONES

De acuerdo con los objetivos establecidos y al contrastar los resultados de la investigación, se puede llegar a la conclusión de que:

- El efecto de la fertilización nitrogenada frente al rendimiento tiene una tendencia a aumentar hasta la dosis de 40 ppm de N, luego de ahí tiende a bajar en la dosis de 80 ppm de N, pero estadísticamente no se encuentran diferencias significativas entre sí. El efecto de la fertilización nitrogenada frente a la nodulación tiende a aumentar moderadamente hasta la dosis de 40 ppm de N, luego de ahí tiende a bajar drásticamente llegando casi a su inhibición, estadísticamente si se encuentran diferencias significativas entre sí.
- Respecto a la altura del frijol Canario Centenario, el fertilizante que genera mayor valor fue nitrato de amonio, la dosis que genera mayor valor fue la de 80 ppm de N con tendencia a aumentar conforme aumenta la dosis y el tratamiento que genera mayor valor fue fosfato diamónico con 80 ppm de N. Respecto al peso seco foliar del frijol Canario Centenario, el fertilizante que genera mayor valor fue la urea, la dosis que genera mayor valor fue la de 80 ppm de N con tendencia a aumentar seco conforme aumenta la dosis y el tratamiento que genera mayor valor fue fosfato diamónico con 80 ppm de N.
- El fertilizante que genera menor impacto negativo en la proliferación de nódulos fue la urea, la dosis que genera menor impacto negativo en la proliferación de nódulos fue la de 40 ppm de N y el tratamiento que genera menor impacto negativo en la proliferación de nódulos fue la urea con dosis de 40 ppm de N. El tratamiento de la urea tiene la mayor efectividad nodular (%) frente a los otros fertilizantes.
- Respecto al rendimiento del frijol Canario Centenario, el fertilizante que dio el mayor valor fue nitrato de amonio, la dosis que dio el mayor valor fue la de 40 ppm de N y el tratamiento que dio el mayor valor fue nitrato de amonio con dosis de 40 ppm de N.

## VI. RECOMENDACIONES

- Para los agricultores sería recomendable el uso de *Rhizobium* sp. con adición de nitrato de amonio a una dosis 40 ppm, ya que nos dio un buen rendimiento esta combinación en comparación con los otros tratamientos de la investigación.
- No se aconseja la aplicación excesiva de los fertilizantes nitrogenados porque inhibe la simbiosis con *Rhizobium* sp. y conduce a una rápida acumulación de masa verde en perjuicio de la floración y la fructificación.
- Sería recomendable poder seguir incrementando la dosis para hallar la concentración del fertilizante que inhiba en totalidad la formación de nódulos.
- En la actualidad existen diferencias entre cultivares y cepas de rizobios en su capacidad de fijación de nitrógeno, metabolismo del hidrógeno y rendimiento de granos. Por lo que sería recomendable el uso del fitomejoramiento para crear variedades de frijol que puedan mejorar la fijación simbiótica de  $N_2$ , reducir la evolución de  $H_2$  y aumentar el rendimiento de granos. Durante la fijación de  $N_2$ , la nitrogenasa también produce  $H_2$  como subproducto y la producción de  $H_2$  representa una pérdida de energía que de otro modo estaría disponible para la fijación de  $N_2$ . Las estimaciones de pérdidas de energía de muchas leguminosas agrícolas han oscilado entre el 20 y el 40 % del flujo de electrones a través de la nitrogenasa.

## VII. BIBLIOGRAFÍA

- Abad, M. y Noguera, P. (1997). Los sustratos en los cultivos sin suelo. En: M. Urrestarazu (ed.). *Manual de cultivo sin suelo* (1ª ed., pp. 101-150). Universidad de Almería. Servicio de Publicaciones.
- Alinaitwe, D. (2019). *El efecto integrado de los fertilizantes DAP y la inoculación de rizobio en el crecimiento y el rendimiento de los frijoles comunes (Phaseolus vulgaris L.)*. Undergraduate dissertation. Makerere University.
- Alvarado, M. A. y Solano, J. A. (2002). *Producción de sustratos para viveros*. Proyecto VIFINEX – OIRSA. Costa Rica.
- Andrews, M. y Andrews M. (2017). Specificity in Legume - Rhizobia Symbioses. *Int. J. Mol. Sci.* 18. doi: 10.3390/ijms18040705
- Arias, J., Martínez, T. y Carmona, M. (2007). *Manual: Buenas Prácticas Agrícolas, en la Producción de Frijol Voluble*. Gobernación de Antioquia: FAO. ISBN: 978-92-5-305827-3
- Bacon, P. E. (1995). *Nitrogen fertilization in the environment*. Ed. Marcel Dekker, New York.
- Baque, J. (2014). *Adaptación de 26 líneas avanzadas de frijol voluble (Phaseolus vulgaris L.), asociado con maíz (Zea mays L.) en el campo docente experimental La Tola, Tumbaco, Pichincha*. Tesis para optar el título de Ing. Agrónomo. Universidad Central de Ecuador. Quito, Ecuador.
- Bartolini, C. (1989). *fertilidad de los suelos*. Ed. Mundi - Prensa. Madrid.
- Benson, D. R. y Silvester, W. B. (1993). Biology of Frankia strains, actinomycete symbionts of actinorhizal plants. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 57(2), 293-319 p. <https://doi.org/10.1128/mr.57.2.293-319.1993>
- Bezdíček, D. F. y Kennedy, A. C. (1998). *Microorganisms in Action*. En J. M. Lynch y J. E. Hobbie (eds.), Blackwell Scientific Publications.

- Bhuvaneshwari, T. V., Turgeon, B. G., y Baver, W. D. (1980). Early events in the infection of soybean (*Glycine max* L. Merr) by *Rhizobium japonicum*. I- Localization of infectible root cells. *Plant Physiol.* 66(6), 1027-1031 p. <https://doi.org/10.1104/pp.66.6.1027>
- Brenes, P., Cordero, J. y Peña, W. (2022). Efecto de la fertilización nitrogenada sobre la nodulación de arvejas en un suelo andisol de La Angelina, Cartago. *Repertorio Científico*, 24(2), 8-14 p. <https://doi.org/10.22458/rc.v24i2.3888>
- Camarena, F., Huaranga, A. y Mostacero, E. (2009). *Innovación tecnológica para el incremento de la producción de frijol común (Phaseolus vulgaris L.)*. Ediciones Agrum.
- Canchari, G. (2005). *Efecto de aplicación de cepas de Rhizobium, bioestimulantes y fertilización en el rendimiento del frijol canario (Phaseolus vulgaris L.) en condiciones de costa central*. Tesis para optar el título de Ing. Agrónomo. UNALM.
- Cántaro, H. (2015). *Efectividad simbiótica de dos cepas de Rhizobium sp. en cuatro variedades de frijol común (Phaseolus vulgaris L.) en condiciones de costa central*. Tesis para optar el título de Ing. Agrónomo. UNALM.
- Cassmann, K. G., Whitney, A. S. y Stockinger, K. R. (1980). Root growth and dry matter distribution of soybean as affected by phosphorus stress, nodulation, and nitrogen source. *Crop Science*, 20, 239-244 p. <https://doi.org/10.2135/cropsci1980.0011183X002000020022x>
- Castellanos, J. y Rodríguez, N. F. (2017). *Nitrógeno: Diagnóstico, definición de dosis, fuentes y épocas de aplicación. Curso de Evaluación de la Fertilidad del Suelo para Formular Recomendaciones de Fertilización*. Intagri.
- Cheema, Z. y Ahmad, A. (2000). Effects of Urea on the Nitrogen Fixing Capacity and Growth of Grain Legumes. *International Journal of Agriculture & Biology*, 2(4). ISSN:1560-8530.
- Chuma, G. B., Mulalisi, B., Mondo, J. M., Ndeko, A. B., Bora, F. S., Bagula, E. M. y Civava, R. (2022). El fosfato diamónico (DAP) y la densidad de las plantas mejoran el rendimiento de grano, la capacidad de nodulación y la rentabilidad de los guisantes

- (*Pisum sativum* L.) en los ferralsoles del este de la República Democrática del Congo. *CABI Agric Biosci*, 3(1), 65 p. <https://doi.org/10.1186/s43170-022-00130-6>
- CIAT, Centro Internacional de Agricultura Tropical. (1982). *Etapas de desarrollo de la planta de frijol común*. Guía de estudio. CIAT, Cali (Colombia).
- CIAT, Centro Internacional de Agricultura Tropical. (1984). *Morfología de la planta de frijol común* (2da ed.). Guía de estudio. CIAT, Cali (Colombia).
- CIAT, Centro Internacional de Agricultura Tropical. (1986). *Etapas de desarrollo de la planta de frijol común* (3ra ed.). Guía de estudio. CIAT, Cali (Colombia).
- CIAT, Centro Internacional de Agricultura Tropical. (1988a). *Conceptos básicos de la fisiología del frijol*. Guía de estudio. CIAT, Cali (Colombia).
- CIAT, Centro Internacional de Agricultura Tropical. (1988b). *Simbiosis Leguminosa–Rhizobio. Manual de métodos de evaluación, selección y manejo agronómico*.
- Cisneros, N. F. (1992). *El manejo integrado de plagas. Guía de estudio CIP N° 7*. Centro Internacional de la Papa.
- Coutts, M. P. y Philipson, J. J. (1977). The influence of mineral nutrition on the root development of trees. III. Plasticity of the root growth in response to changes in the nutrient environment. *J. Exp. Bot*, 1071-1075 p.
- Cruz, E., Can, A., Sandoval, M., Bugarín, R., Robles, A. y Juárez, P. (2012). Sustratos en la horticultura. *Revista Biociencias*, 2(2), 17-26 p. <https://doi.org/10.15741/revbio.02.02.03>
- Cubero, I. y Moreno, T. (1996). *Leguminosas de grano*. Mundi – Prensa.
- Dénarié, J., Debelle, F., Truchet, G. y Promé, J. C. (1993). *Rhizobium* and legume nodulation: A molecular dialogue. En: *New Horizons in Nitrogen Fixation*, 19-30 p.
- De Lorenzo, C., Lannetta P. P. M., Fernández-Pascual M., James, E. K., Lucas M. M., Sprent, J. I., Witty, J. F., Minchin, F. R. y de Felipe, M. R. (1993). Difusión de oxígeno en nódulos de lupinos en el mecanismo de funcionamiento de la barrera de difusión. *Experimental Botánica*. 44, 1468-1474 p. <https://doi.org/10.1093/jxb/44.9.1469>

- Dutta, S. y Podile, A. R. (2010). Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): The bugs to debug the root zone. *Microbiol.* 36(3), 232-244 p. <https://doi.org/10.3109/10408411003766806>
- El-Hamdaoui, A., Redondo-Nieto, M., Rivilla, R., Bonilla, I. y Bolaños, L. (2003). Effects of boron and calcium nutrition on the establishment of the *Rhizobium leguminosarum*-pea (*Pisum sativum*) symbiosis and nodule development under salt stress. *Plant Cell Environ*, 26, 1003-1011. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2003.00995.x>
- Elsheikh, E. A. y Elzidany, A. A. (1997). Efectos de la inoculación de *Rhizobium*, los fertilizantes orgánicos y químicos sobre el rendimiento y las propiedades físicas de las semillas de frijol faba. *Alimentos vegetales para la nutrición humana* (Dordrecht, Países Bajos), 51(2), 137-144 p. <https://doi.org/10.1023/a:1007937614660>
- Erdman, L. (1968). Inocule sus leguminosas. *Agricultura de las Américas*, 17(6), 45-48 p.
- Espinoza, A. M. (2009). *Evaluación de 16 genotipos seleccionados en dos densidades de siembra de frijol canario cv. centenario (Phaseolus vulgaris L.) por su calidad y rendimiento en condiciones de Costa central*. Tesis para optar el grado de Ms. Sc. en la especialidad de producción agrícola. UNALM.
- FAO. (2002). *Los Fertilizantes y Su USO una Guía de Bolsillo para los Oficiales de Extensión*. Food & Agriculture Org. <https://www.fao.org/3/x4781s/x4781s.pdf>
- FAO. (2016). *Semillas nutritivas para un futuro sostenible*. Food & Agriculture Org.
- FAOSTAT. (2022). *Statistics Division*.
- Farfán, A. R. E. (1996). *Evaluación de variedades de frijol Castilla (Vigna unguiculata L. Walp) en condiciones de costa central*. Tesis para optar el título de Ing. Agrónomo. UNALM. Lima, Perú. 80 - 82 p.
- Fernández-Canigia, M. V. (2020). *Factores determinantes de la nodulación*. Departamento de Investigación y Desarrollo Nitragin Argentina S.A.
- Fernández-Pascual, M., María, N. D. y Felipe, M. R. D. (2002). Fijación biológica del nitrógeno: Factores limitantes. En: *CSIC - Centro de Ciencias Medioambientales (CCMA)*.

- Flores, W. E. (2008). *Evaluación de cepas de Rhizobium en la contribución del rendimiento en el cultivo de Phaseolus vulgaris L. (frijol canario) en el Valle Pativilca, provincia de Barranca*. Tesis para optar el título de Ing. Agrónomo. UNALM.
- Gallace, M. E., Lorda, G. y Molas, M.L. (2019). *Respuesta adaptativa de Ensifer meliloti a salinidad mejora la simbiosis con Alfalfa*. VI Congreso de la Red Argentina de Salinidad. Buenos Aires, Argentina. Actas pp. 184.
- Gavi, R. F. (2000). *Uso de fertilizantes*. Colegio de Postgraduados. Especialidad de Edafología. Montecillos.
- Gavilán, C. P. (2002). *Efecto de la Fertilización Nitrogenada y de la aplicación de Microelementos en el Rendimiento del Cultivo de Brócoli cv. Liberty*. Tesis para optar el título de Ing. Agrónomo. UNALM.
- Gepts, P. (2002). *Phaseolus vulgaris (Beans)*. Encyclopedia of Genetics.
- Global Network against Food Crises [GNAFC] y Food Security Information Network [FSIN] (2022). *Global report on food crises*.
- Gonzales, E. (2013). *Estudio de la diversidad de cepas de Rhizobium provenientes de nódulos de tres variedades de frijol común (Phaseolus vulgaris L.)*. Tesis para optar el título profesional de biólogo. UNALM.
- González, N. S. (1994). *Dinámica de la fijación de nitrógeno en soja, en suelos con alta fertilidad nitrogenada*. Tesis para optar al grado de Magister Scientiae en Producción Vegetal. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Mar del Plata - EEA INTA Balcarce. Argentina. 62 pp.
- Graham, P. H. (1992). Stress tolerance in *Rhizobium* and *Bradyrhizobium*, and nodulation under adverse soil conditions. *Microbiol.* 38. 475 – 484 p.
- Habete, A. y Bushasha, T. (2019). Effect of *Rhizobium* Inoculation and Nitrogen Fertilization on Nodulation and Yield Response of Common Beans (*Phaseolus vulgaris* L.) at Boloso Sore, Southern Ethiopia. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare.* 6(13). 72-75 p. ISSN: 2225-093X
- Hamdi, Y., Alaa el-Din, M. y Tewfik, M. (1978). Actividades de nitrato reductasa y deshidrogenasa de los nódulos del frijol caupí afectadas por el sulfato de amonio y los fertilizantes de urea. *Zentralblatt für Bakteriologie, Parasitenkunde,*

*Infektionskrankheiten und Hygiene. Zweite naturwissenschaftliche Abteilung: Mikrobiologie der Landwirtschaft der Technologie und des Umweltschutzes*, 133(5), 400–407 p. [https://doi.org/10.1016/s0323-6056\(78\)80035-4](https://doi.org/10.1016/s0323-6056(78)80035-4)

Harper, J. L. y Hawksworth, D. L. (1994). Biodiversity: Measurement and estimation. *Philosophical Transactions: Biological Sciences*. 345(1311). 5-12 p. <https://doi.org/10.1098/rstb.1994.0081>

Hungria, M., Franchini, J. C., Campo, R. J. y Graham, P. H. (2005). The importance of nitrogen fixation to soybean cropping in South America. En: Werner, D., Newton, W.E. (eds) *Nitrogen Fixation in Agriculture, Forestry, Ecology, and the Environment. Nitrogen Fixation: Origins, Applications, and Research Progress* (vol 4, 25-42 p). [https://doi.org/10.1007/1-4020-3544-6\\_3](https://doi.org/10.1007/1-4020-3544-6_3)

Ibáñez, V. (2015). *Efecto de la inoculación con Rhizobium sobre variedades de frijol en combinación con fertilización nitrogenada*. Tesis para optar el título de Ing. Agrónomo. Universidad Rafael Landívar.

IFDC, International Fertilizer Development Center (1979). *Fertilizer Manual*.

INIA. (2004). *Frijol canario 2000—IMIAA*. <https://www.inia.gob.pe/wp-content/uploads/investigacion/programa/sistProductivo/variedad/frijol/Canario-2000.pdf>

Izquierdo, M. (1988). *Efecto de diferentes formas de aplicación del fertilizante fosfórico sobre el rendimiento de frijol común (Phaseolus vulgaris L.) c.v. Rev-79 y la materia verde de frijol y malezas*. Tesis para optar el título de Ing. Agrónomo. <https://cenida.una.edu.ni/Tesis/tmf04i99.pdf>

Jämtgård, S., Näsholm, T., y Huss-Danell, K. (2010). Nitrogen compounds in soil solutions of agricultural land. *Soil Biol. Biochem*, 42(12), 2325-2330 p. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.09.011>

Jeong, M. S. y Jang, S. B. (2006). Electron transfer and nano-scale motions in nitrogenase Fe-protein. *Current Nanoscience*, 2(1), 33-41 p. <https://dx.doi.org/10.2174/157341306775473773>

Jiang, Y., MacLean, D.E., Perry, G. E., Marsolais, F., Hill, B. y Pauls, K. P. (2020). Evaluation of beneficial and inhibitory effects of nitrate on nodulation and nitrogen

- fixation in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Legume Science*.  
<https://doi.org/10.1002/leg3.45>
- Kennedy, I., Choudhury, A. y Kecskes, M. (2004). Non-symbiotic bacterial diazotrophs. *Soil Biology and Biochemistry*, 36(8), 1229-1244 p.  
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.04.006>
- Lahav, E., Harper, J. y Hugeman, R. (1976). Improved soybean growth in urea with pH buffered by a carboxy resin. *Crop Sci.*, 16, 325–8 p.  
<https://doi.org/10.2135/cropsci1976.0011183X001600030003x>
- Laich, F. (2018). La fijación biológica del nitrógeno y la fertilidad del suelo. En: *Curso Teórico-Práctico Restauración de la Fertilidad de los Suelos*. Instituto Canario de Investigaciones Agrarias.
- León, J. (2022). Solo 46.7 % de los más de dos millones de pequeños y medianos productores utilizaron fertilizantes químicos; 28 % utiliza solo abonos. Recuperado el 03 de marzo del 2024, de Agencia agraria de noticias: <https://agraria.pe/noticias/solo-46-7-de-los-mas-de-dos-millones-de-pequenos-y-medianos--28297>
- LPSN, List of Prokaryotic names with Standing in Nomenclature. (2024). Género *Rhizobium*. Lista de nombres procariotas con posición en la nomenclatura.  
<https://lpsn.dsmz.de/genus/rhizobium>
- Ma, Q. F., Rengel, Z. y Rose, T. (2009). The effectiveness of deep placement of fertilizers is determined by crop species and edaphic conditions in Mediterranean-type environments: A review. *Austr. J. Soil Res*, 47(1), 19-32 p.  
<https://doi.org/10.1071/SR08105>
- Manrique, K. (2016). *Entrevista con la agencia agraria de noticias-Perú*, Consultor de la FAO.
- Maroto, J. (2008). *Elementos de horticultura general* (3ra ed.). Editorial Mundi-Prensa. ISBN:9788484763413
- Marschner, H. (2012). *Mineral nutrition of higher plants* (3ra ed.). London Academic Press.  
<https://doi.org/10.1016/C2009-0-63043-9>

- Martínez, J., Galantini, J., Landriscini, M. y Duval, M. (2014). Momentos de fertilización nitrogenada: Influencia sobre las eficiencias del nitrógeno y del agua. *Agro UNS*, 5-9 p. ISSN: 1668-5946
- Melgar, R. (2015). Acidificación de los suelos: Entre el mito y la realidad. *Revista Fertilizar*, (31), 38 p.
- Meneses, R., Waaijbergen, H. y Piérola, L. (1996). *Las leguminosas en la agricultura boliviana. Revisión Bibliográfica*. Editores Cochabamba. ISSN: 9067544647
- Mengel, K. y Kirkby, E. A. (2000). Principios de Nutrición Vegetal. Suiza: *International Potash Institute* (1ª ed. en español).
- MIDAGRI, Ministerio de Agricultura (2022). *Series Históricas de Producción Agrícola-Compendio Estadístico*. <http://siea.midagri.gob.pe/>
- Miller, A. J. y Cramer, M. D. (2004). Root nitrogen acquisition and assimilation. *Plant Soil*, 274, 1-36 p. <https://doi.org/10.1007/s11104-004-0965-1>
- Monsalve, J., Escobar, R., Acevedo, M., Sánchez, M. y Coopman, R. (2009). Efecto de la concentración de nitrógeno sobre atributos morfológicos, potencial de crecimiento radical y estatus nutricional en plantas de *Eucalyptus globulus* producidas a raíz cubierta. *Bosque Valdivia*, 30(2), 88-94 p. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002009000200004>
- Montaño, N. (2008). *Efecto del Carbono Orgánico sobre la disponibilidad de fósforo y nitrógeno en el suelo de un ecosistema tropical estacional mexicano*. Tesis para optar el grado doctor en ciencias. UNAM.
- Moudiongui, A. y Rinaudo, G (1987). Efecto del nitrato de amonio en la nodulación y la fijación de nitrógeno (reducción de acetileno) de la legumbre tropical Sesbania rostrata. *Mircen Journal*. 3, 235–241 p. <https://doi.org/10.1007/BF00933577>.
- Nadal, S., Moreno, M. y Cubero, J. (2004). *Leguminosas de grano en la agricultura moderna*. Edición Mundi-Prisma.
- Navarro, G. y Navarro, S. (2013). *Química agrícola: Química del suelo y de los nutrientes esenciales para las plantas* (3ra ed.). Mundi – Prensa.
- Navarro, G. y Navarro, S. (2014). *Fertilizantes: Química y acción*. Edición Mundi-Prensa.

- Núñez, E. (2011). *Efecto de dos cepas de Rhizobium sp. y microorganismos efectivos en el rendimiento de grano seco de frijol (Phaseolus vulgaris L.) cultivar Canario Centenario en Costa Central*. Tesis para optar el título de Ing. Agrónomo. UNALM.
- Ocaña, J. A. (2016). *Aplicación de molibdeno y cobalto en frijol (Phaseolus vulgaris L.) 89 con dos sistemas de fertilización bajo cero labranzas*. Tesis para optar el grado de magister scientiae en producción agrícola. Agrónomo. UNALM.
- Olivera, M., Tejera, N., Iridame, C., Ocaña, A. y Lluch, C. (2004). Growth, nitrogen fixation and ammonium assimilation in common bean (*Phaseolus vulgaris*): Effect of phosphorus. *Physiol Plant*, 121, 498-505 p. <https://doi.org/10.1111/j.0031-9317.2004.00355.x>
- Olk, D. (2008). Organic forms of soil nitrogen. En Schepers J.S. y Raun W.R. (Eds.), *Nitrogen in Agricultural Systems*, 57-100 p. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr49.c3>
- Ortega, M. (1991). Bioquímica. En Engleman E. M. (Ed.), *Contribuciones al conocimiento de frijol (Phaseolus) en México*, 101-112 p. Colegio de Postgraduados.
- Owen, A. y Jones, D. (2001). Competition for amino acids between wheat. *Soil Biol. Biochem*, 33, 651-657 p. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00209-1](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00209-1)
- Palomino, V. (2012). *Bayesian Analysis of a Linear Mixed Model to Measure the Impact of Climate Change on Yield of Common Bean for the Year 2030 Worldwide*. Tesis para optar el grado de master. University of Puerto Rico.
- Paredes, M. 2013. *Fijación biológica de nitrógeno en leguminosas y gramíneas*. Trabajo Final de Ingeniería en Producción Agropecuaria. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Católica Argentina.
- Pastor, J. (1999). Utilización de sustratos en viveros. *Terra Latinoamericana*, 17(3), 231-235 p. E-ISSN: 2395-8030
- Perdomo, C., Casanova, O. y Ciganda, V. (1998). *4º Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea. Relevamiento de Contaminación de aguas con NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en distintas zonas del Uruguay*. 2, 962 p.
- Perdomo, C. y Dodera, R. (1992). *Principales procesos de pérdida de nitrógeno*. Cátedra de fertilidad de suelos y fertilizantes.

- Pire, R. y Pereira, A. (2003). Propiedades físicas de componentes de sustratos de uso común en la horticultura del estado Lara. Propuesta metodológica. *Bioagro*, 15(1), 55-63 p. ISSN: 1316-3361
- Porch, T. G., Beaver, J. S., Debouck, D. G., Jackson, S. A., Kelly, J. D. y Dempewolf, H. (2013). Use of Wild Relatives and Closely Related Species to Adapt Common Bean to climate Change. *Agronomy* 2013, 3(2), 433-461 p. <https://doi.org/10.3390/agronomy3020433>
- Programa de Leguminosas y granos – UNALM (2003). *Serie de difusión de Leguminosas de granos*. Lima – Perú.
- Puente, M. (2020). *Comportamiento de líneas de frijol voluble (Phaseolus vulgaris L.) en costa central*. Tesis para optar el título de Ing. Agrónomo. UNALM.
- Racca, R. (1986). Efectos de diferentes períodos de penuria hídrica sobre: Crecimiento, desarrollo y productividad en soja. *Revista de la Asociación Argentina de Soja VII*, 6-11 p.
- Racca, R., Collino, D., Dardanelli, J., Basigalup, D., González, N., Brenzoni, E., Hein, N. y Balzarini, M. (2001). *Contribución de la fijación biológica de nitrógeno a la nutrición nitrogenada de la alfalfa en la región pampeana*. Ediciones INTA. Buenos Aires. Argentina. 56 p.
- Reinprecht, Y., Schram, L., Marsolais, F., Smith, T. H., Hill, B. y Pauls, K. (2020). Effects of Nitrogen Application on Nitrogen Fixation in Common Bean Production. *Front Plant Sci.* 11, 1172 p. doi: 10.3389/fpls.2020.01172. PMID: 32849727; PMCID: PMC7424037.
- Reyes, C. y Paredes, O. (1993). Hardto-cook phenomenon in common beans- a review. *Critical reviews in Food Science and nutrition*, 33(3), 227-286 p. <https://doi.org/10.1080/10408399309527621>
- Rincón, A. y Caicedo, S. (2010). *Establecimiento de pastos en sistema ganaderos de los llanos colombianos*. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.12324/35794>.
- Rutland, W. (1991). Storage and handling characteristics of urea-based NPK fertilizers. En: *Urea-based NIK plant design and operating alternatives*. Workshop Proceedings.

SP- 15, International Fertilizer Development Center. P.O Box 2040. Muscle Shoals, AL, U.S.A.

Scherer, H. y Danzeisen, L. (1980). Der Einfluß gesteigerter Stickstoffgaben auf die Entwicklung der Wurzelknöllchen, auf die symbiontische Stickstoffassimilation sowie auf das Wachstum und den Ertrag von Ackerbohnen (*Vicia faba* L.). *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 143, 464-470 p. DOI:10.1002/JPLN.19801430413

Silva, B. (2002). *Apuntes de cátedra de fertilidad y fertilizantes*. Universidad Mayor Santiago, Chile.

Silva, N. (1997). *Caracterización y comportamiento de cepas de Bradyrhizobium japonicum aisladas de suelos y plantas de soja (Glycine max L.) en la región noroeste de la provincia de Buenos Aires*. Tesis para optar por el grado de magister en ciencias agrarias. Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca, BA. Argentina. 117 p.

Singh, S., Gutiérrez, J., Molina, A., Urea, C. y Gepts, P. (1991). Genetic diversity in cultivated common beans: II. Marker-based analysis of morphological and agronomic traits. *Crop Sci*, 31, 23-29 p. <https://doi.org/10.2135/cropsci1991.0011183X003100010005x>

Slattery, J., Coventry, D. y Slattery, W. (2001). Rhizobial ecology as affected by the soil environment. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 41, 289-298 p. <https://doi.org/10.1071/EA99159>

Sociedad Nacional de Industrias. (2012). *Valor nutricional del frijol canario*.

Sousa, M., Oliveira, M., Asobia, P., Flores, R. y Ferreira, E. (2022). Respuesta agroeconómica del frijol común inoculado en función de la aplicación de nitrógeno a lo largo del ciclo de crecimiento. *Semina: Ciencias Agrícolas*, 43 (6), 2531–2546 p. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2022v43n6p2531>

Sprent, J. (1989). Which steps are essential for the formation of functional legume nodules? *The New phytologist*, 111(2), 129–153 p. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1989.tb00675.x>

- Stevenson, F. J. (1982). *Organic forms of soil nitrogen*. En Stevenson, F. J. (Ed.), *Nitrogen in Agricultural soils*. American Society of Agronomy. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr22.c3>
- SUNAT. (2023). *Estadísticas de comercio exterior*. Superintendencia nacional de aduanas y de administración tributaria.
- Swift, R., y Posner, A. (1972). The Distribution and Extraction of soil nitrogen as a function of soil particle size. *Soil Biology Biochemistry* 4(2), 181-186 p. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(72\)90009-0](https://doi.org/10.1016/0038-0717(72)90009-0)
- Tisdale, S., Nelson, W. y Beaton, J. (1985). *Soil fertility and fertilizers* (4.<sup>a</sup> ed.). Macmillan.
- TRADEMAP. (2023). *Estadística del comercio para el desarrollo internacional de las empresas*. <https://www.trademap.org/>
- Tray, J. (2015). *Sistemas de producción recomendados para Canola, Lupino, y Arveja*. <http://www2.inia.cl/medios/biblioteca/boletines/NR36488.pdf>
- Valladolid, A. (1993). *El Cultivo del frijol (Phaseolus vulgaris L.) en la costa del Perú*. Colección INIA.
- Vásquez, J.; Vilca, N. & Malqui, R. (2023). *Manual de manejo agronómico de frijol en regiones andinas*. INIA. ISBN: 978-9972-44-120-2
- Vilcapoma, G., & Flores, M. (2003). *Manual de Botánica Sistemática de la UNALM*.
- Vincent, J. (1965). Factores ambientales en la fijación del nitrógeno por la legumbre. *Nitrógeno del suelo*, 10, 384-435 p.
- Vilchez, A. (2015). *Rendimiento de frijol (Phaseolus vulgaris L.) var. molinero plv 1-3 con fertilización fosfo-potásica y cepas de Rhizobium sp. en La Molina*. Tesis para optar el título de Ing. Agrónomo. UNALM.
- Villanueva, L. (2009). *Efecto de dos cepas de Rhizobium y abono orgánico en el rendimiento de frijol (Phaseolus vulgaris L.) var. canario molinero PLVI/1-3 en condiciones de la molina*. Tesis para optar el título de Ing. Agrónomo. UNALM.
- Vlassak, K. M., Vanderleyden, J. y Graham, P. H. (1997). Factors influencing nodule occupancy by inoculant rhizobia. *Plant Sci.* 16: 163-229 p. <https://doi.org/10.1080/07352689709701948>

Zhang, Rui, Cong Wang, Wenzhi Teng, Jing Wang, Xiaochen Lyu, Shoukun Dong, Shuang Kang, Zhenping Gong, y Chunmei Ma. (2020). *Accumulation and Distribution of Fertilizer Nitrogen and Nodule-Fixed Nitrogen in Soybeans with Dual Root Systems*. <https://doi.org/10.3390/agronomy10030397>

## VIII. ANEXOS

### Anexo 1: Informe del análisis foliar de nitrógeno

	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA</b> FACULTAD DE AGRONOMIA LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES	
<b>INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN FOLIAR</b>		
SOLICITANTE :	JEFFERSON VILCHEZ OLIVARES	
PROCEDENCIA :	LIMA/ LIMA/ LA MOLINA	
MUESTRA :	HOJAS DE FRIJOL	
REFERENCIA :	H.R. 77637	
BOLETA :	5332	
FECHA :	20/09/2022	
N. Lab.	CLAVE DE CAMPO	N %
2117	CONTROL	4.06
2118	11X	2.91
2119	12X	3.30
2120	13X	4.09
2121	21X	3.11
2122	22X	3.78
2123	23X	4.28
2124	31X	3.39
2125	32X	3.39
2126	33X	4.00
2127	41X	3.98
2128	42X	3.95
2129	43X	3.67

  
**Dr. Constantino Calderón Mendoza**  
Jefe de Laboratorio

---

Av. La Molina s/n Campus UNALM  
Telf.: 614-7800 Anexo 222 Teléfono Directo: 349-5622  
Celular: 946 - 505 - 254  
e-mail: labsuelc@lamolina.edu.pe

**Anexo 2: Prueba de pH y conductividad de los fertilizantes diluidos en una solución de 400 ml de agua**

FERTILIZANTES	pH			C.E. ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )		
	20 N	40 N	80 N	20 N	40 N	80 N
<b>Agua de sedapal</b>		6.52			528	
<b>Urea</b>	6.36	6.43	6.53	524	550	530
<b>Nitrato</b>	6.22	6.12	6.08	1150	1636	2786
<b>Sulfato</b>	6.13	5.86	5.68	1750	2820	4172
<b>fosfato</b>	6.51	6.55	6.56	1136	1952	3492

**Anexo 3: Fotografías de la instalación del proyecto en el invernadero de fitotecnia**



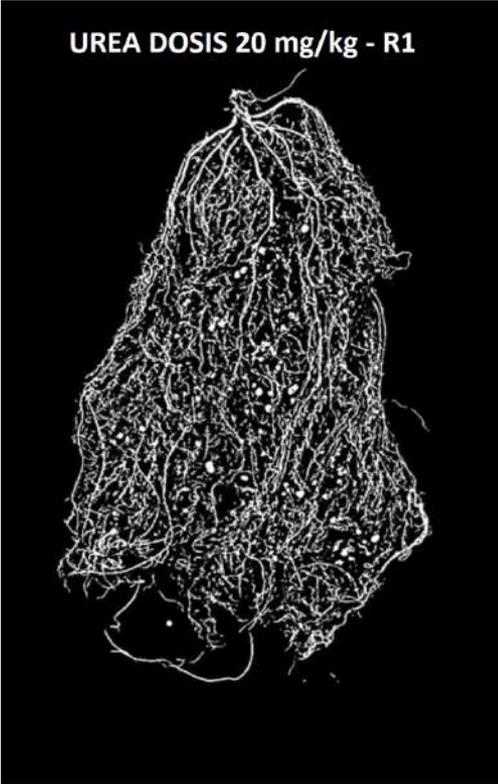
#### Anexo 4: Fotografías de las labores de fertilización



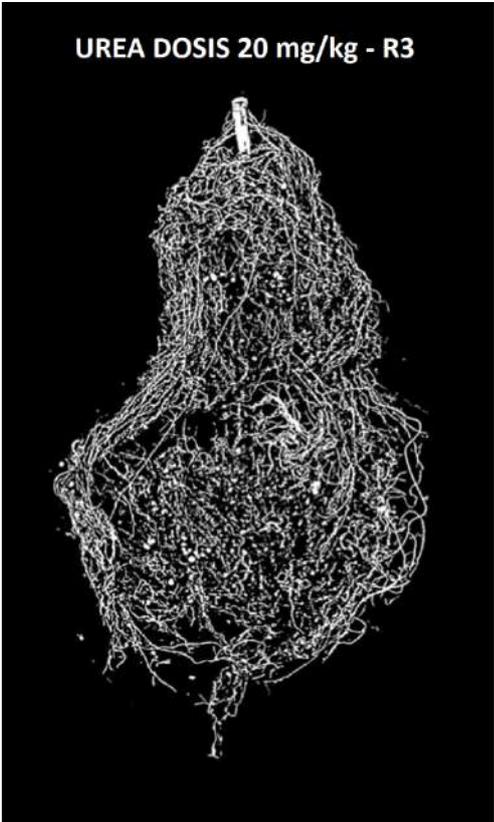
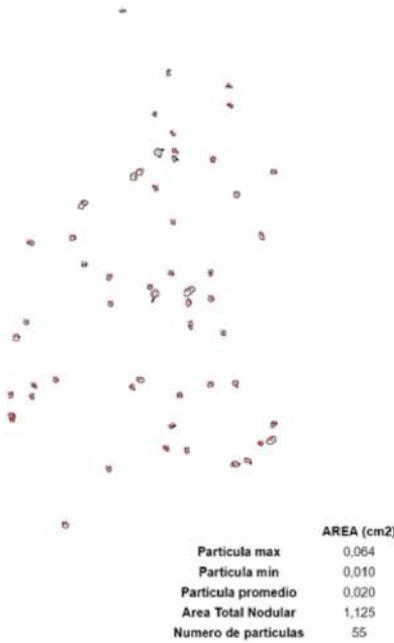
**Anexo 5: Fotografía de labores fitosanitarias**



**Anexo 6: Análisis de las variables de nodulación con el programa Image J**



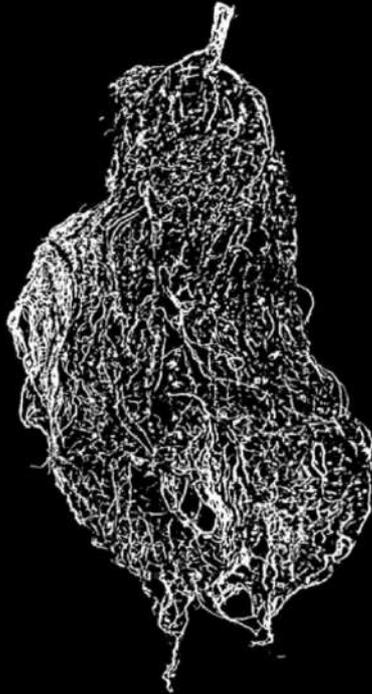
**NUMERO DE NÓDULOS**



**NUMERO DE NÓDULOS**



**UREA DOSIS 20 mg/kg - R5**



**NUMERO DE NÓDULOS**

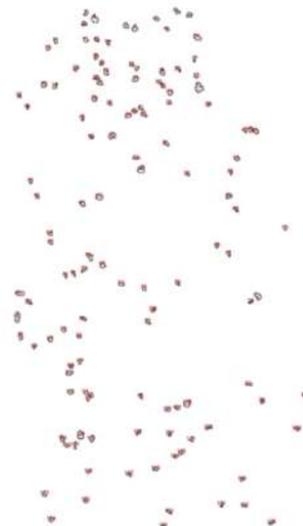


	AREA (cm2)
Particula max	0,028
Particula min	0,010
Particula promedio	0,016
Area Total Nodular	0,516
Numero de particulas	32

**UREA DOSIS 40 mg/kg - R3**

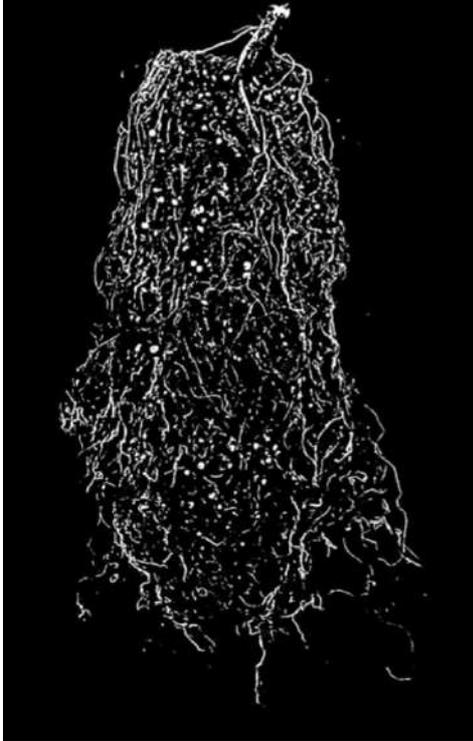


**NUMERO DE NÓDULOS**

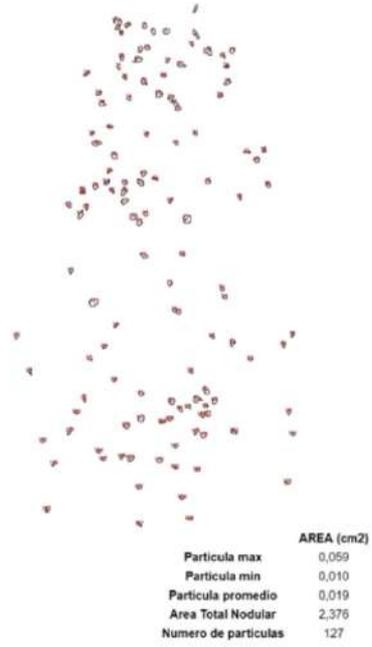


	AREA (cm2)
Particula max	0,061
Particula min	0,010
Particula promedio	0,017
Area Total Nodular	2,143
Numero de particulas	126

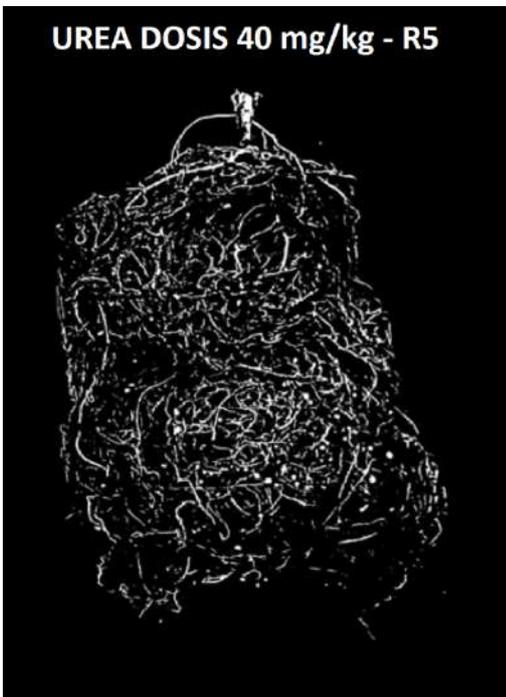
### UREA DOSIS 40 mg/kg - R4



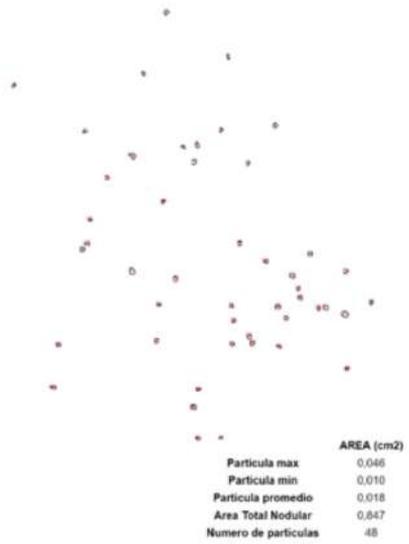
### NUMERO DE NÓDULOS



### UREA DOSIS 40 mg/kg - R5



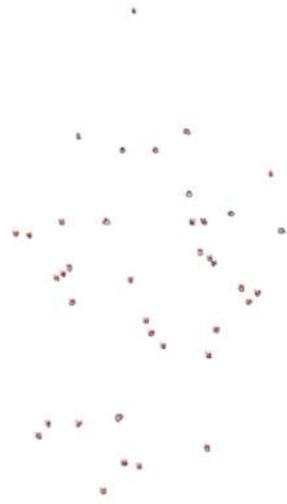
### NUMERO DE NÓDULOS



**UREA DOSIS 80 mg/kg - R2**



**NUMERO DE NÓDULOS**



	AREA (cm2)
Particula max	0,038
Particula min	0,010
Particula promedio	0,016
Area Total Nodular	0,624
Numero de particulas	39

**UREA DOSIS 80 mg/kg - R3**



**NUMERO DE NÓDULOS**

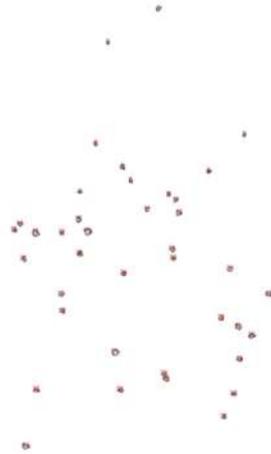


	AREA (cm2)
Particula max	0,042
Particula min	0,010
Particula promedio	0,017
Area Total Nodular	0,563
Numero de particulas	34

**UREA DOSIS 80 mg/kg - R5**



**NUMERO DE NÓDULOS**



	AREA (cm2)
Particula max	0,040
Particula min	0,010
Particula promedio	0,017
Area Total Nodular	0,682
Numero de particulas	39

**NITRATO DE AMONIO  
DOSIS 20 mg/kg - R2**

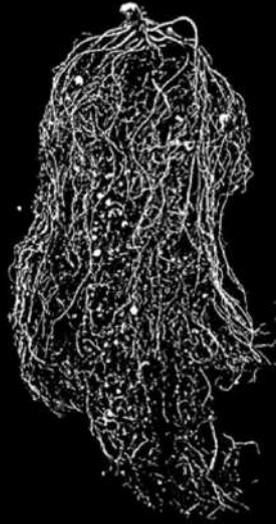


**NUMEROS DE NÓDULOS**



	AREA (cm2)
Particula max	0,074
Particula min	0,010
Particula promedio	0,018
Area Total Nodular	0,739
Numero de particulas	42

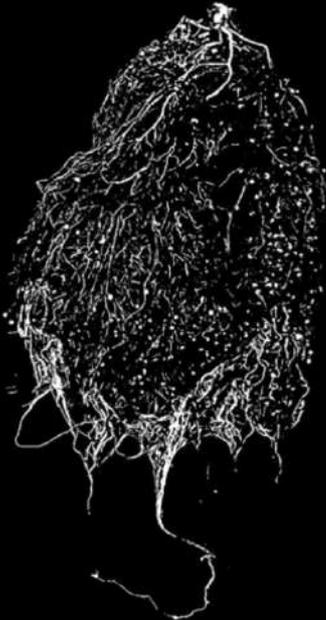
**NITRATO DE AMONIO  
DOSIS 20 mg/kg - R3**



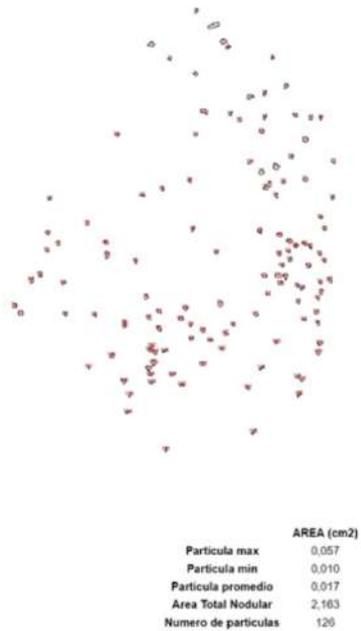
**NUMEROS DE NÓDULOS**



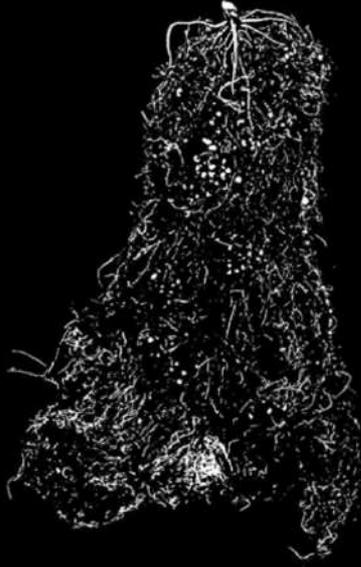
**NITRATO DE AMONIO  
DOSIS 20 mg/kg - R4**



**NUMEROS DE NÓDULOS**



**NITRATO DE AMONIO  
DOSIS 40 mg/kg - R4**

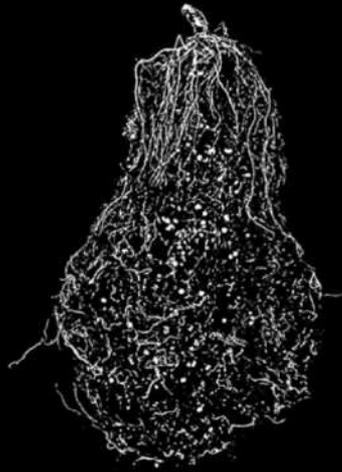


**NUMERO DE NÓDULOS**



	AREA (cm2)
Particula max	0,067
Particula min	0,010
Particula promedio	0,019
Area Total Nodular	1,963
Numero de particulas	101

**NITRATO DE AMONIO  
DOSIS 40 mg/kg - R5**

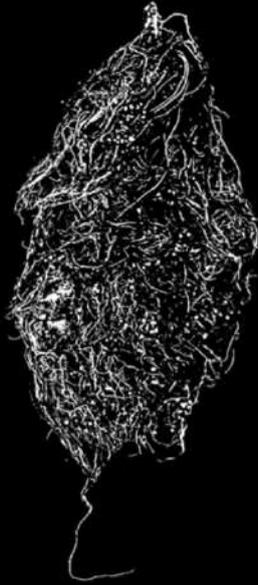


**NUMERO DE NÓDULOS**



	AREA (cm2)
Particula max	0,070
Particula min	0,010
Particula promedio	0,021
Area Total Nodular	1,968
Numero de particulas	95

**NITRATO DE AMONIO  
DOSIS 40 mg/kg - R6**

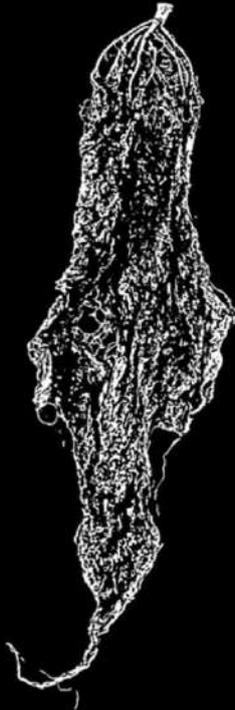


**NUMERO DE NÓDULOS**



	AREA (cm2)
Particula max	0,002
Particula min	0,010
Particula promedio	0,020
Area Total Nodular	1,418
Numero de particulas	72

**NITRATO DE AMONIO  
DOSIS 80 mg/kg - R3**



**NUMERO DE NÓDULOS**



	AREA (cm2)
Particula max	0,045
Particula min	0,011
Particula promedio	0,017
Area Total Nodular	0,269
Numero de particulas	16

NITRATO DE AMONIO  
DOSIS 80 mg/kg - R4

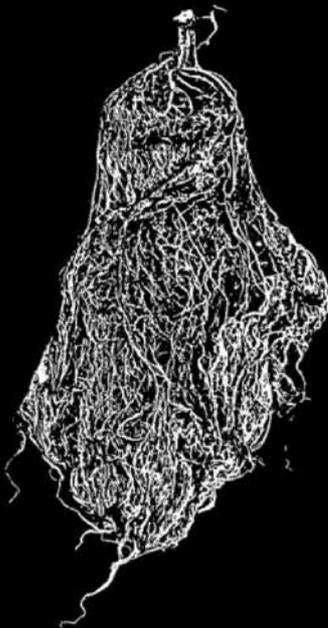


NUMERO DE NÓDULOS



	AREA (cm2)
Particula max	0,026
Particula min	0,011
Particula promedio	0,016
Area Total Nodular	0,282
Numero de particulas	18

NITRATO DE AMONIO  
DOSIS 80 mg/kg - R5



NUMERO DE NÓDULOS



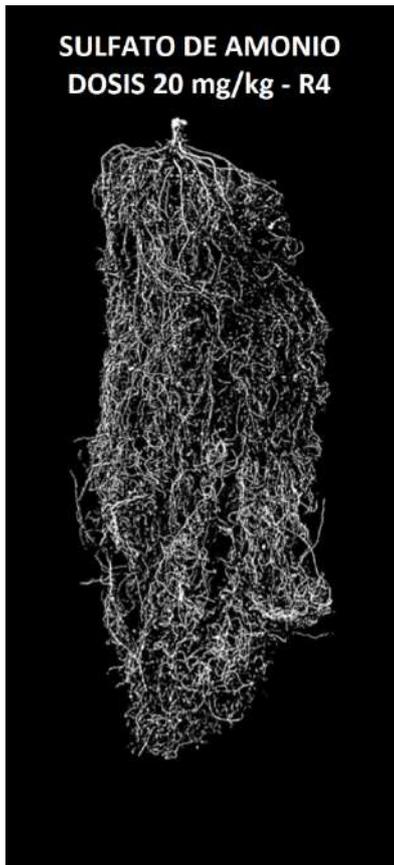
	AREA (cm2)
Particula max	0,049
Particula min	0,016
Particula promedio	0,033
Area Total Nodular	0,065
Numero de particulas	2



**NUMERO DE NÓDULOS**



	AREA (cm <sup>2</sup> )
Particula max	0.013
Particula min	0.010
Particula promedio	0.011
Area Total Nodular	0.123
Numero de particulas	11

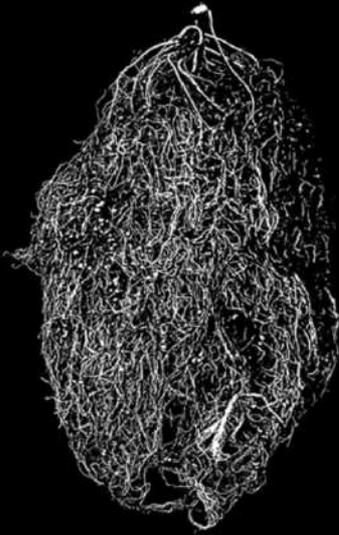


**NUMERO DE NÓDULOS**



	AREA (cm <sup>2</sup> )
Particula max	0.023
Particula min	0.010
Particula promedio	0.013
Area Total Nodular	0.168
Numero de particulas	13

**SULFATO DE AMONIO  
DOSIS 20 mg/kg - R6**

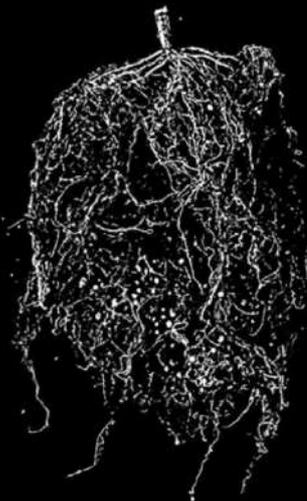


**NUMERO DE NÓDULOS**



	AREA (cm2)
Particula max	0,030
Particula min	0,010
Particula promedio	0,016
Area Total Nodular	0,419
Numero de particulas	27

**SULFATO DE AMONIO  
DOSIS 40 mg/kg - R3**



**NUMEROS DE NÓDULOS**



	AREA (cm2)
Particula max	0,049
Particula min	0,010
Particula promedio	0,018
Area Total Nodular	1,100
Numero de particulas	62

**SULFATO DE AMONIO  
DOSIS 40 mg/kg - R5**

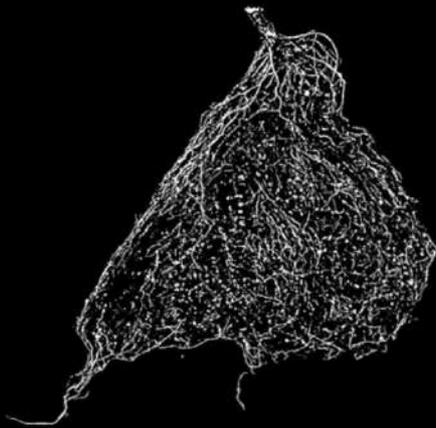


**NUMEROS DE NÓDULOS**



	AREA (cm2)
Particula max	0,047
Particula min	0,010
Particula promedio	0,019
Area Total Nodular	2,336
Numero de particulas	122

**SULFATO DE AMONIO  
DOSIS 40 mg/kg - R6**



**NUMERO DE NÓDULOS**



	AREA (cm2)
Particula max	0,068
Particula min	0,010
Particula promedio	0,018
Area Total Nodular	0,862
Numero de particulas	47

**SULFATO DE AMONIO  
DOSIS 80 mg/kg - R2**



**NUMERO DE NODULOS**



**SULFATO DE AMONIO  
DOSIS 80 mg/kg - R4**



**NUMEROS DE NÓDULOS**



**SULFATO DE AMONIO  
DOSIS 80 mg/kg - R5**



**NUMEROS DE NÓDULOS**



	AREA (cm2)
Particula max	0,023
Particula min	0,010
Particula promedio	0,016
Area Total Nodular	0,079
Numero de particulas	5

**FOSFATO DIAMÓNICO  
DOSIS 20 mg/kg - R3**



**NUMERO DE NÓDULOS**



	AREA (cm2)
Particula max	0,061
Particula min	0,010
Particula promedio	0,019
Area Total Nodular	2,055
Numero de particulas	109

**FOSFATO DIAMÓNICO**  
**DOSIS 20 mg/kg - R5**



**NUMERO DE NÓDULOS**



	AREA (cm2)
Particula max	0,021
Particula min	0,010
Particula promedio	0,012
Area Total Nodular	0,412
Numero de particulas	33

**FOSFATO DIAMÓNICO**  
**DOSIS 20 mg/kg - R6**



**NUMEROS DE NÓDULOS**

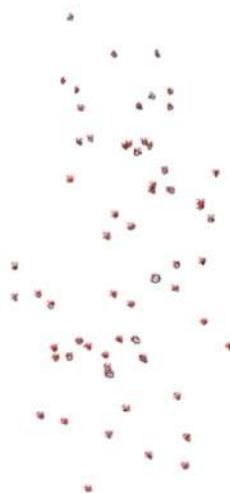


	AREA (cm2)
Particula max	0,033
Particula min	0,010
Particula promedio	0,016
Area Total Nodular	0,698
Numero de particulas	44

**FOSFATO DIAMÓNICO  
DOSIS 40 mg/kg - R3**



**NUMERO DE NÓDULOS**

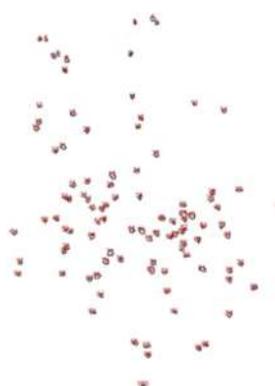


	AREA (cm2)
Particula max	0,072
Particula min	0,011
Particula promedio	0,018
Area Total Nodular	1,113
Numero de particulas	61

**FOSFATO DIAMÓNICO  
DOSIS 40 mg/kg - R5**



**NUMERO DE NÓDULOS**

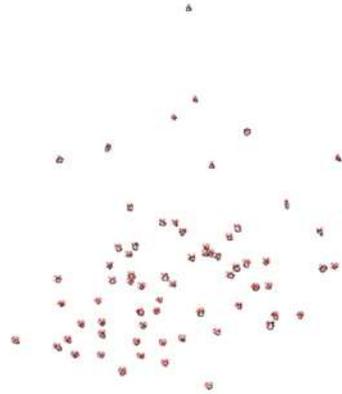


	AREA (cm2)
Particula max	0,063
Particula min	0,011
Particula promedio	0,020
Area Total Nodular	2,028
Numero de particulas	100

FOSFATO DIAMÓNICO  
DOSIS 40 mg/kg - R6

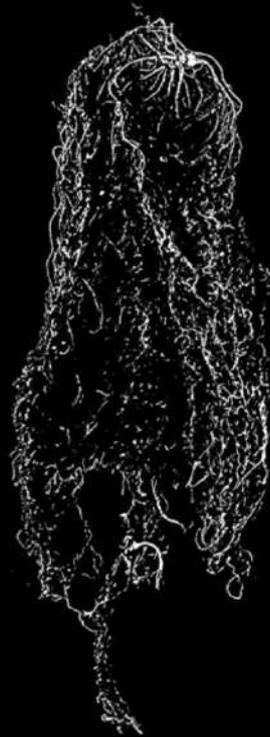


NUMERO DE NÓDULOS



	AREA (cm2)
Particula max	0,045
Particula min	0,011
Particula promedio	0,021
Area Total Nodular	1,406
Numero de particulas	67

FOSFATO DIAMÓNICO  
DOSIS 80 mg/kg - R1



NUMERO DE NÓDULOS

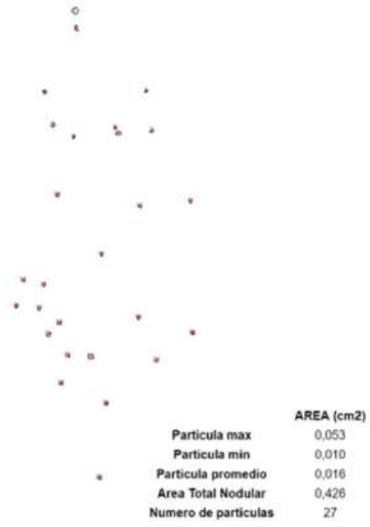


	AREA (cm2)
Particula max	0,028
Particula min	0,011
Particula promedio	0,020
Area Total Nodular	0,039
Numero de particulas	2

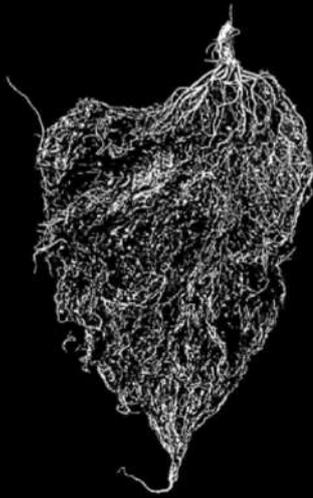
**FOSFATO DIAMÓNICO  
DOSIS 80 mg/kg - R3**



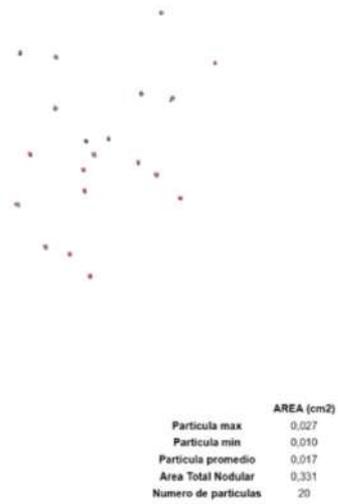
**NUMERO DE NÓDULOS**



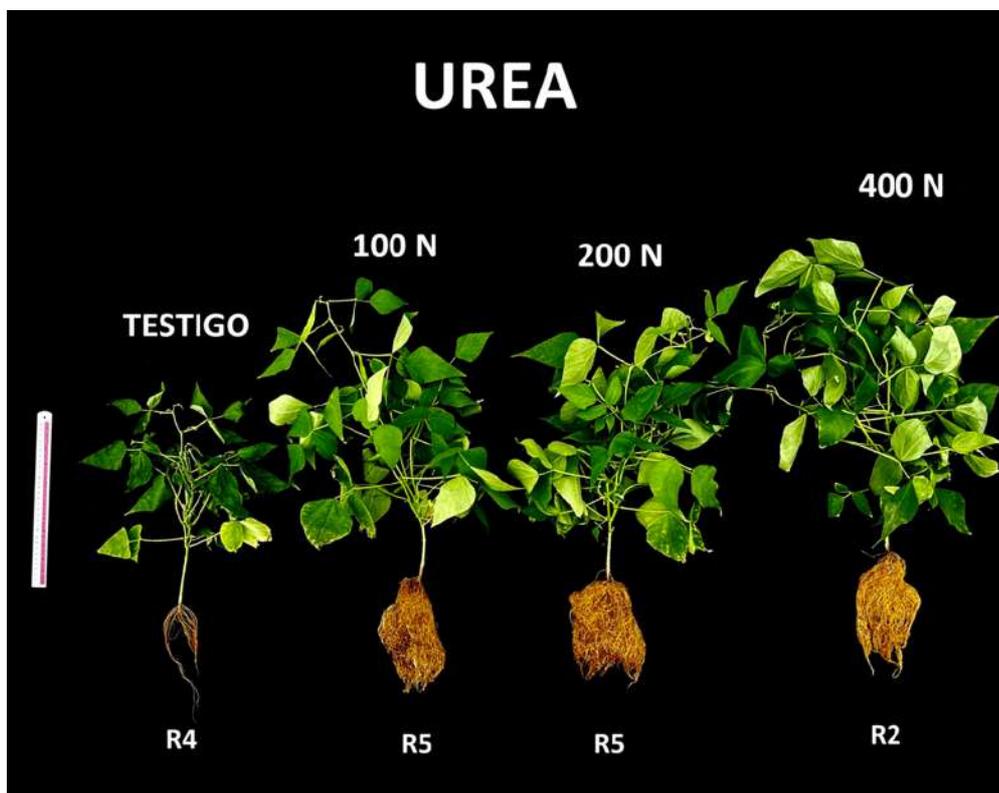
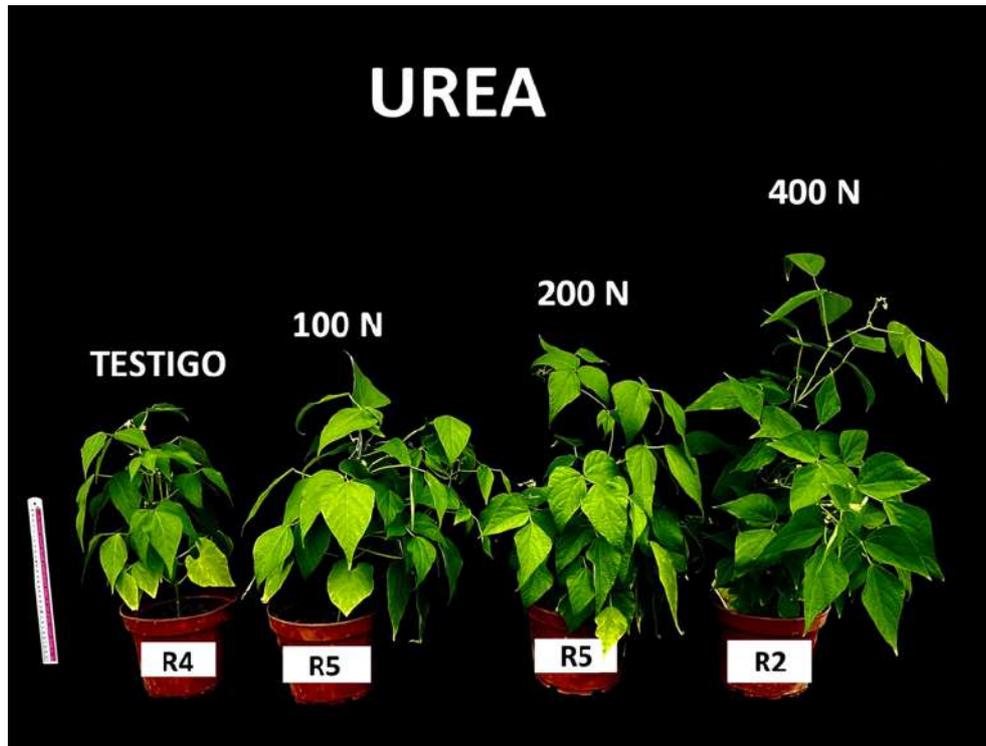
**FOSFATO DIAMÓNICO  
DOSIS 80 mg/kg - R5**



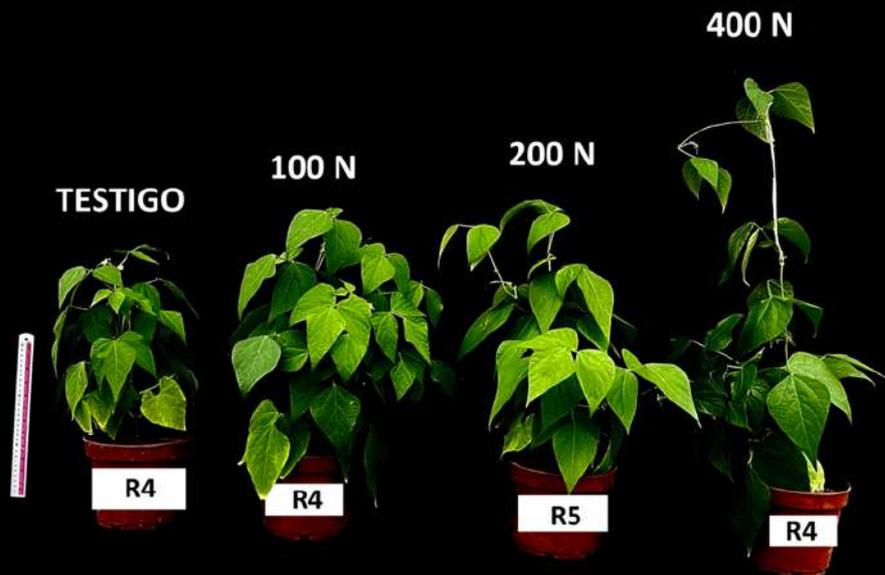
**NUMERO DE NÓDULOS**



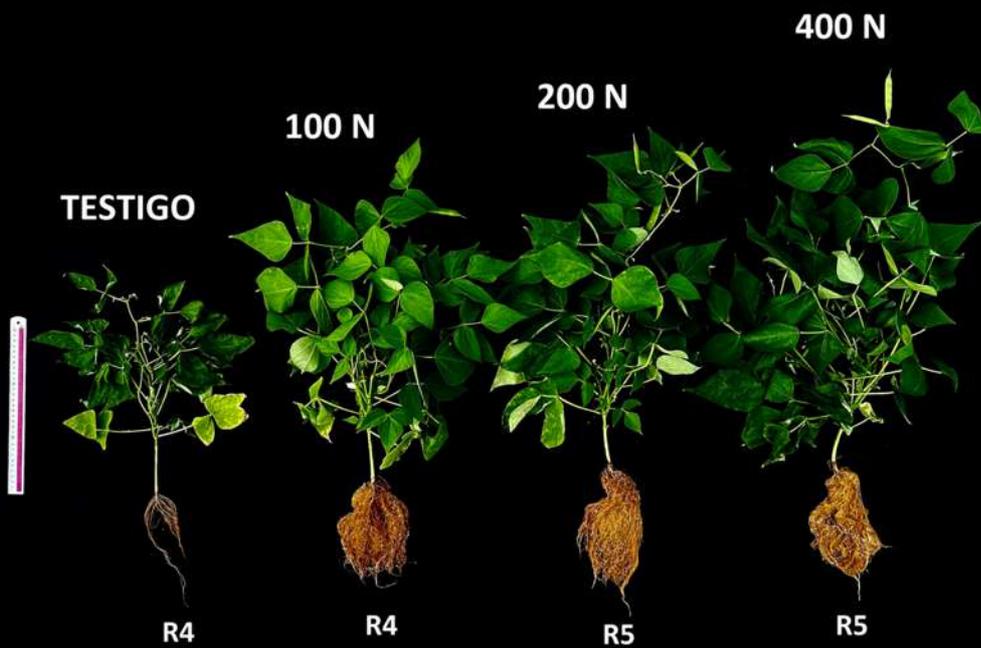
**Anexo 7: Fotografías de la estructura foliar y radicular del frijol Canario Centenario de acuerdo a la dosis total de nitrógeno por maceta**



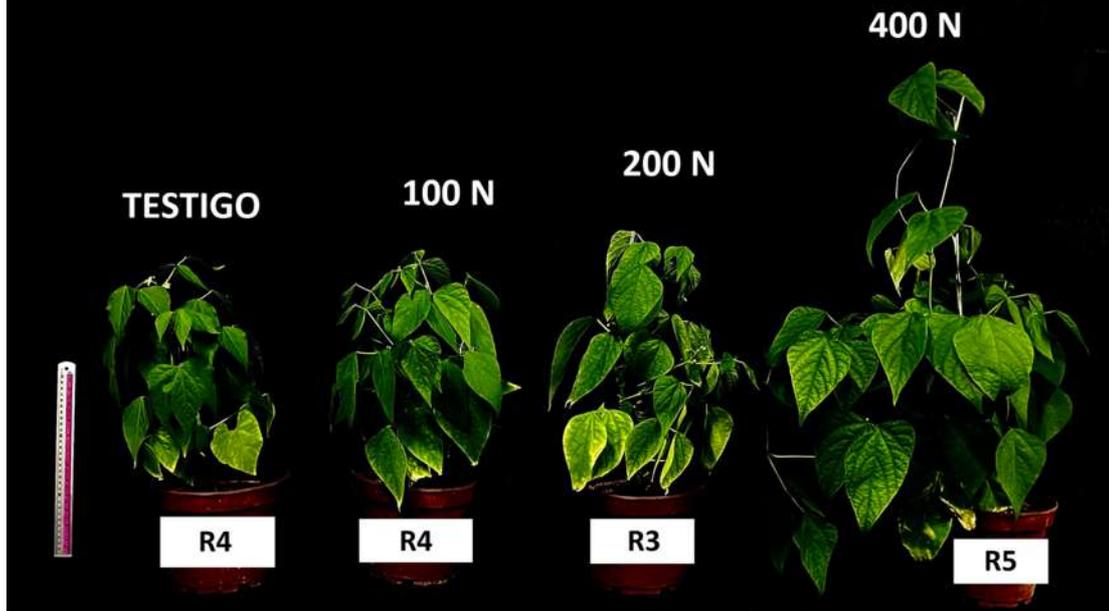
# NITRATO DE AMONIO



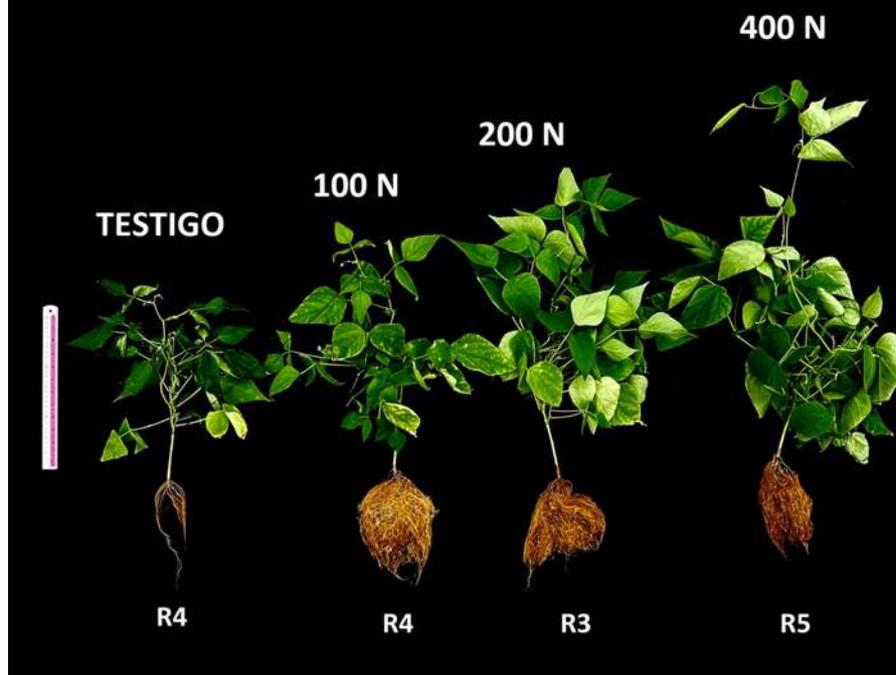
# NITRATO DE AMONIO



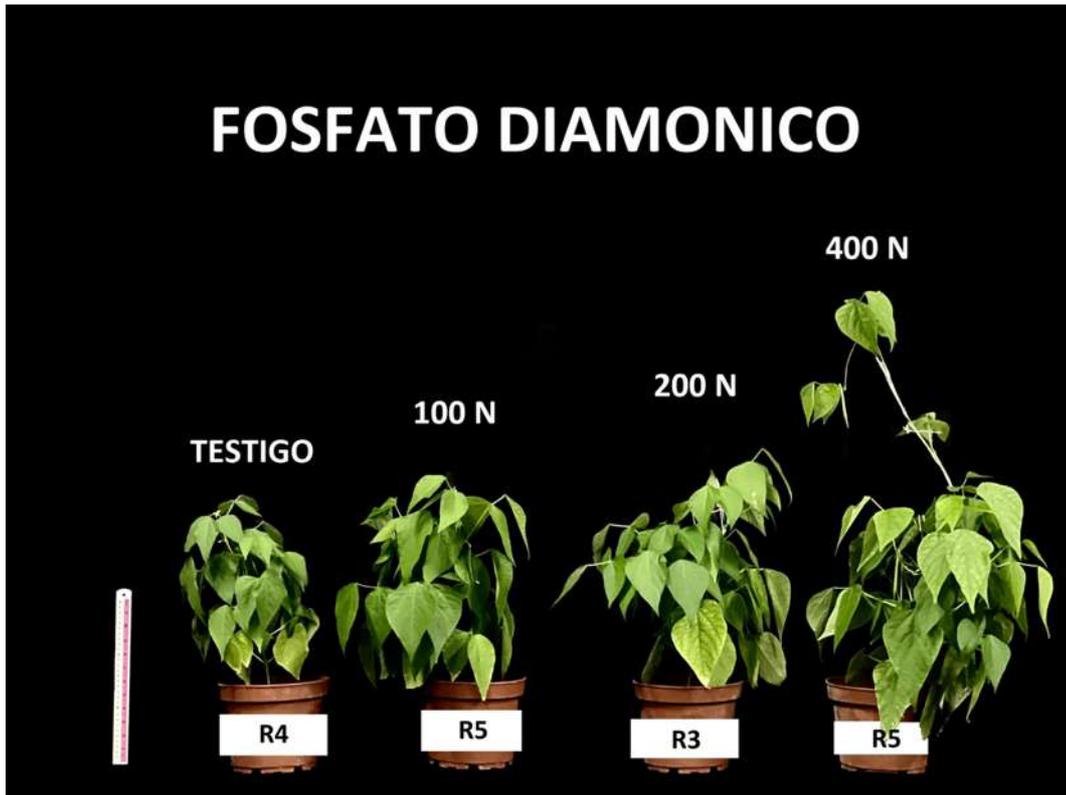
# SULFATO DE AMONIO



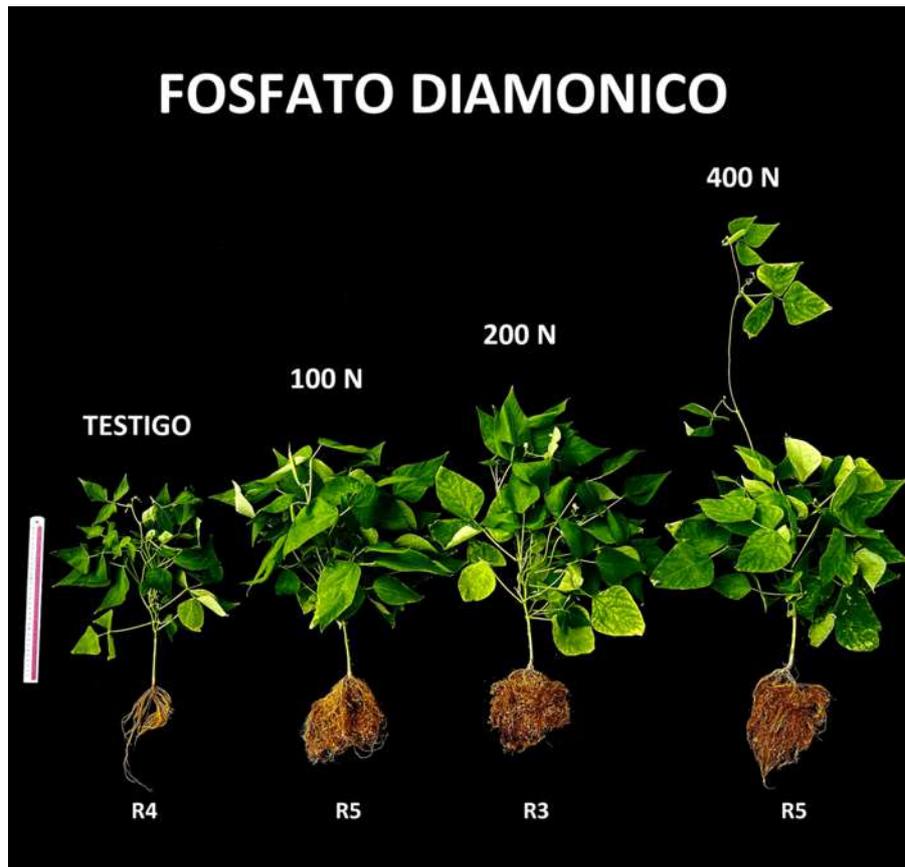
# SULFATO DE AMONIO



# FOSFATO DIAMONICO



# FOSFATO DIAMONICO



## Anexo 8: Fotografías de la evaluación en la cosecha



