

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA



TESIS

**“EFECTO DE LA FERTILIZACIÓN BIOLÓGICA MIXTA EN EL
RENDIMIENTO DE FORRAJE DEL CULTIVO DE ALFALFA
(*Medicago sativa* L.) EN EL VALLE CAJAMARCA, 2025”**

Para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO AGRÓNOMO

Presentado por la Bachiller:

ROSA MANUELA VARGAS PRADO

Asesor:

DR. EDIN EDGARDO ALVA PLASENCIA

CAJAMARCA – PERÚ


-2026-

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

1. **Investigador:** Rosa Manuela Vargas Prado
2. **DNI:** 45949255
Escuela Profesional/Unidad UNC: Agronomía
3. **Asesor:**
Dr. Edin Edgardo Alva Plasencia
4. **Facultad/Unidad UNC:** Ciencias Agrarias
5. **Grado académico o título profesional:**
 Bachiller Título profesional Segunda especialidad
 Maestro Doctor
6. **Tipo de Investigación:**
 Tesis Trabajo de investigación Trabajo de suficiencia profesional
 Trabajo académico

Título de Trabajo de Investigación: "EFECTO DE LA FERTILIZACIÓN BIOLÓGICA MIXTA EN EL RENDIMIENTO DE FORRAJE DEL CULTIVO DE ALFALFA (*Medicago sativa* L.) EN EL VALLE CAJAMARCA, 2025"
7. **Fecha de evaluación:** 27/03/2026
8. **Software antiplagio:** TURNITIN URKUND (OURIGINAL) (*)
9. **Porcentaje de Informe de Similitud:** 19%
10. **Código Documento:** oid: 3117:572264361
11. **Resultado de la Evaluación de Similitud:** 19%
 APROBADO PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O
DESAPROBADO

Fecha Emisión: 31/03/2026

<i>Firma y/o Sello Emisor Constancia</i>
 <hr/> Dr. Edin Edgardo Alva Plasencia DNI: 26620894



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
"NORTE DE LA UNIVERSIDAD PERUANA"
Fundada por Ley N° 14015, del 13 de febrero de 1962
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
Secretaría Académica



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En la ciudad de Cajamarca, a los trece días del mes de marzo del año dos mil veintiséis, se reunieron en el ambiente 2C - 202 de la Facultad de Ciencias Agrarias, los miembros del Jurado, designados según **Resolución de Consejo de Facultad N° 235-2026-FCA-UNC, de fecha 09 de marzo 2026**, con la finalidad de evaluar la sustentación de la **TESIS** titulada: **"EFECTO DE LA FERTILIZACIÓN BIOLÓGICA MIXTA EN EL RENDIMIENTO DE FORRAJE DEL CULTIVO DE ALFALFA (*Medicago sativa* L.) EN EL VALLE CAJAMARCA, 2025"**, realizada por la Bachiller **ROSA MANUELA VARGAS PRADO** para optar el Título Profesional de **INGENIERO AGRÓNOMO**.

A las diecisiete horas y treinta minutos, de acuerdo a lo establecido en el **Reglamento Interno para la Obtención de Título Profesional de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cajamarca**, el Presidente del Jurado dio por iniciado el Acto de Sustentación, luego de concluida la exposición, los miembros del Jurado procedieron a la formulación de preguntas y posterior deliberación. Acto seguido, el Presidente del Jurado anunció la aprobación por unanimidad, con el calificativo de diecisiete (17); por tanto, la Bachiller queda expedita para proceder con los trámites que conlleven a la obtención del Título Profesional de **INGENIERO AGRÓNOMO**.

A las dieciocho horas y quince minutos del mismo día, el Presidente del Jurado dio por concluido el Acto de Sustentación.

Dr. Isidro Rimarachín Cabrera
PRESIDENTE

MBA. Ing. Santiago Demetrio Medina Miranda
SECRETARIO

Ing. José Lizandro Silva Mego
VOCAL

Dr. Edin Edgardo Alva Plasencia
ASESOR

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación está dedicado a Dios, quien me brindó la fortaleza y perseverancia necesarias para culminar con esta responsabilidad académica. Reconozco que la sabiduría proviene de Él y que todo esfuerzo dedicado con constancia y fe será siempre recompensado.

Asimismo, dedico este trabajo a mis padres y hermanos, quienes me brindaron su apoyo incondicional en cada etapa de mi formación académica, inculcándome valores fundamentales en mi vida, a Sthefano Gael y Bruno Fabrizio mis hijos amados quienes son la luz de mi vida y me han dado la fortaleza para seguir adelante y desarrollarme profesionalmente.

Rosa Manuela Vargas Prado

AGRADECIMIENTO

Agradezco, en primer lugar, a Dios por brindarme la fortaleza necesaria para superar las adversidades presentadas durante mi formación académica, demostrándome su presencia constante en cada etapa de este proceso.

A mis queridos padres, por darme la vida y el apoyo incondicional en todo momento, motivándome a superarme continuamente y a perseverar con determinación en un entorno académico y profesional cada vez más competitivo.

Un agradecimiento especial al Dr. Edin Edgardo Alva Plasencia, asesor del presente trabajo de investigación, cuyas observaciones rigurosas y comentarios constructivos fueron fundamentales para la culminación exitosa de esta tesis. Sus enseñanzas constituyen pilares esenciales en mi formación profesional. Expreso mi profunda gratitud por el apoyo constante y la orientación académica brindada durante todo el proceso investigativo.

Rosa Manuela Vargas Prado

RESUMEN

Con el objetivo de determinar el efecto de la fertilización biológica mixta en el rendimiento de forraje del cultivo de alfalfa (*Medicago sativa* L.) en el Valle de Cajamarca, 2025. Se empleó un Diseño de Bloques Completamente al Azar (DBCA) con siete tratamientos: T1 (*Rhizobium*), T2 (*Azotobacter*), T3 (*Azospirillum*), T4 (*Rhizobium* + *Azotobacter*), T5 (*Rhizobium* + *Azospirillum*), T6 (*Rhizobium* + *Azotobacter* + *Azospirillum*) y un testigo sin aplicación, distribuidos en tres bloques de 140 m², subdivididos en siete unidades experimentales de 20 m². El análisis de varianza evidenció efectos altamente significativos en todos los parámetros evaluados; en rendimiento de materia verde ($p < 0.0001$; CV=7.83%) destacaron T3 (2.7 kg) y T2 (2.63 kg), sin diferencias entre ambos y superando al testigo (1.6 kg), mientras que T1 (2.26 kg) y T5 (2.23 kg) presentaron valores intermedios y T6 (1.63 kg) fue similar al testigo; en porcentaje de materia seca ($p < 0.0001$; CV=6.30%) lideraron T3 (30.3%) y T2 (29.5%) frente al testigo (19.17%); en altura de planta ($p = 0.0006$; CV=5.67%) T3 alcanzó 94.87 cm frente a 69.4 cm del testigo; y en número de tallos maduros ($p < 0.0001$; CV=9.79%) T3 (51) y T2 (41) superaron ampliamente al testigo (16), confirmando la superioridad de las aplicaciones individuales, especialmente *Azospirillum* y *Azotobacter*, sobre las combinaciones bacterianas.

Palabras clave: Fertilización biológica mixta, rendimiento de forraje, alfalfa.

ABSTRACT

To determine the effect of mixed biological fertilization on forage yield in alfalfa (*Medicago sativa* L.) crops in the Cajamarca Valley in 2025, a completely randomized block design (CRBD) was used with seven treatments: T1 (*Rhizobium*), T2 (*Azotobacter*), T3 (*Azospirillum*), T4 (*Rhizobium* + *Azotobacter*), T5 (*Rhizobium* + *Azospirillum*), T6 (*Rhizobium* + *Azotobacter* + *Azospirillum*), and a control without application, distributed across three 140 m² blocks, subdivided into seven 20 m² experimental units. Analysis of variance revealed highly significant effects for all evaluated parameters; for fresh matter yield ($p < 0.0001$; CV=7.83%), T3 (2.7 kg) and T2 (2.63 kg) stood out, with no differences between them and exceeding the control (1.6 kg), while T1 (2.26 kg) and T5 (2.23 kg) showed intermediate values and T6 (1.63 kg) was similar to the control; for dry matter percentage ($p < 0.0001$; CV=6.30%), T3 (30.3%) and T2 (29.5%) led compared to the control (19.17%); in plant height ($p = 0.0006$; CV=5.67%), T3 reached 94.87 cm compared to 69.4 cm for the control; and in number of mature stems ($p < 0.0001$; CV=9.79%), T3 (51) and T2 (41) far exceeded the control (16), confirming the superiority of individual applications, especially *Azospirillum* and *Azotobacter*, over bacterial combinations.

Keywords: Mixed biological fertilization, forage yield, alfalfa.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	iv
ABSTRACT.....	v
ÍNDICE GENERAL	vi
LISTA DE TABLAS	viii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
CAPÍTULO I	10
INTRODUCCIÓN	10
1.1. Problema de investigación	11
1.1.1. <i>Formulación del problema</i>	12
1.2. Justificación	12
1.3. Objetivos.....	14
1.3.1. <i>Objetivo General</i>	14
1.3.2. <i>Objetivos específicos</i>	14
1.4. Hipótesis	15
CAPÍTULO II.....	16
REVISIÓN DE LITERATURA	16
2.1. Antecedentes	16
2.2. Bases teóricas.....	18
2.2.1. <i>Teorías de la fertilización biológica</i>	18
2.2.2. <i>Caracterización del Cultivo de Alfalfa</i>	22
2.2.3. <i>Fertilización Biológica</i>	25
2.2.4. <i>Efectos de la Fertilización Biológica Mixta</i>	29
2.2.5. <i>Indicadores fisiológicos</i>	31
2.3. Definición de términos.....	35
CAPÍTULO III.....	37
MATERIALES Y MÉTODOS	37
3.1. Ubicación geográfica	37
3.2. Materiales.....	39
3.2.1. <i>Material vegetal</i>	39
3.2.2. <i>Material biológico</i>	39
3.2.3. <i>Insumos</i>	39

3.2.4. Equipos	39
3.2.5. Herramientas	39
3.3. Metodología	40
3.3.1. Variables	40
3.3.2. Diseño experimental y arreglo de los tratamientos	40
3.3.3. Procedimientos	42
3.3.4. Evaluaciones	44
CAPÍTULO IV.....	46
4.1. Rendimiento de forraje verde (t ha ⁻¹).....	46
4.2. Porcentaje de materia seca (%)	49
4.3. Altura de mata.....	52
4.4. Número de tallos maduros por mata	56
CAPÍTULO V	60
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	60
5.1. Conclusiones	60
5.2. Recomendaciones	60
BIBLIOGRAFÍA	61
ANEXOS	80

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Arreglo de los tratamientos.....	41
Tabla 2 Resultado del Análisis del suelo del cultivo de alfalfa.....	42
Tabla 3 Análisis de varianza (ANOVA) para rendimiento de forraje verde de alfalfa en toneladas (t) por hectárea (ha^{-1}) por efecto de la fertilización biológica mixta.....	46
Tabla 4 Prueba de Tukey para rendimiento en toneladas (t) de forraje verde de alfalfa por hectárea (ha^{-1}).....	47
Tabla 5 Análisis de varianza (ANOVA) para materia seca de alfalfa en porcentaje (%) por efecto de la fertilización biológica mixta.....	49
Tabla 6 Prueba de Tukey para porcentaje (%) de materia seca de alfalfa.....	50
Tabla 7 Análisis de varianza (ANOVA) para altura de mata de alfalfa en centímetros (cm) por efecto de la fertilización biológica mixta.....	52
Tabla 8 Prueba de Tukey para altura de mata de alfalfa en centímetros (cm).....	53
Tabla 9 Análisis de varianza (ANOVA) para número de tallos maduros por mata de alfalfa por efecto de la fertilización biológica mixta.....	56
Tabla 10 Prueba de Tukey para número de tallos maduros por mata de alfalfa.....	57
Tabla 11 Resultados de rendimiento de materia verde (Kg).....	80
Tabla 12 Resultados de porcentaje de materia seca.....	80
Tabla 13 Resultados de altura de mata (cm).....	80
Tabla 14 Resultados de número de tallos maduros por mata de alfalfa.....	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Vista satelital de la ubicación geográfica del experimento.	38
Figura 2 Distribución aleatoria de tratamientos según el diseño experimental.	41
Figura 3 Medias para rendimiento en toneladas (t) por hectárea (ha^{-1}) de forraje verde de alfalfa según tratamiento.	47
Figura 4 Medias para porcentaje (%) de materia seca de alfalfa según tratamiento.	50
Figura 5 Medias para altura de mata de alfalfa en centímetros (cm) según tratamiento.	54
Figura 6 Medias para el número de tallos maduros por mata de alfalfa según tratamiento. ...	57
Figura 7 Resultados del análisis de suelo.	81
Figura 8 Instalación del experimento.....	82
Figura 9 Eliminación de arvenses del área experimental.	82
Figura 10 Microorganismos Rhizobium, Azospirillum y Azotobacter.	82
Figura 11 Activación de microorganismos.....	83
Figura 12 Evaluación de rendimiento por metro cuadrado.....	83
Figura 13 Evaluación de materia seca.	83

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La presente investigación analiza el efecto de la fertilización biológica mixta en el rendimiento del cultivo de alfalfa (*Medicago sativa* L.) en el Valle de Cajamarca, en un contexto que exige estrategias agrícolas sostenibles y eficientes para afrontar los desafíos regionales.

Su relevancia radica en la contribución al desarrollo sostenible y la seguridad alimentaria. La fertilización biológica, basada en microorganismos benéficos como bacterias fijadoras de nitrógeno y hongos micorrícicos, mejora la disponibilidad de nutrientes y el crecimiento vegetal; no obstante, persiste una limitada evidencia sobre su aplicación combinada en la producción de alfalfa en zonas altoandinas como el Valle de Cajamarca (Reyes et al., 2024). En este sentido, se aporta evidencia empírica sobre su efecto en la productividad forrajera.

Se adopta un enfoque experimental para evaluar la influencia de diferentes combinaciones de microorganismos benéficos, permitiendo comparaciones en rendimiento, calidad forrajera y propiedades del suelo. Asimismo, se aplican análisis estadísticos que garantizan la validez y confiabilidad de los resultados.

Se busca generar conocimiento sobre la fertilización biológica en cultivos forrajeros bajo condiciones edafoclimáticas locales, así como aportar beneficios a agricultores y ganaderos que dependen de la alfalfa para la alimentación del ganado lechero. El uso de biofertilizantes como alternativa a insumos químicos contribuiría a mejorar la productividad, reducir costos y mitigar impactos ambientales, promoviendo prácticas agrícolas sostenibles y la resiliencia de los sistemas agroproductivos.

1.1. Problema de investigación

La alfalfa (*Medicago sativa* L.) es una leguminosa forrajera de gran relevancia a nivel mundial, reconocida por su alto valor nutricional y su capacidad para mejorar la fertilidad del suelo. En 2024, el mercado global de heno de alfalfa alcanzó un valor de 82.080 millones de dólares, con una proyección de crecimiento anual del 6,60% hasta 2029; este incremento refleja la creciente demanda de forrajes de alta calidad en la ganadería y la industria lechera a nivel global (Mordor Intelligence, s. f.). Su producción enfrenta desafíos como la degradación del suelo, el uso excesivo de fertilizantes químicos y la disminución de la productividad, lo que ha llevado a la búsqueda de métodos más eficientes y sostenibles de fertilización y manejo del suelo (Álvarez et al., 2024).

En el Perú, la alfalfa es un componente esencial en la alimentación del ganado, especialmente en las principales cuencas lecheras del país (Pérez, 2024). Regiones como Cajamarca, Arequipa y Lima destacan por su significativa producción lechera, representando conjuntamente más del 50% de la producción nacional (Calua, 2024). La alimentación requerida para esta producción ganadera está compuesta por pastos naturales y cultivados, siendo la alfalfa un cultivo predominante en estas áreas (Hoyos, 2024). Sin embargo, la producción de alfalfa enfrenta diversos desafíos, incluyendo la pérdida de fertilidad del suelo, la variabilidad climática y la dependencia de fertilizantes químicos, lo que impacta negativamente en la productividad del cultivo y en la economía de los productores de este cultivo (Ruiz et al., 2023).

Específicamente, en el Valle de Cajamarca, la alfalfa constituye una fuente primaria de forraje para el ganado lechero; sin embargo, los productores locales enfrentan dificultades en su rendimiento debido a la progresiva pérdida de fertilidad del suelo y las condiciones climáticas adversas (Sánchez, 2024). La dependencia de fertilizantes químicos ha generado preocupaciones ambientales y económicas, impulsando la búsqueda de alternativas más

sostenibles (Mamani, 2023). A pesar de que diversas investigaciones han evaluado la producción de forraje y la calidad nutricional de la alfalfa en distintas regiones del país (Martínez y Leiva, 2018), existe una brecha de conocimiento respecto a la aplicación específica de la fertilización biológica mixta en este cultivo dentro del contexto local. La fertilización biológica mixta ha surgido como una alternativa prometedora, al combinar microorganismos benéficos que optimizan la disponibilidad de nutrientes en el suelo, mejoran la estructura edáfica y reducen la dependencia de fertilizantes sintéticos (Espinosa, 2023).

Dado este escenario, la presente investigación busca evaluar el efecto de la fertilización biológica mixta en el rendimiento del cultivo de alfalfa en el Valle de Cajamarca; a través de un enfoque experimental, se analizará el impacto de diferentes combinaciones de microorganismos benéficos en la producción forrajera, con el objetivo de ofrecer alternativas viables para mejorar la productividad agrícola en la región; los resultados de este estudio podrían contribuir al desarrollo de estrategias de manejo sostenible que beneficien tanto a los productores locales como al medio ambiente, promoviendo prácticas agrícolas más eficientes y menos dependientes de insumos químicos; en consecuencia, esta investigación responde a la necesidad de generar conocimientos aplicables a la realidad agrícola regional, favoreciendo el desarrollo de sistemas productivos más resilientes y sostenibles en el tiempo.

1.1.1. Formulación del problema

¿Cuál es el efecto de la fertilización biológica mixta en el rendimiento de forraje del cultivo de alfalfa (*Medicago sativa* L.)?

1.2. Justificación

La presente investigación sobre el efecto de la fertilización biológica mixta en el rendimiento del cultivo de alfalfa (*Medicago sativa* L.) en el Valle de Cajamarca se fundamenta en la necesidad de desarrollar estrategias de producción agrícola sostenibles y eficientes. La

relevancia de este estudio se justifica por su contribución al desarrollo sostenible y la seguridad alimentaria.

Esta investigación amplía el conocimiento sobre la fertilización biológica aplicada a cultivos forrajeros, específicamente en condiciones edafoclimáticas propias del Valle de Cajamarca. Diversos estudios han demostrado que los biofertilizantes, al contener microorganismos benéficos como bacterias fijadoras de nitrógeno y hongos micorrícicos, pueden mejorar la disponibilidad de nutrientes en el suelo y promover el crecimiento vegetal (Reyes et al., 2024). Sin embargo, existe una brecha en la literatura científica respecto a su aplicación combinada en la producción de alfalfa en zonas altoandinas; en este sentido, la presente investigación contribuirá a fortalecer el cuerpo teórico existente, proporcionando evidencia empírica sobre la efectividad de la fertilización biológica mixta en la productividad forrajera.

Los resultados de este estudio podrían generar beneficios directos para los agricultores y ganaderos del Valle de Cajamarca, quienes dependen de la alfalfa como principal fuente de alimento para el ganado lechero. La implementación de biofertilizantes como alternativa a los fertilizantes químicos convencionales no solo permitiría mejorar el rendimiento del cultivo, sino también reducir costos de producción y minimizar los impactos ambientales asociados al uso excesivo de agroquímicos (Vargas et al., 2024). Además, la promoción de prácticas agrícolas sostenibles contribuiría a la conservación del suelo y la biodiversidad microbiana, favoreciendo la resiliencia de los sistemas agroproductivos en la región.

Este estudio adopta un enfoque experimental que permitirá evaluar con rigor científico la influencia de la fertilización biológica mixta en la productividad del cultivo de alfalfa; mediante el diseño de tratamientos con diferentes combinaciones de microorganismos benéficos, se podrán establecer comparaciones significativas respecto al rendimiento, calidad forrajera y características del suelo. La utilización de análisis estadísticos adecuados

garantizará la validez y confiabilidad de los resultados obtenidos, proporcionando información clave para futuras investigaciones en el ámbito de la agronomía y la biotecnología aplicada a la agricultura.

Asimismo, esta investigación impacta directamente en la economía rural, mejorando la sostenibilidad de los sistemas productivos de pequeños y medianos agricultores. La reducción del uso de fertilizantes sintéticos y el acceso a alternativas biológicas eficientes pueden contribuir a una mayor estabilidad financiera de los productores agropecuarios, fortaleciendo la seguridad alimentaria y la competitividad agrícola (Oyarvide et al., 2023).

La importancia de esta investigación radica en su contribución multidimensional al conocimiento científico, la sostenibilidad agrícola y la mejora de la productividad del cultivo de alfalfa; al generar evidencia sobre la eficacia de la fertilización biológica mixta, proporciona una base sólida para la adopción de tecnologías agroecológicas que beneficien tanto a los productores como al medio ambiente, promoviendo un modelo de producción más eficiente y sostenible en el contexto de la agricultura regional.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Determinar el efecto de la fertilización biológica mixta en el rendimiento de forraje del cultivo de alfalfa (*Medicago sativa* L.) en el Valle de Cajamarca, 2025.

1.3.2. Objetivos específicos

Analizar la influencia de la fertilización biológica mixta en el rendimiento de biomasa verde y seca del cultivo de alfalfa (*Medicago sativa* L.) en el Valle de Cajamarca, 2025.

Evaluar el efecto de la fertilización biológica mixta en la altura de planta de alfalfa (*Medicago sativa* L.) en el Valle de Cajamarca, 2025.

1.4. Hipótesis

La aplicación de fertilización biológica mixta mejora significativamente el rendimiento de forraje del cultivo de alfalfa (*Medicago sativa* L.) en el Valle de Cajamarca, 2025.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes

Ventura et al. (2024) evaluaron el efecto de la biofertilización en la biomasa de alfalfa. Para el estudio se implementó el diseño experimental DBCA para medir la biomasa de alfalfa; los tres tratamientos evaluados fueron: aplicación de microorganismos eficaces (EM) al follaje (T1), EM al suelo (T2) y un grupo de control sin EM, con dosis del 10% cada 15 días. Los resultados indican que el tratamiento T1 (EM al follaje) obtuvo la mayor altura desde el segundo hasta el cuarto corte, con valores de 78.45 cm, 80.41 cm y 81.29 cm, respectivamente; en biomasa verde por hectárea, no hubo diferencias entre T1 y T2 (EM al suelo), pero ambos superaron al testigo, con valores de hasta 18.56 t ha⁻¹ en el cuarto corte; en biomasa seca, T1 mostró los mayores valores en los cuatro cortes, alcanzando 6.89 t ha⁻¹ en el último.

Toniutti y Fornasero (2020) evaluaron el efecto de la inoculación con rizobios y la fertilización fosfatada sobre la nodulación y producción de alfalfa (*Medicago sativa* L.). Para la investigación el diseño experimental utilizado fue en bloques completamente aleatorizados con cuatro repeticiones y el tamaño de la unidad experimental fue de 80 m². Los resultados indican que hay un incremento de la producción de materia seca entre 23 y 58 % para los tratamientos con el máximo nivel de fertilizante a los 120, 180 y 240 días de la siembra.

Guevara y Pinna (2020) determinaron la influencia de la inoculación con *Sinorhizobium meliloti* (Rhizobiaceae) y la fertilización nitrogenada sobre el rendimiento de alfalfa (*Medicago sativa* L.), (Fabaceae). Para el trabajo experimental se utilizó el diseño de bloques completamente al azar con 4 tratamientos y 4 repeticiones con un total de 16 parcelas experimentales. Los resultados indican que el tratamiento con *Sinorhizobium* (T1) presentó la mayor altura de planta en todas las evaluaciones posteriores al corte, alcanzando 28.87 cm (1 semana), 29.85 cm (2 semanas), 45.65 cm (3 semanas) y 54.53 cm (4 semanas), sin diferencias

significativas frente a Urea (T2); en biomasa seca, T1 registró el mayor valor en la planta con 0.24 kg m^{-2} , mientras que en raíz el mayor valor correspondió a T2 con 0.23 kg m^{-2} ; el rendimiento más alto se obtuvo con Urea (T2) (1700 g m^{-2}), seguido de *Sinorhizobium* (T1) (1650 g m^{-2}), sin diferencias estadísticas; equivalentes a 0.40 t ha^{-1} y 0.39 t ha^{-1} , respectivamente; finalmente, el largo de tallo fue mayor en T1 (0.58 m) y menor en el testigo (T4) (0.31 m), con diferencias estadísticas significativas.

Ramírez y Condo (2015) evaluaron el efecto de diferentes niveles de *Trichoderma* spp. y humus líquido como fertilizante foliar sobre el comportamiento agronómico de la Alfalfa. El estudio utilizó un Diseño de Bloques Completamente al Azar con cuatro tratamientos (T1: 75 % *Trichoderma* Spp. y 25 % humus líquido (T1), T2: 50 % *Trichoderma* Spp. y 50 % humus líquido, T3: 75 %, *Trichoderma* spp. y 25% humus líquido y T0: testigo). Los resultados indican que los mejores rendimientos se obtuvieron al aplicar el tratamiento T3 (25 % *Trichoderma* Spp. y 75 % humus líquido), en las tres réplicas del ensayo, con una producción promedio de tres cortes reportando: 26,14 tallos/planta; $12354,67 \text{ kg ha}^{-1}$ de forraje verde; $3706,40 \text{ kg ha}$ materia seca. Concluyendo que la utilización de *Trichoderma* Spp. y humus líquido permite mejorar las características agro-productivas de alfalfa, además ayuda a la producción sostenible y sustentable de praderas con pastos de clima frío.

Castillo et al. (2014) evaluaron el efecto de los niveles de microorganismos eficaces y bioabonos en el rendimiento de la alfalfa con EMA. El diseño experimental fue de Bloques Completamente al Azar (DBCA) con 3 repeticiones, 9 tratamientos, haciendo un total de 27 parcelas experimentales. Los resultados obtenidos indican que existe efecto significativo en los niveles de microorganismos eficaces y bioabonos, en la altura de plantas (cm), número de tallos/ m^{-2} , peso de forraje verde (kg), materia seca (%) y rendimiento (kg/ha), en el cultivo de la alfalfa variedad Moapa, con el tratamiento (T7) con EMA (EM-1 foliar activado) 2 L y Compost-EM 4 toneladas por hectárea, al reportar 88,37 cm de altura de planta; 441,67 tallos

por metro cuadrado; 2,17 kilogramos de forraje verde; 38,57% de materia seca y 21 666,67 kilogramos por hectárea.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Teorías de la fertilización biológica

a. Teoría de la nutrición mineral de las plantas

La nutrición mineral estudia la absorción, transporte y función metabólica de los elementos inorgánicos indispensables para el crecimiento vegetal; su eje conceptual son los criterios de esencialidad, según los cuales las plantas requieren actualmente 14 elementos minerales esenciales sin los cuales no pueden completar su ciclo de vida; los macronutrientes N, P, K, S, Ca y Mg se requieren en cantidades mayores, mientras que los micronutrientes Fe, Mn, B, Zn, Cu, Mo, Ni y Cl son necesarios en cantidades mínimas; esta clasificación no implica jerarquía fisiológica, pues la deficiencia de cualquier elemento, independientemente de la concentración requerida, interrumpe procesos metabólicos específicos (Kirkby, 2023).

Desde el punto de vista molecular, el transporte radial de nutrientes desde el suelo hasta la vasculatura de la raíz se logra a través de tres vías: apoplástica, simplástica y transcelular; en todas ellas se requieren proteínas transportadoras para movilizar los nutrientes a través de la membrana plasmática (Robe & Barberon, 2023). A nivel de señalización, la investigación reciente revela que la visión clásica de la homeostasis mineral donde cada nutriente es controlado por sus propios mecanismos y rutas de señalización resulta demasiado simplista, dado que existe una compleja coordinación entre las homeostasis de distintos nutrientes minerales (Bouain et al., 2019).

b. Teoría de la fijación biológica del nitrógeno

La fijación biológica del nitrógeno (FBN) es el proceso mediante el cual microorganismos diazotróficos reducen el N_2 atmosférico a NH_3 asimilable por las plantas, a

través del complejo enzimático nitrogenasa; dentro de los nódulos, los rizobios se diferencian en bacteroides que reducen el N_2 atmosférico a amoníaco para secretarlo a la planta hospedante, a cambio de dicarboxilatos principalmente succinato y malato como fuente de carbono (Muriel et al., 2021).

Bioquímicamente, todos los rizobios dependen de la molibdenitrogenasa (Molibdenitrogenasa, EC 1.18.2.1) para la fijación del nitrógeno; este sistema presenta dos limitaciones importantes: un elevado requerimiento energético mínimo de 16 mol de ATP por mol de N_2 reducido, y una extrema sensibilidad al oxígeno; la relevancia agronómica, la FBN tiene el potencial de reducir la dependencia de fertilizantes sintéticos y el impacto ambiental asociado; empleando cepas rizobianas efectivas con cultivares leguminosos compatibles, es posible reducir los insumos nitrogenados y las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de su manufactura y aplicación (Irisarri et al., 2023).

Asimismo, la simbiosis no se restringe a las leguminosas: la FBN asimbiótica involucra géneros como *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Acetobacter*, *Gluconacetobacter* y *Pseudomonas*, todos portadores de genes NIF responsables de la actividad nitrogenásica en plantas no leguminosas (Muriel et al., 2021).

c. Teoría de la rizosfera

La rizosfera designa la zona de suelo directamente influenciada por las raíces de las plantas y constituye uno de los microhábitats biológicamente más dinámicos de los ecosistemas terrestres; el término fue acuñado por Lorenz Hiltner en 1904 para describir una delgada capa de suelo que rodea e influye la raíz vegetal; puede dividirse en endorizosfera, rizoplano y ectorizosfera, siendo considerada uno de los principales puntos de interacción entre la planta y su entorno (Philippot et al., 2023).

La riqueza microbiana de la rizosfera se explica por la exudación radicular: los exudados radiculares, compuestos por azúcares, ácidos orgánicos y metabolitos secundarios,

actúan como quimioattractantes que moldean el microbioma rizosférico al reclutar microorganismos benéficos; a su vez, los metabolitos microbianos modulan la fisiología vegetal y los perfiles de exudación, reforzando las interacciones mutualistas (Escobar et al., 2025). Esta comunicación bidireccional modifica las propiedades fisicoquímicas del suelo, particularmente el pH, la disponibilidad de P, Fe y Mn, y la estructura de las comunidades microbianas (Philippot et al., 2023).

Desde una perspectiva aplicada, la identificación de genes microbianos claves implicados en la colonización radicular puede mejorar sustancialmente la comprensión de cómo las bacterias colonizan las raíces, lo que es fundamental para desarrollar inoculantes efectivos bajo condiciones de campo (Olanrewaju et al., 2022).

d. Teoría de los microorganismos promotores del crecimiento vegetal (PGPR)

Las bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR, por sus siglas en inglés) son microorganismos rizosféricos que estimulan el desarrollo de las plantas mediante mecanismos directos e indirectos; las PGPR promueven el crecimiento vegetal a través de: (1) fijación biológica de nitrógeno, (2) solubilización de fósforo inorgánico y mineralización del orgánico, (3) producción de fitohormonas como ácido indol-3-acético (AIA), citoquininas y giberelinas, (4) producción de sideróforos, ACC desaminasa e ácido cianhídrico, y (5) biocontrol de fitopatógenos mediante síntesis de antibióticos o competencia con organismos perjudiciales (Suárez et al., 2024).

Los mecanismos directos actúan modificando el metabolismo vegetal: las PGPR producen fitohormonas que alteran la arquitectura radicular y mejoran el desarrollo, el área superficial y la acumulación de nutrientes; también incrementan la productividad vegetal mediante la actividad de la ACC desaminasa, que reduce los niveles inhibitorios de etileno en el sistema radicular (Mellado et al., 2024).

En cuanto a los mecanismos indirectos de biocontrol, las PGPR protegen las plantas compitiendo con patógenos por nutrientes escasos, produciendo compuestos antisépticos, sintetizando enzimas líticas de paredes celulares fúngicas, e induciendo respuestas sistémicas en la planta hospedante; a nivel aplicado, el uso de PGPR como biofertilizantes representa una alternativa sostenible frente a los agroquímicos convencionales, con efectos demostrados en cultivos estratégicos como maíz, trigo (Ferreira et al., 2023).

e. Teoría de la agricultura sustentable

La agricultura sustentable emerge como paradigma científico-práctico ante el agotamiento ecológico, económico y social derivado de la agricultura convencional de la Revolución Verde; la agricultura sustentable involucra la preservación de la biodiversidad y los procesos ecológicos, la promoción de la salud humana y el incremento de la productividad, minimizando los impactos negativos sobre el ambiente y obteniendo beneficios económicos; mientras que la agroecología se enfoca principalmente en los aspectos ambientales del desarrollo sostenible (García et al., 2025).

Existe consenso en que el sistema alimentario mundial no está proporcionando una nutrición adecuada para todos y está causando degradación ambiental y pérdida de biodiversidad, de modo que se requiere una transformación profunda para enfrentar los desafíos de la desnutrición persistente y la pobreza rural, agravados por el cambio climático (Wezel et al., 2020).

La agroecología aporta trece principios consolidados para orientar esta transición: reciclaje, reducción de insumos, salud del suelo, salud animal, biodiversidad, sinergia, diversificación económica, co-creación de conocimiento, valores sociales y dietas, equidad, conectividad, gobernanza de recursos naturales y participación (Wezel et al., 2020). En la práctica, la agroecología ofrece una solución para la agricultura sustentable al abordar la

seguridad alimentaria, la pérdida de biodiversidad y el cambio climático, priorizando el bienestar de los ecosistemas y de los seres humanos (Mahon et al., 2024).

2.2.2. Caracterización del Cultivo de Alfalfa

a. Descripción botánica

La alfalfa (*Medicago sativa* L.) es una especie perenne perteneciente a la familia Fabaceae (Macias, 2024). Se caracteriza por su sistema radicular profundo, lo que le permite una alta tolerancia a la sequía y una eficiente absorción de nutrientes (Troya, 2024). Sus tallos son erectos y ramificados, con hojas trifoliadas que presentan una forma ovalada o lanceolada (Echeverría et al., 2023). La inflorescencia está compuesta por racimos de flores de color violeta a azul, las cuales son polinizadas principalmente por insectos, favoreciendo la producción de semillas viables (Obando, 2024). El fruto es una legumbre en espiral, dentro de la cual se encuentran las semillas, de tamaño pequeño y de color amarillento a marrón (Toalombo, 2024).

Desde el punto de vista fisiológico, la alfalfa es una planta con alta eficiencia en la fijación biológica del nitrógeno, gracias a la simbiosis con bacterias del género *Rhizobium*; esta característica le confiere una ventaja competitiva en suelos con baja disponibilidad de nitrógeno, contribuyendo a la mejora de la fertilidad del suelo (Pacheco, 2023). Su crecimiento es indeterminado, lo que permite la realización de varios cortes anuales para forraje sin afectar significativamente su persistencia en el campo (Odorizzi, 2015).

La adaptabilidad de la alfalfa a diversas condiciones agroecológicas se debe a su diversidad genética y a la existencia de diferentes cultivares, seleccionados según su resistencia a plagas y enfermedades, así como a su capacidad de producción (Doussoulin, 2022). Su longevidad y capacidad de rebrote la convierten en una opción atractiva para la producción forrajera en diversas regiones del mundo (Lloveras et al., 2020).

b. Importancia agronómica

La alfalfa es considerada uno de los cultivos forrajeros más importantes a nivel mundial debido a su alto contenido proteico, digestibilidad y calidad nutricional; es una fuente esencial de alimentación para el ganado bovino, ovino y caprino, especialmente en sistemas de producción lechera y de carne (Macias, 2024). Su uso en la rotación de cultivos contribuye significativamente a la mejora de la estructura del suelo, gracias a su sistema radicular profundo, que promueve la aireación y reducción de la compactación (Chicaiza y Chuquimarca, 2024).

Desde una perspectiva ecológica, la alfalfa juega un papel clave en la conservación de suelos y en la mitigación de la degradación ambiental; su capacidad de fijación de nitrógeno no solo reduce la dependencia de fertilizantes sintéticos, sino que también mejora la fertilidad del suelo para cultivos posteriores (Ramos et al., 2021). Además, su cobertura vegetal densa ayuda a minimizar la pérdida de humedad y la erosión eólica e hídrica (Chaca y Cruz, 2022).

c. Requerimientos edafoclimáticos

La alfalfa es un cultivo exigente en cuanto a condiciones edafoclimáticas, ya que requiere suelos profundos, bien drenados y con un pH entre 6.5 y 7.5 para un óptimo desarrollo; prefiere suelos francos o franco-arenosos con buena capacidad de retención de humedad y alta fertilidad; aunque puede tolerar ciertos niveles de salinidad, su crecimiento se ve afectado en suelos con alta concentración de sales solubles; la disponibilidad de nutrientes como fósforo, potasio y calcio es fundamental para una producción forrajera eficiente (Ramírez et al., 2013).

En cuanto a sus requerimientos climáticos, la alfalfa se adapta mejor a climas templados y semiáridos, con temperaturas óptimas de crecimiento entre 18 y 25°C; tolera bien las heladas moderadas, pero su desarrollo se ve limitado por temperaturas extremas; la radiación solar influye directamente en su tasa fotosintética y, por ende, en su capacidad de rebrote y acumulación de biomasa (Salazar, 2022).

La disponibilidad hídrica es un factor crítico para la producción de alfalfa, ya que el cultivo presenta altas demandas de agua; en sistemas de secano, su rendimiento puede verse afectado por periodos prolongados de sequía, mientras que, en cultivos bajo riego, la aplicación de láminas de agua adecuadas permite mantener una producción constante durante todo el ciclo de crecimiento (Callisaya, 2018).

d. Sistemas de producción en el Valle de Cajamarca

En el Valle de Cajamarca, la alfalfa es un cultivo fundamental en la ganadería, ya que proporciona forraje de alta calidad para la producción lechera y cárnica; existen distintos sistemas de producción, entre los que destacan los cultivos bajo riego tecnificado y los sistemas de secano. La producción intensiva se caracteriza por la aplicación de tecnologías como fertilización biológica, rotación de cultivos y manejo integrado de plagas y enfermedades, lo que permite optimizar los rendimientos y mejorar la sostenibilidad del sistema productivo (Mengoni, 2024).

Los pequeños y medianos productores de la región suelen implementar sistemas de corte y acarreo, donde la alfalfa es cosechada manual o mecanizadamente y luego transportada hasta los establos para su consumo (Soto, 2024). En estos sistemas, el manejo del suelo y el uso eficiente del agua son factores determinantes para garantizar una producción sostenible y rentable (Haedo, 2024).

Además, el cultivo de alfalfa en el Valle de Cajamarca se complementa con prácticas agroecológicas, como el uso de biofertilizantes y el establecimiento de coberturas vegetales para mejorar la conservación del suelo (Cotrina, 2024). La investigación en fertilización biológica mixta representa una estrategia clave para incrementar el rendimiento del cultivo y reducir la dependencia de insumos sintéticos, lo que contribuirá al desarrollo de sistemas agrícolas más sostenibles en la región.

2.2.3. *Fertilización Biológica*

La fertilización biológica es un enfoque sostenible que mejora la fertilidad del suelo y el rendimiento de los cultivos mediante microorganismos beneficiosos; esta alternativa a los fertilizantes químicos convencionales reduce los efectos adversos en la salud del suelo y el medio ambiente (Alarcón, 2024). El proceso se basa en la incorporación de microorganismos vivos al suelo o semillas, que actúan a través de mecanismos naturales como la fijación de nitrógeno atmosférico, solubilización de minerales (fósforo y potasio) y producción de fitohormonas para el crecimiento vegetal (Roca, 2024).

Esta práctica ha ganado relevancia en la agricultura sostenible al disminuir la dependencia de insumos sintéticos y optimizar la absorción de nutrientes; los microorganismos específicos potencian la disponibilidad de nutrientes esenciales y mejoran la resiliencia del agroecosistema ante condiciones adversas (Arana, 2024). Estudios recientes confirman que los biofertilizantes, compuestos por bacterias, hongos y otros microorganismos, son fundamentales en la mineralización de materia orgánica y liberación de nutrientes aprovechables por las plantas; su aplicación puede realizarse mediante inoculación directa al suelo o sobre las semillas antes de la siembra (Mejía, 2022).

La efectividad de los biofertilizantes se ha comprobado en diversos cultivos, destacando su impacto en la alfalfa, donde aumenta la biomasa aérea y la calidad del forraje nutricional; esta práctica contribuye a la sostenibilidad agrícola a largo plazo y reduce la contaminación ambiental asociada a fertilizantes químicos (Rodellar, 2019).

a. Tipos de biofertilizantes

Los biofertilizantes pueden clasificarse en diferentes categorías según su función y el tipo de microorganismos que los componen; entre los principales tipos se encuentran los fijadores de nitrógeno, los solubilizadores de fósforo y los promotores del crecimiento vegetal (Cumpa, 2021). Los biofertilizantes fijadores de nitrógeno incluyen bacterias como *Rhizobium*,

Azospirillum y *Azotobacter*, las cuales convierten el nitrógeno atmosférico en formas asimilables por las plantas; en cultivos leguminosos como la alfalfa, la simbiosis entre *Rhizobium* y las raíces de la planta permite un suministro continuo de nitrógeno, reduciendo la necesidad de fertilización química (Inglés, 2024).

Los biofertilizantes solubilizadores de fósforo incluyen bacterias del género *Bacillus* y hongos micorrícicos arbusculares, los cuales incrementan la disponibilidad de fósforo en el suelo al liberar ácidos orgánicos y enzimas que descomponen compuestos minerales insolubles; este mecanismo mejora la eficiencia del uso del fósforo y favorece el crecimiento radicular (Estévez, 2022). Por último, los biofertilizantes promotores del crecimiento vegetal incluyen microorganismos que producen fitohormonas como auxinas, giberelinas y citoquininas, que estimulan el desarrollo de raíces y brotes; entre estos destacan especies de *Pseudomonas* y *Trichoderma*, que además presentan efectos antagonistas contra patógenos del suelo, contribuyendo a la sanidad de los cultivos (Saldaña, 2024).

b. Principales bacterias utilizadas en la fertilización biológica de la alfalfa

Rhizobium

Rhizobium es un género de bacterias Gramnegativas que viven en los nódulos radiculares de las plantas leguminosas; estas bacterias tienen la capacidad de fijar nitrógeno atmosférico, lo que beneficia a las plantas hospederas al proporcionarles un suministro de nitrógeno utilizable; cambio, las plantas proporcionan carbono a las bacterias, estableciendo así una relación simbiótica beneficiosa para ambos (Bonilla et al., 2021).

Las bacterias *Rhizobium* desempeñan un papel fundamental en la agricultura sostenible gracias a su capacidad para fijar nitrógeno, lo que contribuye a mejorar la fertilidad del suelo; este proceso favorece un crecimiento más saludable de las plantas y, a su vez, incrementa su rendimiento, optimizando la productividad agrícola natural y eficiente (Rivera, 2024).

Azotobacter sp.

Azotobacter es un género de bacterias de vida libre con la capacidad de fijar nitrógeno atmosférico en suelos con baja disponibilidad de este elemento. A través de este proceso, transforman el nitrógeno molecular en amonio, una forma que las plantas pueden absorber, lo que contribuye a mejorar la fertilidad del suelo (Vásquez, 2023). Además, *Azotobacter sp.* producen compuestos bioactivos como citoquininas, auxinas y giberelinas, que actúan como bioestimulantes y favorecen un desarrollo más vigoroso de los cultivos (Vanderbilt, 2024).

Otra cualidad destacada de *Azotobacter sp.* es su capacidad para solubilizar fósforo y generar sideróforos, compuestos que favorecen la disponibilidad de hierro en el suelo, promoviendo un equilibrio nutricional óptimo para las plantas (Moreno et al., 2018). En cultivos como maíz y trigo, la aplicación de *Azotobacter sp.* no solo incrementa la productividad, sino que también mejora la calidad del grano, consolidándose como un recurso esencial para una agricultura sostenible (Coppola, 2022).

Azospirillum spp.

Azospirillum spp. es un grupo de bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR, por sus siglas en inglés) que estableció asociaciones con las raíces de gramíneas y otros cultivos. Se caracterizan por su capacidad de fijar nitrógeno de manera asociativa, un mecanismo que, aunque menos eficiente que la fijación simbiótica, contribuye con cantidades significativas de nitrógeno disponible para las plantas (Ramos, 2018). Además, *Azospirillum spp.* sintetiza fitohormonas como auxinas y ácido indolacético (AIA), favoreciendo el desarrollo del sistema radicular (Domingues et al., 2020).

La presencia de *Azospirillum spp.* en el suelo favorece la resistencia de las plantas ante condiciones de estrés abiótico, como la sequía y la salinidad del suelo (Osses et al., 2022). En cultivos como el maíz, la aplicación de estas bacterias no solo incrementa la biomasa tanto

aérea como radicular, sino que también optimiza la eficiencia en el uso de fertilizantes químicos, permitiendo una producción más rentable y sostenible (Grasso y Díaz, 2020).

c. Mecanismos de acción

Los biofertilizantes actúan a través de diversos mecanismos que favorecen la nutrición vegetal y mejoran la estructura del suelo; uno de los principales mecanismos es la fijación biológica de nitrógeno, un proceso llevado a cabo por bacterias diazotróficas que convierten el nitrógeno atmosférico en formas utilizables por las plantas (Ulloa, 2024). Otro mecanismo importante es la solubilización de minerales, en la cual microorganismos del suelo liberan ácidos orgánicos y enzimas capaces de disolver compuestos minerales no disponibles para las plantas; este proceso es crucial para la liberación de nutrientes como el fósforo, el potasio y el zinc, elementos esenciales para el crecimiento y desarrollo vegetal (Pinos, 2023).

Además, los biofertilizantes estimulan el crecimiento vegetal mediante la producción de fitohormonas y la inducción de resistencia sistémica contra patógenos; la interacción entre microorganismos benéficos y las raíces de las plantas también contribuye a la mejora de la porosidad y capacidad de retención de agua del suelo (Moreno et al., 2018).

d. Interacciones microbianas

Las interacciones entre microorganismos en biofertilizantes pueden ser cooperativas o competitivas, generando sinergias que potencian la disponibilidad de nutrientes y salud vegetal (Villena et al. 2022). Un ejemplo destacado es la simbiosis entre bacterias fijadoras de nitrógeno y hongos micorrícicos, donde las micorrizas facilitan la captación de fósforo mientras las bacterias aportan nitrógeno, además de inducir resistencia sistémica contra enfermedades (Méndez, 2023).

e. Beneficios potenciales

Los biofertilizantes benefician la producción agrícola al reducir el uso de fertilizantes químicos, mejorar la fertilidad del suelo y aumentar el rendimiento de los cultivos. En la alfalfa

específicamente, su aplicación incrementa la producción de biomasa, el contenido proteico del forraje y optimiza el aprovechamiento del nitrógeno (Martínez, 2024). Esta tecnología representa una estrategia clave para la agricultura sostenible, al mitigar el impacto ambiental en suelos y agua mientras fortalece la resiliencia de los sistemas productivos (García, 2024).

2.2.4. Efectos de la Fertilización Biológica Mixta

a. Rendimiento de forraje verde

La fertilización biológica mixta desempeña un papel fundamental en la producción de forraje verde, ya que proporciona nutrientes esenciales a las plantas de manera gradual y sostenida; diversos estudios han demostrado que el uso de biofertilizantes compuestos por microorganismos beneficiosos, como bacterias fijadoras de nitrógeno y hongos micorrícicos, mejora la absorción de nutrientes y estimula el crecimiento vegetal (Martínez et al., 2018). Este tipo de fertilización no solo incrementa la cantidad de forraje verde producida, sino que también mejora la eficiencia en el uso de nutrientes, reduciendo la dependencia de fertilizantes químicos (Navarro, 2024).

La aplicación de microorganismos eficientes en cultivos de alfalfa ha mostrado incrementos significativos en la producción de biomasa, favoreciendo una mayor fijación biológica de nitrógeno y la movilización de fósforo en el suelo (Corrales et al., 2017). La combinación de bacterias promotoras del crecimiento vegetal y hongos formadores de micorrizas optimiza la estructura del suelo y mejora la captación de agua, lo que se traduce en un aumento del rendimiento forrajero (Mazo, 2023). Además, estos microorganismos pueden inducir respuestas sistémicas en las plantas, mejorando su resistencia a factores de estrés abiótico como sequías o salinidad (Moreno, 2018).

Por otra parte, investigaciones recientes destacan que la fertilización biológica mixta no solo incrementa la cantidad de biomasa producida, sino que también mejora su calidad nutricional (Menghini, 2018). El contenido de proteína, carbohidratos estructurales y minerales

en la biomasa forrajera puede verse favorecido por la presencia de microorganismos benéficos en el suelo; este efecto tiene implicaciones directas en la productividad ganadera, ya que un forraje de mayor calidad nutricional contribuye a mejorar el desempeño animal y la eficiencia de conversión alimenticia (Insuasty y Garreta, 2024).

b. Porcentaje de materia seca

El peso seco es un indicador clave de la biomasa acumulada y refleja la eficiencia en la captación y utilización de nutrientes. La fertilización biológica mixta mejora este parámetro al optimizar la disponibilidad de macronutrientes esenciales y al promover una mayor actividad metabólica en las plantas (Olmedo y Surco, 2024). Estudios han demostrado que la aplicación de biofertilizantes incrementa el contenido de materia seca en alfalfa, lo que se traduce en una mayor productividad y un mejor aprovechamiento de los recursos del suelo (Moreno, 2023).

La mejora en el peso seco se debe a la acción combinada de bacterias fijadoras de nitrógeno y hongos micorrícicos, que incrementan la eficiencia en la absorción de nutrientes y reducen el estrés fisiológico de las plantas (Mejía, 2022). Además, el aumento en la biomasa se relaciona con una mayor capacidad fotosintética, promovida por la actividad de los microorganismos benéficos en la rizosfera (Aguilar, 2023).

c. Altura de matas

La altura de las matas de alfalfa está directamente influenciada por la disponibilidad de nutrientes en el suelo y por la actividad biológica que mejora la absorción de estos elementos (Begazo, 2023). La fertilización biológica mixta, al incluir microorganismos fijadores de nitrógeno y solubilizadores de fósforo, promueve un crecimiento vegetativo vigoroso y sostenido (Olmedo y Surco, 2024). Investigaciones han evidenciado que los tratamientos con biofertilizantes incrementan significativamente la altura de las matas en comparación con los sistemas de fertilización convencionales, debido a una mayor eficiencia en la absorción de macronutrientes clave como nitrógeno, fósforo y potasio (Hernández, 2022).

Estudios realizados en cultivos forrajeros han demostrado que la inoculación con rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) y hongos micorrícicos arbusculares puede incrementar la longitud del tallo principal en un 15-30% (Mango, 2019). Este aumento en la altura de las matas se debe a la acción combinada de los microorganismos benéficos, que mejoran la captación de agua y la disponibilidad de nutrientes esenciales. Además, estos microorganismos inducen la síntesis de fitohormonas como auxinas y giberelinas, que regulan el alargamiento celular y el desarrollo del tallo (Roca, 2024).

Además del impacto en el crecimiento, la fertilización biológica mixta contribuye a una mayor resistencia a factores de estrés ambiental. Investigaciones indican que las matas inoculadas con microorganismos benéficos presentan una mayor tolerancia a condiciones adversas como suelos pobres, sequías y altas temperaturas (Supanitsky, 2022). Esto permite que la alfalfa mantenga un crecimiento estable y sostenido a lo largo de su ciclo vegetativo, asegurando un rendimiento forrajero adecuado (Lema, 2023).

2.2.5. Indicadores fisiológicos

a. Nodulación

La nodulación es un proceso biológico clave en la alfalfa (*Medicago sativa* L.), mediante el cual bacterias del género *Rhizobium* forman nódulos en las raíces de la planta, permitiendo la fijación simbiótica de nitrógeno atmosférico (Paredes, 2013). Este proceso es fundamental para el crecimiento y desarrollo de la alfalfa, ya que el nitrógeno es un nutriente esencial para la síntesis de proteínas y otros compuestos estructurales; la eficiencia de la nodulación depende de factores como la compatibilidad entre la cepa bacteriana y la planta, la disponibilidad de nutrientes en el suelo y las condiciones ambientales (Jiménez, 2022).

Estudios han demostrado que la inoculación de alfalfa con cepas específicas de *Rhizobium* mejora la formación y funcionalidad de los nódulos, aumentando la productividad del cultivo (Jiménez, 2022). La cantidad y calidad de los nódulos también pueden ser

influenciadas por la aplicación de biofertilizantes y prácticas agrícolas sostenibles, que optimizan la actividad microbiana en el suelo; un mayor número de nódulos activos se traduce en una mejor asimilación de nitrógeno y, en consecuencia, en un incremento del rendimiento forrajero de la alfalfa (Vílchez, 2024).

b. Fijación de nitrógeno

La fijación biológica de nitrógeno es un proceso clave en la nutrición de la alfalfa, mediante el cual los rizobios simbióticos convierten el nitrógeno atmosférico en formas asimilables por la planta; este mecanismo reduce la dependencia de fertilizantes químicos y mejora la sostenibilidad de la producción agrícola; la eficiencia de la fijación de nitrógeno está influenciada por la actividad bacteriana, la disponibilidad de fósforo y la calidad de la relación simbiótica establecida entre la planta y los microorganismos (Rivera, 2024).

Diversos estudios han demostrado que la fijación de nitrógeno en alfalfa se incrementa significativamente con la inoculación de cepas eficientes de *Rhizobium* y con la aplicación de biofertilizantes (Toniutti y Fornasero, 2020). La presencia de otros microorganismos beneficiosos, como bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR), también puede potenciar este proceso al mejorar la salud radicular y la absorción de nutrientes; además, factores como el pH del suelo y la humedad juegan un papel determinante en la eficiencia de la fijación de nitrógeno (Velasco et al., 2020).

c. Absorción de nutrientes

La absorción de nutrientes es un proceso esencial para el desarrollo óptimo de la alfalfa, ya que influye directamente en su crecimiento, rendimiento y calidad forrajera; este proceso depende de la capacidad de las raíces para captar elementos esenciales como nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y micronutrientes (Lemache, 2015). La eficiencia en la absorción de nutrientes puede ser mejorada mediante la simbiosis con microorganismos beneficiosos, como micorrizas arbusculares y rizobios (Reva, 2018).

Investigaciones han demostrado que la inoculación con biofertilizantes y la aplicación de prácticas agrícolas sostenibles optimizan la disponibilidad y absorción de nutrientes en la alfalfa (Rivera, 2024). La incorporación de materia orgánica al suelo, así como el uso de microorganismos promotores del crecimiento vegetal, mejora la solubilización de nutrientes y la eficiencia en su captación. Además, el pH del suelo y la presencia de exudados radiculares juegan un papel crucial en la movilidad de los nutrientes hacia la planta (Granados, 2023).

d. Eficiencia fotosintética

La eficiencia fotosintética en la alfalfa es un factor determinante en su capacidad de producción de biomasa y rendimiento forrajero (Cayetano, 2022). Este indicador fisiológico se refiere a la conversión de la energía lumínica en energía química mediante la fotosíntesis, proceso en el cual se sintetizan carbohidratos a partir del dióxido de carbono y el agua. La eficiencia de este proceso depende de la actividad enzimática, la concentración de clorofila y la estructura del aparato fotosintético de la planta.

La eficiencia fotosintética es un indicador fisiológico que se refiere a la conversión de la energía lumínica en energía química mediante la fotosíntesis, proceso en el cual se sintetizan carbohidratos a partir del dióxido de carbono y el agua (Montero, 2022). La eficiencia de este proceso depende de la actividad enzimática, la concentración de clorofila y la estructura del aparato fotosintético de la planta (Kuffo et al., 2024).

Estudios han demostrado que la aplicación de biofertilizantes y la interacción con microorganismos benéficos pueden mejorar la eficiencia fotosintética de la alfalfa; la inoculación con rizobios y micorrizas arbusculares contribuye a una mayor captación de nutrientes, lo que permite un óptimo funcionamiento de los cloroplastos y una mayor tasa de asimilación de carbono (Celdrán, 2023). Además, factores ambientales como la intensidad lumínica, la temperatura y la disponibilidad de agua también influyen en la eficiencia fotosintética del cultivo (Aguado et al., 2024).

e. Diversidad microbiana

La diversidad microbiana del suelo, compuesta por bacterias, hongos, actinomicetos y arqueas, es fundamental para la salud y productividad de los cultivos al regular procesos como la mineralización de nutrientes, supresión de patógenos y ciclos biogeoquímicos (Garbowski, et al., 2022). En el caso específico de la alfalfa, estos microorganismos establecen interacciones benéficas con las raíces que mejoran la disponibilidad de nutrientes y promueven el crecimiento vegetal (Molina et al., 2025). La fertilización biológica mixta potencia la riqueza y abundancia de estos organismos beneficiosos, destacando la acción de bacterias solubilizadoras de fósforo y fijadoras de nitrógeno que reducen la dependencia de fertilizantes químicos (Navarro, 2024). Además, los consorcios microbianos específicos mejoran además la estructura del suelo y su capacidad de retención de nutrientes, favoreciendo el desarrollo radicular (Ortiz, 2020).

f. Colonización radicular

La colonización radicular es un proceso simbiótico entre microorganismos del suelo y raíces vegetales que optimiza el desarrollo y nutrición de las plantas (Rivera, 2024). Esta interacción cobra especial relevancia en la alfalfa a través de dos grupos principales: los hongos micorrícicos arbusculares (HMA) y las bacterias promotoras del crecimiento, particularmente los rizobios (Moreno y Reyes, 2019). Estos microorganismos, al establecerse en las raíces, mejoran la captación de agua y nutrientes esenciales (Mazo, 2023). La inoculación con cepas específicas incrementa la biomasa radicular y la eficiencia en la absorción de fósforo y nitrógeno, mientras induce la producción de metabolitos secundarios que fortalecen la resistencia a enfermedades y estrés abiótico (Santoyo et al., 2023).

g. Interacciones microorganismos-planta

Las interacciones entre microorganismos del suelo y la alfalfa pueden ser simbióticas, mutualistas, comensales o patogénicas, siendo determinantes para el desarrollo y productividad del cultivo (Erdozain, 2024). Entre las asociaciones beneficiosas destacan la simbiosis con

rizobios y micorrizas, que mejoran la disponibilidad de nutrientes y la resistencia a factores de estrés (Troya y Pino, 2023). La co-inoculación de estos microorganismos benéficos potencia la producción de biomasa y la calidad del forraje (Vera, 2022).

2.3. Definición de términos

Alfalfa (*Medicago sativa* L.)

Planta forrajera perenne de alto valor nutricional utilizada en la alimentación de ganado, caracterizada por su capacidad de fijar nitrógeno atmosférico gracias a su simbiosis con bacterias del género *Rhizobium* (Pacheco, 2023).

Fertilización biológica mixta

Técnica de fertilización que combina diferentes biofertilizantes, como microorganismos beneficiosos y enmiendas orgánicas, para mejorar la disponibilidad de nutrientes en el suelo y optimizar el crecimiento de los cultivos (Martínez et al., 2018).

Fijación biológica de nitrógeno (FBN)

Proceso mediante el cual ciertos microorganismos, como las bacterias simbióticas del género *Rhizobium*, convierten el nitrógeno atmosférico en formas asimilables por las plantas, reduciendo la necesidad de fertilizantes sintéticos (Ulloa, 2024).

Microorganismos benéficos

Bacterias, hongos y otros organismos microscópicos que favorecen la disponibilidad de nutrientes, mejoran la estructura del suelo y promueven el desarrollo vegetal, como los *Rhizobium*, *Azospirillum*, *Azotobacter* y micorrizas (Méndez, 2023).

Rendimiento del cultivo

Cantidad de biomasa o producción obtenida por unidad de superficie en un período determinado, expresado en términos de peso seco, volumen o valor comercial (Frazão, 2024).

Simbiosis rizobiana

Relación mutualista entre bacterias del género *Rhizobium* y las raíces de leguminosas, en la cual las bacterias colonizan las raíces formando nódulos y proporcionan nitrógeno fijado a la planta a cambio de compuestos orgánicos (Sánchez, 2022).

CAPÍTULO III

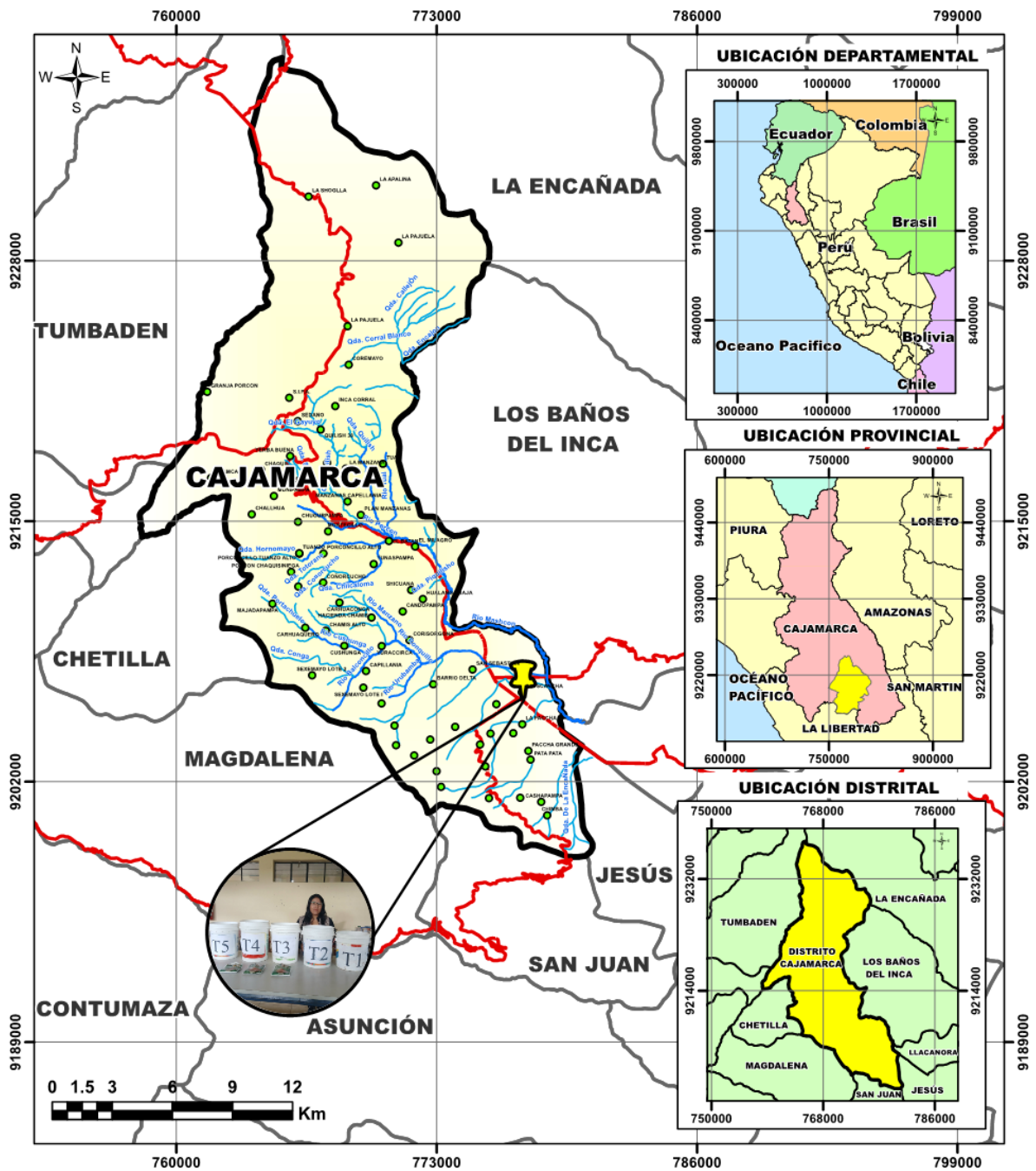
MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación geográfica

El área experimental se establecerá en un cultivo de alfalfa (*Medicago sativa* L.) de cinco años de edad, ubicado en las instalaciones del Instituto de Educación Superior Tecnológico Público (IESTP) CEFOP-Cajamarca localizado en el kilómetro 3.5 de la carretera Cajamarca - Baños del Inca, dentro del valle de Cajamarca, a una altitud de 2660 metros sobre el nivel del mar; con coordenadas UTM 9207098 mN y 777358 mE, en el distrito, provincia y departamento de Cajamarca.

Figura 1

Vista satelital de la ubicación geográfica del experimento.



LEYENDA

- UBICACIÓN:**
CEFOP - CAJAMARCA
- CP_CAJAMARCA
- HIDRO_QUEBRADAS
- HIDRO_RIO
- RED_VIAL_NACIONAL
- DISTRITO_CAJAMARCA
- LÍMITE_DISTRITAL



<p>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA</p>		
<p>"Efecto de la fertilización biológica mixta en el rendimiento de forraje del cultivo de alfalfa (Medicago sativa L.) en el valle Cajamarca, 2025"</p>		
<p>UBICACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN</p>		
<p>ELABORADO POR: Rosa Manuela Vargas Prado</p>	<p>FECHA: AGOSTO 2025</p>	<p>PLANO 01</p>
<p>ASESOR: Dr. Edin Edgardo Alva Plasencia</p>	<p>ESCALA: 1:250,000</p>	
<p>COORDENADAS UTM-WGS84: Este: 777325 - Norte: 9207105</p>		

3.2. Materiales

3.2.1. *Material vegetal*

Cultivo establecido de alfalfa (*Medicago sativa* L.) de 5 años de edad.

3.2.2. *Material biológico*

Rhizobium

Azotobacter

Azospirillum

3.2.3. *Insumos*

Melaza

Agua sin cloro

3.2.4. *Equipos*

Mochila de fumigar manual

Balanza digital

Estufa

Sistema de riego por aspersión

3.2.5. *Herramientas*

Zapapico

Palanas

Hoz

3.2.6. *Otros*

Wincha

Metro cuadrado

Letreros

Estacas

Bolsas de cartón

3.3. Metodología

3.3.1. Variables

a. Variable independiente

Fertilización biológica mixta

b. Variable dependiente

Rendimiento del cultivo de alfalfa

3.3.2. Diseño experimental y arreglo de los tratamientos

Se empleó un diseño experimental de bloques completamente aleatorizado (DBCA), considerando seis tratamientos que incluyeron la aplicación de los microorganismos *Rhizobium*, *Azotobacter* y *Azospirillum*, además de un grupo control sin aplicación de microorganismos; el experimento se estructuró en tres bloques para reducir la variabilidad y mejorar la precisión de los resultados. El modelo estadístico que correspondió a este diseño experimental fue el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + T_i + B_j + E_{ij}$$

Donde:

Y_{ij} = Son las observaciones obtenidas la j -ésima vez que se repite el experimento, con el tratamiento i -ésimo.

μ = Media general

T_i = Efecto del tratamiento i

B_j = Efecto del Bloqueo j

E_{ij} = Efecto del error experimental que se presenta al efectuar la j -ésima observación del i -ésimo tratamiento.

El estudio se realizó en un terreno experimental de 448 m², distribuido en tres bloques de 140 m² cada uno; cada bloque se dividió en siete unidades experimentales de 20 m², y se incorporaron dos calles de 14 m² para facilitar el acceso; se empleó un Diseño de Bloques

Completamente al Azar (DBCA) con tres bloques, donde los tratamientos se asignaron aleatoriamente y cada bloque funcionó como repetición. El experimento incluyó la aplicación de diferentes microorganismos (*Rhizobium*, *Azotobacter*, *Azospirillum* y su combinación), conformando un total de nueve tratamientos con una densidad promedio de 25 matas por metro cuadrado.

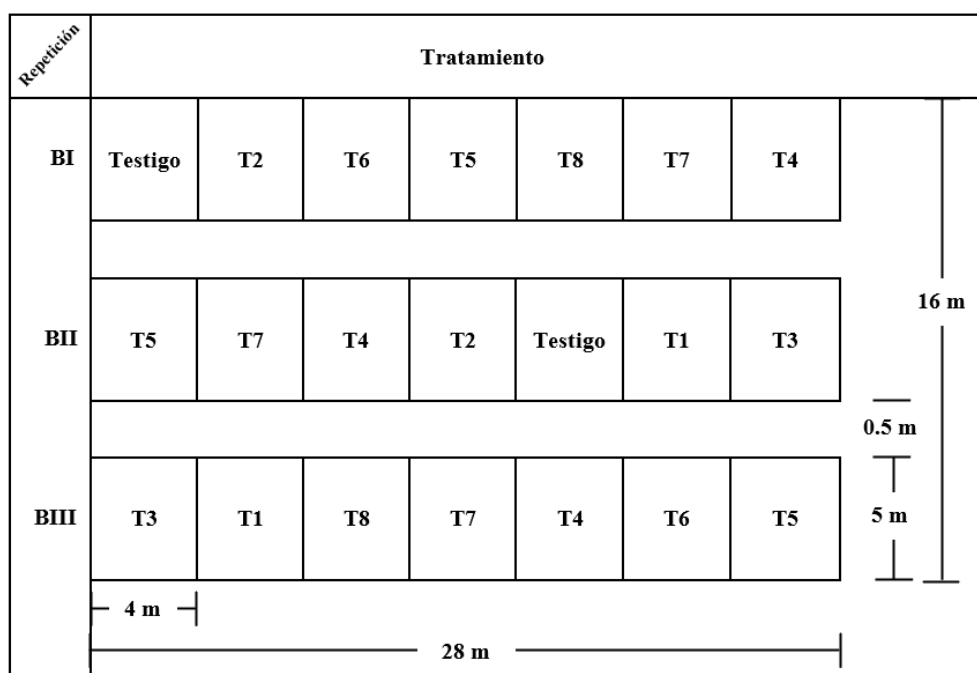
Tabla 1

Arreglo de los tratamientos.

Nº	Tratamiento	Dosis por ha ⁻¹	Dosis por parcela de 20 m ²
1	T1	100 g de <i>Rhizobium</i>	2 g de <i>Rhizobium</i>
2	T2	100 de <i>Azotobacter</i>	2 g de <i>Azotobacter</i>
3	T3	100 g de <i>Azospirillum</i>	2 g de <i>Azospirillum</i>
4	T4	100 g de <i>Rhizobium</i> + 100 g de <i>Azotobacter</i>	2 g de <i>Rhizobium</i> + 2 g de <i>Azotobacter</i>
5	T5	100 g de <i>Rhizobium</i> + 100 g de <i>Azospirillum</i>	2 g de <i>Rhizobium</i> + 2 g de <i>Azospirillum</i>
6	T6	100 g de <i>Rhizobium</i> + 100 g de <i>Azotobacter</i> + 100 g de <i>Azospirillum</i>	2 g de <i>Rhizobium</i> + 2 g de <i>Azotobacter</i> + 2 g de <i>Azospirillum</i>
7	T0 (Testigo)	Sin fertilización	Sin fertilización

Figura 2

Distribución aleatoria de tratamientos según el diseño experimental.



3.3.3. Procedimientos

a. Muestreo y análisis de suelos

El muestreo de suelos se realizó mediante la técnica de zigzag para obtener una muestra representativa del área de estudio, recolectando submuestras hasta una profundidad de 40 cm, las cuales fueron homogeneizadas para conformar una muestra compuesta de 1 kg destinada al análisis de caracterización del suelo y contenido de nitrógeno en el Laboratorio de Suelos de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

Tabla 2

Resultado del Análisis del suelo del cultivo de alfalfa.

pH	CE (dS/m)	CaCO ₃ (%)	M.O. (%)	P (ppm)	K (ppm)	Análisis Mecánico			Clase textural	CIC	% sat. De Bases
						Arena	Limo	Arcilla			
7.04	1.04	3.43	6.07	232.9	407	53	21	26	Fr.Ar.A.	23.04	100

Los resultados del análisis de suelo indican que el suelo del área de estudio presenta un pH de 7.74, clasificándose como ligeramente alcalino; esta condición es característica de suelos con alto contenido de carbonatos, lo cual se confirma con el elevado porcentaje de carbonato de calcio (28.61%), considerado muy alto, evidenciando un suelo marcadamente calcáreo.

La conductividad eléctrica de 1.01 dS/m clasifica al suelo como no salino, indicando que no existe riesgo de salinidad que afecte el crecimiento y desarrollo de los cultivos; el contenido de materia orgánica (3.0%) se ubica en un nivel medio, lo que favorece la actividad microbiana, la estabilidad estructural y la disponibilidad progresiva de nutrientes.

En cuanto a la fertilidad química, el fósforo disponible (14.3 ppm) se encuentra en un nivel medio a alto, mientras que el potasio disponible (253 ppm) presenta un nivel alto; el análisis mecánico mostró una composición de 34% arena, 23% limo y 43% arcilla, clasificando al suelo como franco arcillo arenoso, textura que proporciona buena capacidad de retención de agua y nutrientes, así como condiciones favorables para el desarrollo radicular.

La capacidad de intercambio catiónico (13.60 cmol (+) / kg) corresponde a un nivel medio, lo que indica una moderada capacidad del suelo para retener y suministrar cationes esenciales; finalmente, la saturación de bases del 100% se considera alta, reflejando un predominio de cationes básicos como calcio, magnesio y potasio.

b. Limpieza y eliminación de arvenses

Se realizó el recorte del forraje remanente y el deshierbo manual mediante zapapico para eliminar arvenses de raíz, principalmente diente de león (*Taraxacum officinale*), verdolaga (*Portulaca oleracea*) y rye grass (*Lolium perenne*), reduciendo la competencia con el cultivo de alfalfa y evitando su regeneración, retirándose finalmente el material vegetal del área de cultivo.

c. Instalación del experimento

La instalación del experimento se llevó a cabo mediante la delimitación e identificación de los tratamientos en el área experimental; para ello, se utilizaron estacas, rafia y letreros, asegurando una correcta organización y el reconocimiento de cada tratamiento; la distribución se realizó siguiendo el diseño aleatorio establecido en la imagen 2, lo que garantizó la adecuada asignación de las unidades experimentales; este proceso permitió un desarrollo ordenado del experimento y facilitó la recolección de datos de manera precisa.

d. Preparación del biofertilizante

La preparación del biofertilizante se realizó 48 horas antes de su aplicación; para ello, se activaron los microorganismos *Rhizobium*, *Azotobacter* y *Azospirillum* en 10 litros de agua sin cloro, a los cuales se agregaron 300 gramos de melaza, siguiendo las indicaciones detalladas en la Tabla 1; la mezcla se dejó fermentar hasta el momento de su aplicación.

e. Aplicación fertilización biológica

Se realizaron tres aplicaciones del biofertilizante a los 8, 16 y 24 días después del corte; la aplicación se llevó a cabo en horas de la tarde, cuando la incidencia de los rayos solares fue

baja, con el fin de evitar la inactivación de los microorganismos; para ello, los 10 litros de biofertilizante activados según cada tratamiento se colocaron en una mochila de 20 litros de capacidad, asperjando el producto tanto sobre el rebrote como sobre el suelo.

f. Riego

El abastecimiento de agua se realizó principalmente a través de las precipitaciones de la zona; en caso de ser necesario, se suministró mediante riego presurizado por aspersión cada 8 días, lo que equivalió a cuatro riegos por mes; la irrigación tuvo una duración de 2 horas por zona, cubriendo un radio de 15 metros.

g. Deshierbo de mantenimiento

El deshierbo de mantenimiento se realizó según la incidencia de arvenses en cada una de las unidades experimentales, con el objetivo de evitar la competencia por espacio, luz, agua y nutrientes; la eliminación de las malezas se llevó a cabo de forma manual y, de ser necesario, después del corte del forraje.

3.3.4. Evaluaciones

Se realizaron tres evaluaciones experimentales, con una frecuencia de cada 42 días durante un período de cuatro meses; todas las evaluaciones se llevaron a cabo antes de realizar el corte del forraje maduro.

a. Rendimiento de forraje verde ($t\ ha^{-1}$)

La evaluación del rendimiento de forraje verde se llevó a cabo mediante el lanzamiento de un marco de $1\ m^2$ en cada unidad experimental correspondiente a los tratamientos, dentro de los tres bloques considerados como repeticiones. El material vegetal contenido en el área delimitada fue cortado y pesado utilizando una balanza digital. Posteriormente, los valores obtenidos fueron extrapolados a una hectárea, expresándose los resultados en toneladas de forraje verde por hectárea ($t\ ha^{-1}$).

b. Porcentaje de materia seca

Para determinar el porcentaje de materia seca, se tomaron 100 g de materia verde provenientes del rendimiento por metro cuadrado de cada tratamiento (unidad experimental); posteriormente, las muestras se colocaron en una estufa a 75 °C durante 72 horas para su secado. Una vez deshidratadas, se procedió a pesarlas nuevamente para obtener el peso del pasto seco, y el porcentaje de materia seca se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$MS = \frac{PS}{PV} \times 100$$

Donde:

MS: Materia seca

PS: Peso seco

PV: Peso verde

c. Altura de matas

La altura de las matas se midió con una wincha en cinco matas de alfalfa, seleccionadas aleatoriamente en la parte central de cada unidad experimental (tanto en los tratamientos como en el testigo) para evitar el efecto de borde; la medición se realizó desde el centro de la corona hasta el ápice del tallo más alto de cada planta.

d. Número de tallos maduros por mata

Se realizó un conteo de los tallos en estado maduro de cinco matas de alfalfa, seleccionadas aleatoriamente en la parte central de cada tratamiento; esta selección permitió evitar el efecto de borde en cada unidad experimental.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Según los resultados obtenidos, consignados en las Tablas 11, 12, 13 y 14 del capítulo de anexos (p. 80), los datos fueron sometidos a un análisis de varianza (ANOVA), cuyos procedimientos y resultados se detallan a continuación.

4.1. Rendimiento de forraje verde ($t\ ha^{-1}$)

Tabla 3

Análisis de varianza (ANOVA) para rendimiento de forraje verde de alfalfa en toneladas (t) por hectárea (ha^{-1}) por efecto de la fertilización biológica mixta.

Factores de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F Calculado	p-valor
Bloques	2.81	2	1.4	0.49	0.6268
Tratamientos	337.18	6	56.2	19.45	<0.0001
Error	34.67	12	2.89		
Total	374.66	20			

CV = 7.83 %

El análisis de varianza (ANOVA) aplicado al rendimiento de forraje verde de alfalfa mostró que la fuente de variación “bloques” no presentó significancia estadística (p-valor = 0.6268), lo que indica que no existen diferencias atribuibles a la disposición de los bloques en el experimento; en cambio, la fuente “tratamientos” resultó altamente significativa (p-valor < 0.0001), lo que evidencia que la fertilización biológica mixta ejerció un efecto diferencial y marcado sobre el rendimiento de forraje verde.

El coeficiente de variación (CV) fue de 7.83 %, valor considerado adecuado, lo que confirma la confiabilidad del diseño experimental y la consistencia de los datos obtenidos.

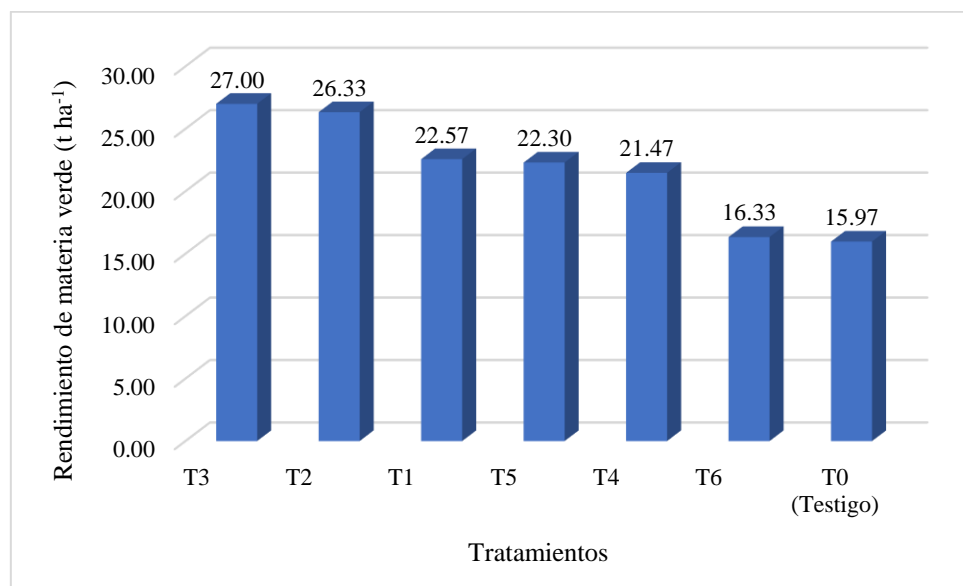
Tabla 4

Prueba de Tukey para rendimiento en toneladas (t) de forraje verde de alfalfa por hectárea (ha^{-1}).

Tratamientos	Rendimiento de forraje verde ($t\ ha^{-1}$)	Agrupamiento
T3	27.00	A
T2	26.33	A
T1	22.57	AB
T5	22.30	AB
T4	21.47	B
T6	16.33	C
T0 (Testigo)	15.97	C

Figura 3

Medias para rendimiento en toneladas (t) por hectárea (ha^{-1}) de forraje verde de alfalfa según tratamiento.



El tratamiento T3 (*Azospirillum*) y el tratamiento T2 (*Azotobacter*) alcanzaron rendimientos de forraje verde de $27.0\ t\ ha^{-1}$ y $26.33\ t\ ha^{-1}$ respectivamente, siendo ambos clasificados en el grupo A; dado que estadísticamente no presentan diferencias significativas entre sí, se concluye que tanto *Azospirillum* como *Azotobacter* ejercen un efecto equivalente y

altamente positivo en la producción de biomasa de alfalfa; estos resultados confirman que la aplicación de cualquiera de estas bacterias constituye una estrategia eficaz para incrementar el rendimiento del cultivo, consolidándose como alternativas de gran relevancia dentro del manejo de la fertilización biológica.

Los tratamientos T1 (*Rhizobium*) y T5 (*Rhizobium* + *Azospirillum*) alcanzaron rendimientos de 22.57 t ha⁻¹ y 22.30 t ha⁻¹ respectivamente, ambos clasificados en el grupo AB; estos resultados muestran que, aunque su efecto fue positivo y superior al testigo, se ubicaron en un nivel intermedio, con un impacto menor que el observado en los tratamientos del grupo A.

El tratamiento T4 (*Rhizobium* + *Azotobacter*) presentó un rendimiento de 21.47 t ha⁻¹ y fue agrupado en el grupo B; este resultado indica que, si bien la combinación de inoculantes mejoró el rendimiento respecto al testigo, su efecto fue inferior al de las aplicaciones individuales de *Azospirillum* y *Azotobacter*.

Los tratamientos T6 (*Rhizobium* + *Azotobacter* + *Azospirillum*) y el testigo registraron los menores rendimientos, con valores de 16.33 t ha⁻¹ y 15.97 t ha⁻¹ respectivamente, ambos agrupados en el grupo C; estos resultados evidencian que la triple combinación de inoculantes no generó un efecto superior al testigo, lo que sugiere posibles interacciones negativas entre las bacterias cuando se aplican de manera conjunta.

Estos resultados concuerdan con Ventura et al. (2024), quienes reportaron una producción de hasta 18.56 t ha⁻¹ de biomasa verde en alfalfa en el cuarto corte mediante el uso de microorganismos eficaces, y con Adrian et al. (2020), quienes obtuvieron 185.83 g m⁻² de forraje verde con estiércol de gallina inoculado con microorganismos, aunque sin diferencias significativas entre tratamientos.

Según Domingues et al. (2020), *Azospirillum* spp. sintetiza auxinas y ácido indolacético que favorecen el desarrollo del sistema radicular, mientras que *Azotobacter* sp. produce

citoquininas, auxinas y giberelinas que actúan como bioestimulantes (Vanderbilt, 2024). Según Villena et al. (2022) señalan que las interacciones entre microorganismos pueden ser tanto cooperativas como competitivas. Asimismo, Méndez (2023) sugiere que, aunque las interacciones sinérgicas son posibles, requieren condiciones específicas y compatibilidad entre las cepas para manifestarse efectivamente.

Bonilla et al. (2021) describen que *Rhizobium* establece una relación simbiótica específica en nódulos radiculares; sin embargo, los resultados indican que, las bacterias de vida libre (*Azospirillum* y *Azotobacter*) ejercieron un efecto más pronunciado sobre el crecimiento vegetativo, debido a sus mecanismos adicionales de promoción del crecimiento más allá de la fijación de nitrógeno.

4.2. Porcentaje de materia seca (%)

Tabla 5

Análisis de varianza (ANOVA) para materia seca de alfalfa en porcentaje (%) por efecto de la fertilización biológica mixta.

Factores de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F Calculado	p-valor
Bloques	4.13	2	2.07	0.8	0.4713
Tratamientos	259.12	6	43.19	16.75	<0.0001
Error	30.94	12	2.58		
Total	294.19	20			

CV = 6.30 %

El análisis de varianza (ANOVA) aplicado al porcentaje de materia seca de alfalfa mostró que la fuente de variación “bloques” no presentó significancia estadística (p-valor = 0.4713), lo que indica que no existen diferencias atribuibles a la disposición de los bloques en el experimento; en contraste, la fuente “tratamientos” resultó altamente significativa (p-valor < 0.0001), evidenciando que la fertilización biológica mixta ejerció un efecto marcado sobre el porcentaje de materia seca.

El coeficiente de variación (CV) fue de 6.30 %, valor considerado adecuado, lo que confirma la confiabilidad del diseño experimental y la consistencia de los datos obtenidos.

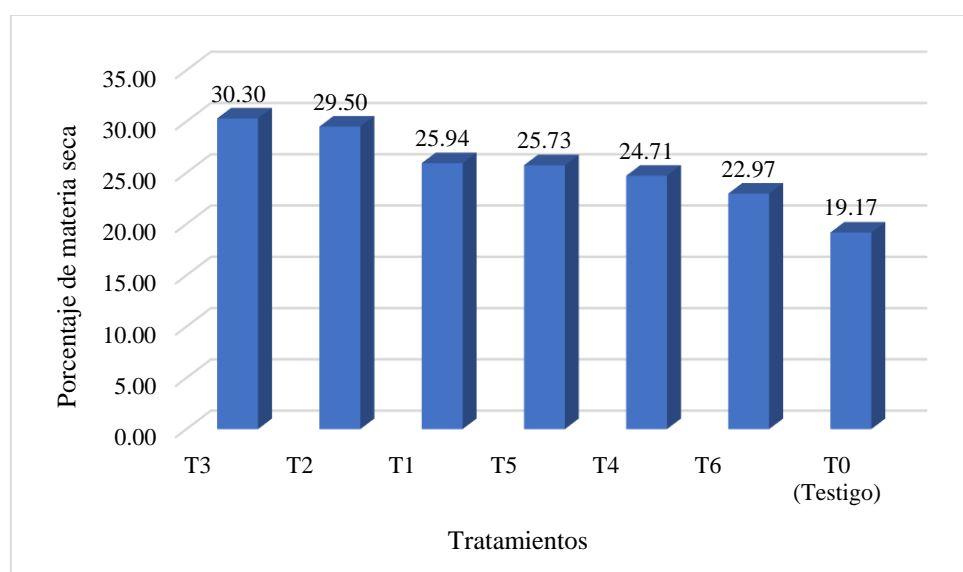
Tabla 6

Prueba de Tukey para porcentaje (%) de materia seca de alfalfa.

Tratamientos	Porcentaje de materia seca	Agrupamiento
T3	30.3	A
T2	29.5	A
T1	25.94	AB
T5	25.73	AB
T4	24.71	B
T6	22.97	BC
T0 (Testigo)	19.17	C

Figura 4

Medias para porcentaje (%) de materia seca de alfalfa según tratamiento.



Los tratamientos T3 (*Azospirillum*) y T2 (*Azotobacter*) alcanzaron porcentajes de materia seca de 30.3 % y 29.5 % respectivamente, siendo ambos clasificados en el grupo A; al no existir diferencias estadísticas entre ellos, se concluye que tanto *Azospirillum* como *Azotobacter* ejercen un efecto equivalente y altamente positivo en la acumulación de materia seca de la alfalfa; estos resultados confirman que la aplicación de cualquiera de estas bacterias

constituye una estrategia eficaz para incrementar la producción de biomasa y mejorar la calidad del cultivo, consolidándose como alternativas de gran relevancia dentro del manejo de la fertilización biológica.

Los tratamientos T1 (*Rhizobium*) y T5 (*Rhizobium* + *Azospirillum*) alcanzaron porcentajes de 25.94 % y 25.73 % respectivamente, ambos clasificados en el grupo AB; estos resultados muestran que, aunque su efecto fue positivo y superior al testigo, se ubicaron en un nivel intermedio, con un impacto menor que el observado en los tratamientos del grupo A.

El tratamiento T4 (*Rhizobium* + *Azotobacter*) presentó un porcentaje de materia seca de 24.71 %, siendo agrupado en el grupo B; este resultado indica que, si bien la combinación de inoculantes mejoró el porcentaje de materia seca respecto al testigo, su efecto fue inferior al de las aplicaciones individuales de *Azospirillum* y *Azotobacter*.

El tratamiento T6 (*Rhizobium* + *Azotobacter* + *Azospirillum*) registró un porcentaje de 22.97 %, clasificado en el grupo BC, mientras que el testigo alcanzó el menor valor con 19.17 %, siendo ubicado en el grupo C; estos resultados evidencian que la triple combinación de inoculantes no generó un efecto superior al testigo, lo que sugiere posibles interacciones menos favorables entre las bacterias cuando se aplican de manera conjunta.

Estos resultados concuerdan con Ventura et al. (2024), quienes reportaron una producción de hasta 6.89 t ha⁻¹ de biomasa seca en alfalfa mediante la aplicación de microorganismos eficaces, así como con Guevara y Pinna (2020), quienes obtuvieron 0.24 kg m⁻² de materia seca con la inoculación de *Sinorhizobium meliloti*. Asimismo, Toniutti y Fornasero (2020) informaron incrementos de 23 a 58% en la producción de materia seca al combinar fertilización fosfatada e inoculación con rizobios, reforzando la evidencia del impacto positivo de la biofertilización.

Olmedo y Surco (2024) señalan que la fertilización biológica optimiza la disponibilidad de macronutrientes esenciales y promueve una mayor actividad metabólica en las plantas. La

acción combinada de bacterias fijadoras de nitrógeno y su capacidad para producir compuestos bioactivos incrementan la eficiencia en la absorción de nutrientes, lo que se traduce en una mayor acumulación de biomasa (Mejía, 2022). Además, según Aguilar (2023), el aumento en la biomasa seca se relaciona con una mayor capacidad fotosintética promovida por la actividad de los microorganismos benéficos en la rizosfera.

Según Moreno et al. (2018) la capacidad de *Azotobacter* sp. para solubilizar fósforo y generar sideróforos, favorece la disponibilidad de hierro y otros nutrientes en el suelo, promoviendo un equilibrio nutricional óptimo que se refleja en una mayor acumulación de materia seca. Similarmente, la producción de fitohormonas por parte de *Azospirillum* spp., particularmente auxinas y ácido indolacético (Domingues et al., 2020), estimula no solo el desarrollo radicular sino también la eficiencia en la conversión de energía lumínica en biomasa.

Según Villena et al. (2022) indican que no todas las interacciones microbianas resultan en sinergias positivas, y que en algunos casos la competencia por recursos o la producción de metabolitos inhibitorios puede reducir la eficiencia de los consorcios microbianos.

4.3. Altura de mata

Tabla 7

Análisis de varianza (ANOVA) para altura de mata de alfalfa en centímetros (cm) por efecto de la fertilización biológica mixta.

Factores de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F Calculado	p-valor
Bloques	16.96	2	8.48	0.39	0.6837
Tratamientos	1199.18	6	199.86	9.25	0.0006
Error	259.33	12	21.61		
Total	1475.48	20			

CV = 5.67 %

El análisis de varianza (ANOVA) aplicado para evaluar la altura de las matas mostró que la fuente de variación denominada “bloque” no presentó significancia estadística (p -valor = 0.6837), dado que este valor supera el umbral de significancia establecido en el 5%; esto evidencia que no existen diferencias relevantes en los resultados de la altura de la planta entre los bloques considerados dentro del experimento.

En contraste, los resultados correspondientes a la fuente “tratamientos” fueron altamente significativos (p -valor < 0.0006), lo que confirma la existencia de diferencias notables entre los tratamientos respecto a su efecto sobre la altura de la planta; en otras palabras, los tratamientos aplicados ejercen una influencia marcada y diferenciada en el crecimiento de la alfalfa, generando un impacto estadísticamente comprobado en su desarrollo.

El coeficiente de variación (CV) obtenido para la altura de planta fue de 5.67 %, valor considerado apropiado, ya que refleja la variabilidad existente dentro de cada tratamiento; asimismo, este resultado respalda la pertinencia del diseño experimental utilizado y demuestra que los datos recopilados poseen consistencia y confiabilidad para sustentar las conclusiones del estudio.

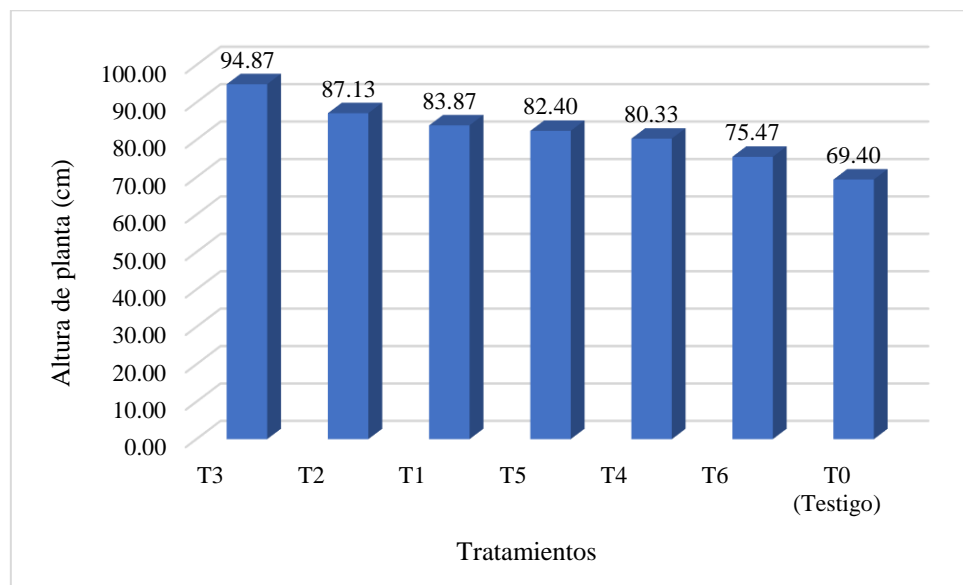
Tabla 8

Prueba de Tukey para altura de mata de alfalfa en centímetros (cm).

Tratamientos	Altura de planta (cm)	Agrupamiento
T3	94.87	A
T2	87.13	AB
T1	83.87	AB
T5	82.4	ABC
T4	80.33	BC
T6	75.47	BC
T0 (Testigo)	69.4	C

Figura 5

Medias para altura de mata de alfalfa en centímetros (cm) según tratamiento.



El tratamiento T3 (*Azospirillum*) registró la mayor altura de planta, alcanzando 94.87 cm y siendo clasificado en el grupo A; este resultado evidencia que la inoculación con *Azospirillum* promovió un crecimiento significativamente superior respecto al testigo, lo que confirma la capacidad de estas bacterias para estimular de manera efectiva el desarrollo de las matas de alfalfa.

Los tratamientos T2 (*Azotobacter*) y T1 (*Rhizobium*) mostraron alturas de planta ligeramente menores que T3, con valores de 87.13 cm y 83.87 cm respectivamente, ambos agrupados en el grupo AB; estos hallazgos indican que la aplicación de *Azotobacter* y *Rhizobium* también generó un efecto positivo en el crecimiento de la alfalfa en comparación con el testigo, aunque su impacto fue menos marcado que el observado con *Azospirillum*.

El tratamiento T5 (*Rhizobium* + *Azospirillum*) alcanzó una altura de 82.4 cm y se ubicó en el grupo ABC; si bien este tratamiento mejoró el crecimiento respecto al testigo, su efecto resultó menos consistente que la aplicación individual de *Azospirillum*, *Azotobacter* o *Rhizobium*, lo que sugiere que la combinación no potencia de manera óptima la respuesta de la planta.

Los tratamientos T4 (*Rhizobium* + *Azotobacter*) y T6 (*Rhizobium* + *Azotobacter* + *Azospirillum*) presentaron alturas de 80.33 cm y 75.47 cm respectivamente, ambos agrupados en el grupo BC; estos resultados reflejan que, aunque las combinaciones de inoculantes ejercieron un efecto positivo frente al testigo, su impacto fue menor en comparación con los tratamientos individuales o con el grupo ABC, lo que evidencia una posible interacción menos favorable entre las bacterias aplicadas en conjunto.

Finalmente, el testigo alcanzó la menor altura de planta con 69.4 cm, siendo clasificado en el grupo C; este resultado confirma que la ausencia de inoculación limitó el crecimiento de la alfalfa, resaltando la importancia de la fertilización biológica como estrategia eficaz para incrementar el rendimiento y mejorar el desarrollo del cultivo.

Estos resultados concuerdan con lo reportado por Guevara y Pinna (2020), quienes observaron mayores alturas con *Sinorhizobium meliloti*, alcanzando 54.53 cm a las cuatro semanas posteriores al corte, y con Ventura et al. (2024), quienes registraron alturas de hasta 81.29 cm en tratamientos con microorganismos eficaces aplicados al follaje. En contraste, Adrian et al. (2020) no encontraron diferencias significativas en altura entre tratamientos, pese a registrar valores de 81.67 cm con estiércol de gallina más microorganismos frente a 65.00 cm en el testigo, lo que difiere de la presente investigación, donde se observaron diferencias altamente significativas ($p = 0.0006$).

Roca (2024) señala que la inoculación con rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal y hongos micorrícicos arbusculares induce la síntesis de auxinas y giberelinas, que regulan el alargamiento celular y el desarrollo del tallo. Este mecanismo explicaría por qué *Azospirillum*, conocido por su alta producción de ácido indolacético (Domingues et al., 2020), mostró el mayor efecto sobre la altura de planta.

Begazo (2023) indica que la altura de las matas está directamente influenciada por la disponibilidad de nutrientes en el suelo y la actividad biológica que mejora su absorción. La

capacidad de *Azospirillum* para fijar nitrógeno de manera asociativa (Ramos, 2018) y de *Azotobacter* para producir bioestimulantes (Vásquez, 2023) incrementa la disponibilidad de nutrientes esenciales para el crecimiento vertical, particularmente nitrógeno, elemento fundamental para la síntesis de clorofila y proteínas estructurales.

4.4. Número de tallos maduros por mata

Tabla 9

Análisis de varianza (ANOVA) para número de tallos maduros por mata de alfalfa por efecto de la fertilización biológica mixta.

Factores de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F Calculado	p-valor
Bloques	23.24	2	11.62	1.09	0.3678
Tratamientos	2289.62	6	381.6	35.75	<0.0001
Error	128.1	12	10.67		
Total	2440.95	20			

CV = 9.79 %

El análisis de varianza (ANOVA) aplicado al número de tallos maduros por mata de alfalfa mostró que la fuente de variación “bloque” no presentó significancia estadística (p-valor = 0.3678), lo que indica que no existen diferencias relevantes entre los bloques considerados en el experimento; en contraste, la fuente “tratamiento” resultó altamente significativa (p-valor < 0.0001), evidenciando que la fertilización biológica mixta ejerció un efecto diferencial y marcado sobre la producción de tallos maduros por mata de alfalfa.

El coeficiente de variación (CV) fue de 9.79 %, valor que se considera aceptable y que respalda la confiabilidad del diseño experimental y la consistencia de los datos obtenidos.

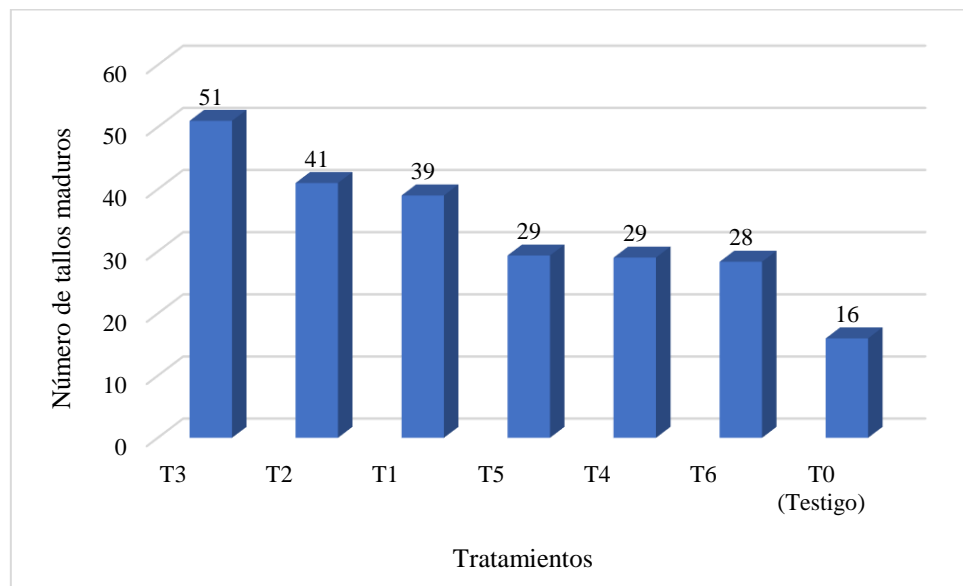
Tabla 10

Prueba de Tukey para número de tallos maduros por mata de alfalfa.

Tratamientos	Número de tallos maduros	Agrupamiento
T3	51	A
T2	41	B
T1	39	B
T5	29	C
T4	29	C
T6	28	C
T0 (Testigo)	16	D

Figura 6

Medias para el número de tallos maduros por mata de alfalfa según tratamiento.



El tratamiento T3 (*Azospirillum*) registró el mayor número de tallos maduros por mata con un promedio de 51, siendo clasificado en el grupo A; este resultado confirma que la aplicación de *Azospirillum* promovió un incremento significativo en la producción de tallos maduros por mata respecto al testigo, lo que evidencia la capacidad de estas bacterias para estimular el desarrollo vegetativo de la alfalfa.

Los tratamientos T2 (*Azotobacter*) y T1 (*Rhizobium*) alcanzaron valores de 41 y 39 tallos maduros por mata respectivamente, ambos agrupados en el grupo B; estos resultados demuestran que la inoculación con *Azotobacter* y *Rhizobium* también generó un efecto positivo en la producción de tallos maduros por mata, aunque en menor magnitud que el observado con *Azospirillum*.

El tratamiento T5 (*Rhizobium* + *Azospirillum*) presentó un promedio de 29.33 tallos maduros por mata, mientras que T4 (*Rhizobium* + *Azotobacter*) y T6 (*Rhizobium* + *Azotobacter* + *Azospirillum*) registraron 29 y 28.33 tallos respectivamente, todos agrupados en el grupo C; estos resultados sugieren que las combinaciones de inoculantes, aunque superiores al testigo, no alcanzaron la eficacia de las aplicaciones individuales, lo que podría indicar interacciones menos favorables entre las bacterias cuando se aplican de manera conjunta.

Finalmente, el testigo mostró el menor número de tallos maduros por mata con un promedio de 16, siendo clasificado en el grupo D; este resultado evidencia que la ausencia de fertilización biológica limitó significativamente la producción de tallos, subrayando la importancia de la inoculación bacteriana como estrategia para mejorar el rendimiento y la productividad del cultivo de alfalfa.

Estos resultados concuerdan con Adrian et al. (2020), quienes reportaron valores de hasta 53 tallos por planta con estiércol de gallina inoculado con microorganismos eficaces, y con Castillo et al. (2014), quienes registraron 441.67 tallos m⁻² al aplicar microorganismos eficaces activados y compost, confirmando la influencia de los biofertilizantes en la emisión de tallos. Asimismo, Ramírez y Condo (2015) reportaron valores menores (26.14 tallos por planta) con *Trichoderma* spp., lo que sugiere que las bacterias fijadoras de nitrógeno y productoras de fitohormonas, como *Azospirillum* y *Azotobacter*, ejercen un efecto más marcado sobre este parámetro.

Según Vanderbilt (2024) el incremento en el número de tallos maduros por mata puede explicarse a través de la producción de citoquininas y otras fitohormonas por parte de los microorganismos inoculados; *Azotobacter* sp. produce citoquininas, auxinas y giberelinas que actúan como bioestimulantes y favorecen el desarrollo vegetativo; las citoquininas específicamente están involucradas en la división celular y la inducción de yemas axilares, proceso fundamental para el macollamiento en leguminosas forrajeras

Rivera (2024) señala que la eficiencia de la fijación de nitrógeno influye directamente en el vigor vegetativo y la capacidad de la planta para generar nuevos brotes; el nitrógeno, siendo un componente esencial de proteínas, ácidos nucleicos y clorofila, resulta limitante para el crecimiento cuando su disponibilidad es insuficiente.

Santoyo et al. (2023) sugieren que la colonización radicular efectiva requiere compatibilidad entre las cepas y condiciones específicas del suelo; en ausencia de estas condiciones óptimas, las combinaciones bacterianas pueden resultar en interacciones competitivas que reducen la eficiencia general del consorcio microbiano.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

La fertilización biológica mixta ejerció un efecto altamente significativo en el rendimiento de biomasa verde; los mayores valores se obtuvieron con *Azospirillum* (27.0 t ha⁻¹ de biomasa verde y 30.3 % de materia seca) y *Azotobacter* (26.33 t ha⁻¹ y 29.5 %), superando ampliamente al testigo (15.97 t ha⁻¹ y 19.17 %).

La fertilización biológica mixta influyó significativamente en la altura de planta; el mayor crecimiento se registró con *Azospirillum* (94.87 cm), seguido por *Azotobacter* (87.13 cm) y *Rhizobium* (83.87 cm), mientras que el testigo presentó la menor altura (69.4 cm).

5.2. Recomendaciones

Evaluar la persistencia y el efecto acumulativo de la inoculación con *Azospirillum* y *Azotobacter* a través de múltiples cortes y ciclos productivos de alfalfa.

Investigar las interacciones específicas entre diferentes cepas bacterianas y sus mecanismos de competencia o sinergismo bajo las condiciones edafoclimáticas del Valle de Cajamarca.

BIBLIOGRAFÍA

- Adrian, W., Matto, N. P., y Ignacio, S. (2020). *Efecto de abonos orgánicos inoculados con em en el rendimiento del forraje del cultivo de alfalfa (Medicago sativa L.) Variedad “Alta Sierra” en condiciones edafoclimáticas de Marías Dos de Mayo, Huánuco*. [Tesis de Grado, Universidad Nacional Hermilio Valdizán]. <https://repositorio.unheval.edu.pe/item/240f9f7d-3a82-4b8d-b2f6-bc984619bcfa>
- Aguado, G. D., Funes, M. I., De Biazzi, F. S., Pisi, G. E., Uliarte, E. M. (2024). Efecto de diferentes espectros e intensidades luminosas de lámparas LED en el crecimiento y desarrollo de plántulas de tomate. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata*. 123. 1-12. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/252838>
- Aguilar, A. (2023). *Efecto de la contaminación del suelo con diferentes concentraciones de petróleo sobre la nodulación por rizobios en plantas de Medicago sativa y sobre su biomasa aérea y subterránea*. [Tesis de Grado, Universidad Nacional Autónoma de México]. <https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000840355/3/0840355.pdf>
- Alarcón, D. A. (2024). *Beneficios de los abonos orgánicos como alternativa para el mejoramiento de la nutrición vegetal*. [Trabajo de Grado, Universidad Técnica de Babahoyo]. <https://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/16241>
- Álvarez, C. R., Bautista, A. L., Sánchez, A. C., Vargas, F., & Mendoza, M. (2024). Evaluación financiera de la producción sustentable de microgreens en cuartos de cultivo a nivel doméstico. *Revista fitotecnia mexicana*, 47(1), 53-61. <https://doi.org/10.35196/rfm.2024.1.53>

- Arana, A. J. (2024). *Eficacia y sinergias entre fertilizantes químicos y orgánicos en la productividad agrícola*. [Trabajo de Grado, Universidad Técnica de Babahoyo].
<https://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/17186>
- Begazo, N. A. (2023). *Evaluación de biofertilizante preparado con residuos hidrobiológicos y su efecto en el rendimiento forrajero y valor nutricional del cultivo de alfalfa moapa 69*. [Tesis de Doctorado, Universidad Católica de Santa María].
<https://repositorio.ucsm.edu.pe/items/f185eccf-360b-40d1-852b-e39e8c50b914>
- Bohórquez, L. G. (2023). *Comparación de diferentes dosis de fertilización orgánica de lixiviado de lombriz en la producción de melón (Cucumis melo) Chongón, Guayas*. [Trabajo de Grado, Universidad Agraria del Ecuador].
<https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/BOH%C3%93RQUEZ%20SILVA%20LUIS%20GABRIEL.pdf>
- Bonilla, R. González, L. E., & Pedraza, R. O. (2021). *Rol de las bacterias promotoras de crecimiento vegetal en sistemas de agricultura sostenible*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – AGROSAVIA.
<https://doi.org/10.21930/agrosavia.analisis.7405019>
- Bouain, N., Krouk, G., Lacombe, B., & Rouached, H. (2019). Getting to the root of plant mineral nutrition: Combinatorial nutrient stresses reveal emergent properties. *Trends in Plant Science*, 24(6), 542–552. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2019.03.008>
- Callisaya, J. C. (2018). *Aplicación de tres láminas de agua con riego por aspersión en el cultivo de la alfalfa en la estación experimental de Choquenaira - La Paz*. [Tesis de Maestría, Universidad Mayor de San Andrés].
<https://repositorio.umsa.bo/xmlui/handle/123456789/18376>

- Calua, V. E. (2024). *Modelo de productividad de la ganadería lechera en la comunidad campesina de Michiquillay, distrito de la encañada año 2022*. [Tesis de Grado, Universidad Nacional de Cajamarca]. <http://190.116.36.86/handle/20.500.14074/7165>
- Castillo, W. N., Sánchez, Y., y Villanueva, J. (2014). *Niveles de microorganismos eficaces y bioabonos en el rendimiento del cultivo de alfalfa (medicago sativa l.), en condiciones agroecológicas de Andabamba-Huánuco*. [Tesis de Grado, Universidad Nacional Hermilio Valdizán]. <https://repositorio.unheval.edu.pe/item/8a538806-4565-44f9-a309-7e97232d106d>
- Cayetano, A. B. (2022). *Efecto de la fertilización fosfatada en el establecimiento y producción de tres variedades de alfalfa*. [Tesis de Grado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. <http://45.231.83.156/handle/20.500.12996/5890>
- Celdrán, M. (2023). *Evaluación de la capacidad bioestimulante de diferentes productos de origen natural*. [Trabajo de Maestría, Universidad Politécnica de Valencia]. <https://riunet.upv.es/handle/10251/200404>
- Chaca, R., y Cruz, J. L. A. (2022). *Influencia de tres variedades de alfalfa (Medicago sativa) sobre la calidad de suelos compactados por pastoreo en Malconga*. [Trabajo de Grado, Universidad de Huánuco]. <https://repositorio.udh.edu.pe/handle/123456789/3785>
- Chicaiza, E. S. y Chuquimarca, T. L. (2024). *Evaluación agronómica de alfalfa (Medicago sativa), achira (Canna indica), y sigse (Cortaderia nitida) para mejoramiento de suelos de la junta de riego Tiliche San José del cantón Latacunga provincia de Cotopaxi*. [Tesis de Grado, Universidad Técnica de Cotopaxi]. <https://repositorio.utc.edu.ec/items/54943d34-f07d-4ad9-b6ae-6cf19d6df52f>
- Coppola, L. (2022). *Coinoculación de micorrizas y rizobacterias promotoras del crecimiento de las plantas desde la germinación hasta los primeros estadios vegetativos del desarrollo del cultivo de maíz*. [Trabajo de Grado, Universidad Nacional del Noroeste

de la Provincia de Buenos Aires].

<https://repositorio.unnoba.edu.ar/xmlui/handle/23601/521>

Corrales, L. C., Caycedo, L., Gómez, M. A., Ramos, S. J., & Rodríguez, J. N. (2017). *Bacillus* spp: una alternativa para la promoción vegetal por dos caminos enzimáticos. *Nueva*, 15 (27), 46-65.

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-

[24702017000100046&lng=en&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-24702017000100046&lng=en&tlng=es)

Cotrina, Y. (2024). *Análisis de la investigación en pastos y forrajes en la región Cajamarca*.

[Tesis de Grado, Universidad Nacional de Cajamarca].

<http://190.116.36.86/handle/20.500.14074/3083>

Cumpa, L. M. S. (2021). *Adaptación de rizobios y bacterias solubilizadoras de fosfato a condiciones salino-alcálinas para el desarrollo de biofertilizantes eficientes para *Lotus tenuis* e identificación de genes bacterianos implicados en la tolerancia a dicha condición*. [Tesis de Doctorado, Universidad de Granada].

<http://hdl.handle.net/10481/70168>

Domingues, C. F., Cecato, U., Trento, T., Mamédio, D., & Galbeiro, S. (2020). *Azospirillum* spp. en gramíneas y forrajeras. *Revisión. Revista mexicana de ciencias pecuarias*, 11(1), 223-240. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v11i1.4951>

Doussoulin, M. (2022). *Evaluación de germoplasma forrajero y caracterización de praderas a través del uso de teledetección y SIG*. [Tesis de Doctorado, Universidad de Córdoba].

<https://helvia.uco.es/handle/10396/22841>

Echeverría, M. L., Franco, M. F., Evangelina Nuñez, E., Diez, P., Garavano, M. E. (2023). Leguminosas forrajeras cultivadas de uso común en el sudeste bonaerense. *Visión Rural* 30 (146): 21-26. <http://hdl.handle.net/20.500.12123/14518>

- Erdozain, S. A. (2024). *Búsqueda a escala genómica de marcadores moleculares de colonización exofítica/endofítica en una bacteria ubicua asociada a plantas: La asociación *Pantoea spp.* – alfalfa*. [Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de La Plata]. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/174979>
- Escobar, C., Montaña, C., Castillo, A., & Roca, L. (2025). A review of plant–microbe interactions in the rhizosphere and the role of root exudates in microbiome engineering. *Applied Sciences*, *15*(13), 7127. <https://doi.org/10.3390/app15137127>
- Espinosa, M. J. (2023). *Estudio del manejo con enfoque agroecológico y convencional sobre microorganismos y propiedades del suelo de un viñedo de Mendoza, Argentina*. [Tesis de Grado, Universidad nacional del cuyo]. https://ica.bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/19282/epinosaaazar-mariajose-tesis.pdf
- Estévez, A. M. (2022). *Biofertilizantes microbianos en la agricultura*. [Trabajo de Maestría, Universidad de Almería]. <https://repositorio.ual.es/handle/10835/17158>
- Ferreira, C. M. H., López, A., Soares, H. M. V. M., & Soares, E. V. (2023). Plant growth-promoting rhizobacteria for sustainable agricultural production. *Microorganisms*, *11*(5), 1088. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11051088>
- Fraão, B. C. (2024). *Producción de biomasa de una levadura nativa en cultivo semicontinuo con potencial aplicación en la industria frutícola*. [Tesis de Grado, Universidad Nacional del Comahue]. <https://rdi.uncoma.edu.ar/handle/uncomaid/18240>
- Garbowski, T., Bar-Michalczyk, D., Charazińska, S., Grabowska, B., Kowalczyk, A., Lochyński, P. (2022). Una visión general de las enmiendas naturales del suelo en la agricultura. *Investigación sobre suelos y labranza. Volumen 225*, 105462. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167198722001489>

- García, A. (2024). Exploración del beneficio ambiental de las prácticas agroecológicas en comunidades campesinas. *ECiencia*, 1(10), 134-149. <https://doi.org/10.71022/vz6fyb18>
- García, P., Martínez, L. B., & Maestre, F. T. (2025). Agroecology and sustainable agriculture: Conceptual challenges and opportunities - A systematic literature review. *Sustainability*, 17(5), 1805. <https://doi.org/10.3390/su17051805>
- Granados, M. (2023). *Caracterización in vitro de bacterias aisladas de suelos del resguardo Andoke, Araracuara, municipio de Solano (Caquetá, Colombia) con posibles mecanismos de promoción del crecimiento vegetal*. [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/85474>
- Grasso, A. y Díaz, M. (2020). *Manual de buenas prácticas de manejo de fertilización*. 2da edición ampliada y actualizada. https://rizobacter.com/sites/default/files/pdf/es/LIBRO_MBPMF_2020.pdf
- Guevara, L. y Pinna, J. (2020). *Influencia de la inoculación con Sinorhizobium meliloti (Rhizobiaceae) y la fertilización nitrogenada sobre el rendimiento de la “alfalfa” “Medicago sativa L., (Fabaceae) en las parcelas del Seminario Mayor San Carlos San Marcelo, Moche-Trujillo: Perú*. [Tesis de Grado, Universidad Privada Antenor Orrego]. <https://core.ac.uk/download/389482725.pdf>
- Haedo, J. (2024). *Mejoramiento del servicio ecosistémico de polinización para el aumento la producción de semillas de alfalfa (Medicago sativa) en el Valle inferior del Río Colorado*. [Tesis de Doctorado, Universidad Nacional del Sur]. https://repositoriodigital.uns.edu.ar/bitstream/handle/123456789/6938/HAEDO%20J.P._TESIS.pdf?sequence=1
- Hernández, R. E. (2022). *Estudio comparativo de alternativas de fertilizantes para los cultivos de Colombia a partir de la aplicación de la biotecnología*. [Trabajo de Especialización,

Fundación Universidad de América].

<https://repository.uamerica.edu.co/server/api/core/bitstreams/efd4bbc3-9a54-40e0-8c59-286fe3dc4b61/content>

Hoyos, E. J. (2024). *Proceso productivo y conocimientos asociados al uso de pastos forrajeros en la comunidad campesina de Cátac – Áncash*. [Tesis de Grado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. <http://45.231.83.156/handle/20.500.12996/6691>

Inglés, A. (2024). *Influencia de la aplicación de microorganismos y de la reducción de fertilizantes sobre la producción y calidad de patata*. [Universidad Politécnica de Cartagena]. <https://repositorio.upct.es/entities/publication/45201757-4c75-4730-9cbd-79ab1f8997fd>

Insuasty, E. B. y Garreta, A. B. (2024). *Evaluación del sistema silvopastoril *Alnus acuminata* + *Cenchrus clandestinus* y praderas de *Cenchrus clandestinus* sobre la disponibilidad y calidad del forraje, producción y calidad de leche en el municipio de Pupiales, Colombia*. [Trabajo de especialización, Universidad Nacional Abierta a Distancia UNAD]. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/65249>

Irisarri, P., Klug, L., Grosso, B., & Quelas, J. I. (2023). Enhancing *Rhizobium*–legume symbiosis and reducing nitrogen fertilizer use are potential options for mitigating climate change. *Agriculture*, 13(11), 2092. <https://doi.org/10.3390/agriculture13112092>

Jiménez, N. (2022). *Simbiosis entre *Rhizobium* y leguminosas para la mejora de la calidad del suelo frente a situaciones adversas*. [Trabajo de Grado, Universidad Politécnica de Valencia]. <https://riunet.upv.es/handle/10251/184909>

Kirkby, E. A. (2023). Introduction, definition, and classification of nutrients. En *Sustainable Plant Nutrition* (pp. 51–70). Academic Press/Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18675-2.00016-2>

- Kuffo, G. E., Piguave, J., Mendoza, J., Bazurto, J. R., & Macías, J. R. (2024). Efectos de la luz y la temperatura en la fotosíntesis y la productividad primaria en ecosistemas marinos. *Revista Científica Multidisciplinar G-Nerando*, 5(2), Pág. 388. <https://doi.org/10.60100/rcmg.v5i2.279>
- Lema, W. I. (2023). *Valoración productiva de un biol y su efecto en la fertilización de la Medicago sativa (Alfalfa Nacional) en la hacienda Pacahuan*. [Trabajo de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/19180>
- Lemache, P. C. (2015). *Utilización de diferentes Té de estiércol en la producción de Medicago sativa (Alfalfa), variedad flor morada*. [Trabajo de Grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba]. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/3924>
- Lloveras, J., Delgado, I., Chocarro, C. (2020). *La alfalfa: agronomía y utilización*. Ediciones de la Universitat de Lleida. <https://www.torrossa.com/en/resources/an/4704301#page=143>
- Macias, M. Y. (2024). *Caracterización bromatológica de 2 variedades de alfalfa (Medicago sativa) sometida a mutación química con Ethyl Methane Sulfonate*. [Tesis de Grado, Universidad Técnica de Babahoyo]. <https://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/16148>
- Mahon, N., Calo, A., & Monaghan, J. (2024). Agroecological approaches to sustainable development. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8, 1405409. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1405409>
- Mamani, A. (2023). Biofertilizantes a base de microorganismos beneficiosos y materia orgánica: una revisión sistemática. *Revista Acciones Médicas*, 2(4), 43-55. <https://doi.org/10.35622/j.ram.2023.04.004>

- Mamani, A. (2024). Biofertilizantes a base de microorganismos beneficiosos y materia orgánica: una revisión sistemática. *Universidad Hipócrates - Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología INUDI*. <https://doi.org/10.35622/inudi.c.02.06>
- Mango, A. (2019). *Inoculación con rizobacterias en Paspalum atratum CV. Cambá FCA. efecto sobre el crecimiento, producción de biomasa y micorrización*. [Tesis de Maestría, Universidad Nacional del Nordeste]. <https://repositorio.unne.edu.ar/handle/123456789/9186>
- Martínez, B. A y Leiva, M. M. (2018). *Estudio comparativo de la producción de forraje y calidad nutricional de variedades de cultivo de alfalfa (Medicago sativa), en la sierra central*. [Tesis de Grado, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/599>
- Martínez, J. P. (2024). *Manejo ecológico del pasto azul mediante la fertilización a base de un biol en la hacienda monte carmelo*. [Trabajo de Grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/22234>
- Martínez, L., Aguilar, C. E., Carcaño, M. G., Galdámez, J., Gutiérrez, A., Morales, J. A., Martínez, F. B., Llaven, J., Gómez, E. (2018). Biofertilización y fertilización química en maíz (*Zea mays* L.) en Villaflores, Chiapas, México. *Siembra*, vol. 5, núm. 1. <https://doi.org/10.29166/siembra.v5i1.1425>
- Mazo, L. F. (2023). *Hongos micorrícicos arbusculares para el mejoramiento de pastos Brachiaria decumbens y Brachiaria brizantha: alternativa sostenible en la ganadería del trópico bajo colombiano*. [Trabajo de Grado, Universidad de Antioquia]. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/37127>
- Mejía, P. A. (2022). *Valoración del uso combinado de mezclas de materiales orgánicos y biofertilización con microorganismos en cultivo sin suelo*. [Tesis Doctoral, Universidad de Almería]. <https://repositorio.ual.es/handle/10835/13796>

- Mellado, P. G., Ramírez, V., & Partida, L. P. (2024). Regulatory mechanisms of plant rhizobacteria on plants to the adaptation of adverse agroclimatic variables. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1377793. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1377793>
- Méndez, D. N. (2023). *El microbioma de la rizosfera y la salud de las plantas*. [Trabajo de Maestría, Universidad de La Laguna]. <https://riull.ull.es/xmlui/handle/915/33264>
- Menghini, M. (2018). *Intersiembrado de leguminosa sobre *Thinopyrum ponticum* como mejoradora de la biomasa forrajera, valor nutricional y estado orgánico del suelo*. [Tesis de Doctorado, Universidad Nacional del Sur]. <https://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/4194>
- Mengoni, A. (2024). *Intensificación de la práctica profesional agronómica en la agencia de extensión rural INTA Coronel Suárez*. [Trabajo de Intensificación, Universidad Nacional del Sur]. <https://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/6865>
- Molina, D., Bustillos, M. R., Rodríguez, O., Morales, Y. E., Santiago, Y., Castañeda, M., Muñoz, J. (2015). Mecanismos de fitoestimulación por rizobacterias, aislamientos en América y potencial biotecnológico. *Biológicas*, 17(2): 24–34. https://www.researchgate.net/profile/Jesus-Munoz-Rojas/publication/293086504_Mecanismos_de_fitoestimulacion_por_rizobacterias_aislamientos_en_America_y_potencial_biotecnologico/links/56b592e808ae44bb330589f0/Mecanismos-de-fitoestimulacion-por-rizobacterias-aislamientos-en-America-y-potencial-biotecnologico.pdf
- Montero, J. (2022). Relación de la radiación solar con la producción de plantas: agroproductivas. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 9(1), 48-62. <https://doi.org/10.53287/oqym7033yy88k>

- Mora, D. N (2022). *Importancia de los brasinoesteroides en la producción del cultivo de arroz (Oryza sativa L.) en zona tropical*. [Trabajo de Grado, Universidad Técnica de Babahoyo]. <https://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/13288>
- Moraga, S. P., Pinto, A., Betancur, M., Rivas, Y., Jofré, M. P., Carcamo, V., Vielma, I., Morales, F. P. (2024). Respuesta morfológica y rendimiento de trigo (*triticum aestivum*) a productos bioestimulantes. (2024). *Revista Científica Cuadernos De Investigación*, 2, 1-12. <https://doi.org/10.59758/rcci.2024.2.e27>
- Mordor Intelligence. (s. f.). *Heno de alfalfa Tamaño del Mercado*. <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/alfalfa-hay-market>
- Moreno, A. (2023). *Evaluación del efecto de la inoculación con cepas de Ensifer meliloti promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) en cultivo de alfalfa en el noroeste de la provincia de buenos aires*. [Tesis de Grado, Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires]. <https://repositorio.unnoba.edu.ar/xmlui/handle/23601/700>
- Moreno, A., Carda, V., Reyes, J. L., Vásquez, J., & Cano, P. (2018). Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal: una alternativa de biofertilización para la agricultura sustentable. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 20 (1), 68-83. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v20n1.73707>
- Moreno, A., Reyes, J. L. (2019). *Tópicos selectos de sustentabilidad, un reto permanente para el nuevo milenio*. 1a. edición. Clave Editorial. https://www.researchgate.net/profile/Edwin-Briceno-Contreras/publication/341358160_Capitulo_VI_Abonos_organicos_una_alternativa_sustentable_en_la_agricultura/links/60bfda58299bf1e6b71b93c4/Capitulo-VI-Abonos-organicos-una-alternativa-sustentable-en-la-agricultura.pdf

- Muriel, C., Blanco-Romero, E., Ruz, L., Prieto, P., & Megías, M. (2021). Metabolic control of nitrogen fixation in rhizobium-legume symbioses. *Science Advances*, 7(7), eabh2433. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abh2433>
- Navarro, I. (2024). *Efectos de la aplicación de CSL en plantas hortícolas para mejorar su crecimiento en diferentes condiciones medioambientales*. [Tesis de doctorado, Universidad Miguel Hernández de Elche]. <https://dspace.umh.es/handle/11000/34065>
- Obando, S. D. (2024). *Caracterización bromatológica de dos variedades de alfalfa (Medicago sativa) sometida a mutación física con rayos gamma*. [Tesis de Grado, Universidad Técnica de Babahoyo]. <https://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/16243>
- Odorizzi, A. S. (2015). *Parámetros genéticos, rendimiento y calidad forrajera en alfalfas (Medicago sativa L.) extremadamente sin reposo con expresión variable del carácter multifoliolado obtenidas por selección fenotípica recurrente*. [Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de Córdoba]. <https://repositorio.inta.gob.ar/handle/20.500.12123/1623>
- Olanrewaju, O. S., Ayangbenro, A. S., Glick, B. R., & Babalola, O. O. (2022). The rhizosphere microbiome: Plant–microbial interactions for resource acquisition. *Journal of Plant Interactions*, 17(1), 997–1012. <https://doi.org/10.1080/17429145.2022.2118020>
- Olmedo, S. A. y Surco, L. (2024). *Evaluación de la actividad nutritiva del bioestimulante líquido elaborado a partir de cerveza residual en el desarrollo de microorganismos benéficos: Trichoderma harzianum Spp, Lactobacillus acidophilus ATCC 4356 y Actinomyces viscosus ATCC 15987*. [Trabajo de Grado, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. <https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/10034>
- Ortiz, W. B. (2020). *Evaluación de consorcios microbianos diseñados sobre el desarrollo del cultivo de tomate (Solanum lycopersicum) bajo invernadero*. [Trabajo de Grado,

- Universidad de Cuenca]. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/items/f8d39424-9fd2-46e6-bfa0-1026fc390f8b>
- Osses, R. G., Masciarelli, O. A., Quiroga, M., Pedranzani, H. E. (2022). *Mitigación del estrés abiótico en *Digitaria eriantha* Steudel cvs. Sudafricana y Mejorada INTA por asociación con *Azospirillum brasilense* cepas Az39 e ipdC*. Universidad Nacional de San Luis; 105-131. <http://hdl.handle.net/11336/205163>
- Oyarvide, H., Arce, T., Loor, W., y Quiñónez, G. (2023). La soja en Ecuador: importancia y alternativas para su producción sustentable con rentabilidad económica. *AGROALIMENTARIA*. Vol. 28, N° 55. <https://doi.org/10.53766/Agroalim/2023.55.02>
- Pacheco, P. J. (2023). *Efecto del cobre sobre la emisión del óxido nitroso procedente de la desnitrificación en la simbiosis rizobio-leguminosa*. [Tesis de Doctorado, Universidad de Granada]. <https://hdl.handle.net/10481/79159>
- Paredes, M. C. (2013). *Fijación biológica de nitrógeno en leguminosas y gramíneas*. [Trabajo de Grado, Universidad Católica Argentina]. <https://repositorio.uca.edu.ar/handle/123456789/393>
- Pérez, A. (2024). *Estimación nutricional de cinco variedades de alfalfa (*Medicago sativa* L.) en la región de Libres Puebla*. [Tesis de Grado, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla]. <https://repositorioinstitucional.buap.mx/items/dc45cc50-9175-4bed-8529-acb013786bac>
- Philippot, L., Chenu, C., Kappler, A., Rillig, M. C., & Fierer, N. (2023). The interplay between microbial communities and soil properties. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1281010. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1281010>
- Pinos, M. C. (2023). *Identificación de cepas bacterianas que intervienen en la solubilización del fósforo como base para procesos de biorremediación*. [Tesis de Grado, Universidad Católica de Cuenca].

<https://dspace.ucacue.edu.ec/server/api/core/bitstreams/76b39656-aaf2-4d3b-9c10-efb537fd29de/content>

Ramírez, C. A., y Condo, L. A. (2015). *Utilización de Trichoderma Spp y humus líquido (tricom humus) como abono foliar en la fertilización de Medicago sativa (alfalfa) y su efecto en los rendimientos productivos*. [Tesis de Grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/5284>

Ramírez, G., Ruiz, J. A., Coria, V. M. (2013). Potencial productivo agrícola del estado de Michoacán. Libro Técnico Núm. 1. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. https://www.researchgate.net/profile/Gabriela-Ojeda/publication/363084394_POTENCIAL_PRODUCTIVO_AGRICOLA_DEL_ESTADO_DE_MICHOACAN/links/630d801d5eed5e4bd12d8c7e/POTENCIAL-PRODUCTIVO-AGRICOLA-DEL-ESTADO-DE-MICHOACAN.pdf

Ramos, C. M., Pérez, S., Guerrero, S., & Palacios, A. (2021). Biofertilización y nanotecnología en la alfalfa (*Medicago sativa* L.) como alternativas para un cultivo sustentable. *Cultivos Tropicales*, 42(2). http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362021000200010&lng=es&tlng=es

Ramos, E. B. (2018). *Investigación de microorganismos promotores del crecimiento vegetal en cultivos de interés agronómico mediante análisis metagenómico y microbiológico*. [Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de La Plata]. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/67081>

Reva, M (2018). *Estudio de la eficacia agrícola de un gel inoculante micorrízico arbuscular ultrapuro de última generación*. [Tesis de Doctorado, Universidad de Córdoba]. <https://helvia.uco.es/handle/10396/23573>

- Reyes, P., Oliveros, J., Racedo, C., & Bernal, A. (2024). Uso de la biodiversidad para mejorar la agricultura: tendencias en la investigación y el mercado en biofertilizantes en Colombia. *Naturaleza Y Sociedad. Desafíos Medioambientales*, *10*, 185-211. <https://doi.org/10.53010/nys10.06>
- Rivera, J. R. (2024). *Efectos de las bacterias nitrificantes en la producción del cultivo de fréjol (Phaseolus vulgaris, L.)*. [Trabajo de Grado, Universidad Técnica de Babahoyo]. <https://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/17205>
- Robe, K., & Barberon, M. (2023). Nutrient carriers at the heart of plant nutrition and sensing. *Current Opinion in Plant Biology*, *74*, 102376. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2023.102376>
- Roca, R. (2024). *Análisis del endobacterioma asociado a Rubus ulmifolius Schott, evaluación del potencial antifúngico del volatilo bacteriano vinculado y estudio de la influencia de cepas de los géneros Arthrobacter y Rhizobium en la variación de la expresión génica relacionada con la tolerancia al estrés oxidativo en el modelo in vivo Caenorhabditis elegans*. [Tesis de Doctorado, Universidad de Salamanca]. <https://gredos.usal.es/handle/10366/160329>
- Rodellar, D. (2019). *Evaluación agronómica de 9 variedades de alfalfa (Medicago sativa L.)*. [Trabajo de Maestría, Universidad de Zaragoza]. <https://zaguan.unizar.es/record/86526#>
- Rosero, L. F. (2010). *Importancia de los sistemas de pastoreo en la producción bovina*. [Trabajo de Especialización, Universidad de Nariño]. <https://sired.udenar.edu.co/11124/>
- Ruiz, J. A., Flores, E. R., Lagorio, P., Villagra, S. (2023). *Innovación e intensificación para la adaptación al cambio climático de la ganadería extensiva familiar: Modelos de*

Producción Sustentable para Regiones Ganaderas en Argentina y Perú. Copyright ©.

https://www.fontagro.org/new/uploads/productos/16680_-_Producto_7.pdf

Salazar, W. R. (2022). *Efecto de dos láminas de riego por aspersion sobre la producción de alfalfa (Medicago sativa L.), en diferentes cortes en la estación experimental Patacamaya.* [Tesis de Grado, Universidad Mayor de San Andrés].
<https://dipgis.umsa.bo/wp-content/uploads/2023/11/T-2993-Salazar.pdf>

Saldaña, B. D. (2024). *Microorganismos endófitos de sistemas agroforestales de café como biofertilizantes potenciales.* [Tesis de Maestría, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas]. <https://repositorio.unicach.mx/handle/20.500.12753/5600>

Sánchez, A. I. (2024). *Efecto del biofertilizante de harina de huesos de pescado en la producción de alfalfa (Medicago sativa L.), en la campiña de Cajamarca.* [Tesis de Grado, Universidad Nacional de Cajamarca].
<https://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/7458>

Sánchez, M. C. (2022). *Presencia de rizobios en Leucaena leucocephala localizada en tres sitios de la península de Santa Elena.* [Trabajo de Grado, Universidad Estatal Península de Santa Elena]. <https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/8856>

Santoyo, M. F., Khalil, A., Carrillo, G., Ortega, H. M., Mancilla, O. R., Rubiños, J. E., López, J. A., Larque, M. U., Haro, G., & Ali, C. A. (2023). Efecto de bacterias promotoras del crecimiento vegetal (*Medicago sativa L.*) en dos tipos de suelo, cobre y composta. *Acta universitaria*, 33, e3569. <https://doi.org/10.15174/au.2023.3569>

Soto, D. C. (2024). *La agricultura familiar sustentable y el uso eficiente del agua en la comunidad campesina de pampas - distrito de colonia - provincia de Yauyos – región Lima.* [Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Federico Villarreal].
<https://repositorio.unfv.edu.pe/handle/20.500.13084/9170>

- Suárez, Z. R., Devescovi, G., Myers, M., & Venturi, V. (2024). Biocontrol of phytopathogens using plant growth promoting rhizobacteria: Bibliometric analysis and systematic review. *Horticulturae*, 11(3), 271. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11030271>
- Supanitsky, A. B. (2022). *Estudio sobre formación de biofilms en bacterias del suelo*. [Tesis de Grado, Universidad de Buenos Aires]. https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/download/tesis/tesis_n7248_Supanitsky.pdf
- Toalombo, A. M. (2024). *Evaluación de tres especies forrajeras con cuatro dosis de ácidos húmicos y fúlvicos (Maquita Humic), en la estrategia cial's. en la parroquia Chugchilán, Cantón Sigchos, Cotopaxi*. [Tesis de Grado, Universidad Técnica de Cotopaxi]. <https://repositorio.utc.edu.ec/items/fa720d61-d7ae-4f10-b09b-4f98e28d6440>
- Toniutti, M. A., & Fornasero, L. V. (2020). Efecto de la inoculación con rizobios y la fertilización fosfatada sobre la nodulación y producción de alfalfa (*Medicago sativa* L.) en el centro de Santa Fe (Argentina). *Agriscientia*, 37(2), 1-10. <https://dx.doi.org/10.31047/1668.298x.v37.n2.24067>
- Troya, D. M. (2024). *Buenas prácticas de manejo agrícola en el establecimiento de pastos mejorados*. [Tesis de Grado, Universidad Técnica de Babahoyo]. <https://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/17238>
- Troya, G., & Pino, V. E. (2023). Microbiota asociada a plantaciones agroforestales de cacao y su impacto en la tolerancia al estrés abiótico. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 8(1), 24–33. <https://doi.org/10.24054/cyta.v8i1.2877>
- Ulloa, M. A. (2024). *Identificación de cepas bacterianas fijadoras de nitrógeno dentro del cepario del CITT para su posterior experimentación en fabricación de biofertilizantes*. [Tesis de Grado, Universidad Católica de Cuenca].

<https://dspace.ucacue.edu.ec/server/api/core/bitstreams/a16457b4-1188-4ccc-a3a9-48513f7aeb08/content>

Vanderbilt, R. A. (2024). *Evaluación de un extracto de Arthrospira máxima sobre la etapa inicial de crecimiento de la berenjena (Solanum melongena L.) bajo condiciones semicontroladas en montería, córdoba*. [Trabajo de Grado, Universidad de Córdoba].

<https://repositorio.unicordoba.edu.co/server/api/core/bitstreams/05ddefa3-15d3-48cc-930a-b7f299400f62/content>

Vargas, M. F., Ocampo, J. D., Canónigo, K. J., y Ortiz, K. M. (2024). *Producción de bioinsumos para mejorar la productividad agrícola de pequeños Agricultores en el municipio de Plato Magdalena*. [Trabajo de Diplomado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD]. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/65854>

Vásquez, A. (2023). *Bacterias Fijadoras de Nitrógeno y Fertilización Nitrogenada Afectan la Producción de Calabacita (Cucúrbita pepo L.) Var. Grey Zucchini Bajo Condiciones de Cubierta Flotante*. <https://repositorio.uaaan.mx/handle/123456789/49135>

Velasco, A., Castellanos, O., Acevedo, G., Aarland, R. C., & Rodríguez, A. (2020). Bacterias rizosféricas con beneficios potenciales en la agricultura. *Terra Latinoamericana*, 38(2), 333-345. Epub 20 de junio de 2020. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i2.470>

Ventura, C. A., Cornejo, A. S., Palacin, P. S., & Jara, F. R. (2024). Efecto de la biofertilización en la biomasa de alfalfa y engorde de cuyes. *Manglar*, 21(1), 41-45. <https://doi.org/10.57188/manglar.2024.004>

Vera, O. D. (2022). *Efecto del residuo de enrofloxacin en el cultivo de alfalfa (Medicago sativa) y en el contenido de nitrógeno en suelo*. [Tesis de Grado, Universidad Nacional de Moquegua]. <https://repositorio.unam.edu.pe/items/3e743dfe-43bf-4b39-9c21-b524d7dcf448>

- Vílchez, J. E. (2024). *Fertilización nitrogenada en la nodulación y el rendimiento de frijol (Phaseolus vulgaris L.) Var. canario centenario en invernadero*. [Tesis de Grado, Universidad Nacional Agraria La Molina].
<http://45.231.83.156/handle/20.500.12996/6585>
- Villena, M., Pabón, C., Mora, A. y López, H. (2022). Fertilización sostenible y Gestión Integral de Nutrientes. *Oficina de Estudios y Políticas Agrarias*.
<https://bibliotecadigital.ciren.cl/server/api/core/bitstreams/4149a490-eec5-4413-a123-10218a8574ca/content>
- Wezel, A., Herren, B. G., Kerr, R. B., Barrios, E., Gonçalves, A. L. R., & Sinclair, F. (2020). Agroecological principles and elements and their implications for transitioning to sustainable food systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 40(4), 40.
<https://doi.org/10.1007/s13593-020-00646-z>

ANEXOS

Tabla 11*Resultados de rendimiento de materia verde (Kg).*

Bloques	Tratamientos						Testigo
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	
BI	2.14	2.64	2.78	2.00	2.17	1.84	1.68
BII	2.25	2.56	2.62	2.34	2.54	1.64	1.53
BIII	2.38	2.70	2.70	2.10	1.98	1.42	1.58

Tabla 12*Resultados de porcentaje de materia seca.*

Bloques	Tratamientos						Testigo
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	
BI	26.44	30.00	30.52	24.42	25.88	21.24	18.02
BII	26.00	28.42	29.94	26.10	24.41	20.72	20.18
BIII	25.38	30.09	30.44	23.62	26.91	26.94	19.32

Tabla 13*Resultados de altura de mata (cm).*

Bloques	Tratamiento						Testigo
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	
BI	84.2	92.8	91.4	73.4	75.6	77.4	70.8
BII	81.0	83.4	97.4	83.2	86.4	77.8	71.8
BIII	86.4	85.2	95.8	84.4	85.2	71.2	65.6

Tabla 14*Resultados de número de tallos maduros por mata de alfalfa.*

Bloques	Tratamiento						Testigo
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	
BI	40	44	54	30	32	27	16
BII	39	40	56	28	25	28	17
BIII	38	39	43	29	31	30	15

Figura 7

Resultados del análisis de suelo.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE AGRONOMIA - DEPARTAMENTO DE SUELOS
LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



ANALISIS DE SUELOS : CARACTERIZACION

Solicitante : ROSA MANUELA VARGAS PRADO

Departamento : CAJAMARCA

Distrito :

Referencia : H.R. 73124-105C-25

Bot.: 4316

Provincia :

Predio :

Fecha : 10/08/2025

Número de Muestra		pH (1:1)	C.E. (1:1) dS/m	CaCO ₃ %	M.O. %	P ppm	K ppm	Análisis Mecánico			Clase Textural	CIC	Cationes Cambiables					Suma de Cationes	Suma de Bases	% Sat. De Bases
Lab	Claves							Arena %	Limo %	Arcilla %			Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	Na ⁺	Al ⁺³ + H ⁺			
8312		7.04	1.04	3.43	6.07	232.9	407	53	21	26	Fr.Ar.A.	23.04	18.49	3.60	0.76	0.18	0.00	23.04	23.04	100

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

Número de Muestra		N %
Lab.	Claves	
8312		0.50



Ing. Braulio La Torre Martínez
Jefe del Laboratorio

Figura 8

Instalación del experimento.



Figura 9

Eliminación de arvenses del área experimental.



Figura 10

Microorganismos Rhizobium, Azospirillum y Azotobacter.



Figura 11

Activación de microorganismos.

**Figura 12**

Evaluación de rendimiento por metro cuadrado.

**Figura 13**

Evaluación de materia seca.

