

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA**



**“EFECTO DEL ABONAMIENTO FOSFORADO EN EL RENDIMIENTO DE LA ASOCIACIÓN RYE GRASS – TRÉBOL EN EL CASERÍO ALTO PALMITO, SAN MIGUEL – CAJAMARCA”**

## **T E S I S**

**Para Optar el Título Profesional de:  
INGENIERO AGRÓNOMO**

**Presentada por la Bachiller:  
YRIS SAMANTY OCAS RASCO**

**Asesor:  
Dr. Ing. Agr. EDIN EDGARDO ALVA PLASENCIA**

**CAJAMARCA – PERÚ**

**2024**



### CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

1. **Investigador:** Yris Samanty Ocas Rasco  
DNI: 76043369  
Escuela Profesional/Unidad UNC: Agronomía
2. **Asesor:** Dr. Edin Edgardo Alva Plasencia  
Facultad/Unidad UNC: Ciencias Agrarias
3. **Grado académico o título profesional:**  
 Bachiller       Título profesional       Segunda especialidad  
 Maestro       Doctor
4. **Tipo de Investigación:**  
 Tesis       Trabajo de investigación       Trabajo de suficiencia profesional  
 Trabajo académico
5. **Título de Trabajo de Investigación:**  
"EFECTO DEL ABONAMIENTO FOSFORADO EN EL RENDIMIENTO DE LA ASOCIACIÓN RYE GRASS – TRÉBOL EN EL CASERÍO ALTO PALMITO, SAN MIGUEL – CAJAMARCA"
6. **Fecha de evaluación:** 02/01/2025
7. **Software antiplagio:**  TURNITIN       URKUND (ORIGINAL) (\*)
8. **Porcentaje de Informe de Similitud:** 19%
9. **Código Documento:** oid:3117:419205874
10. **Resultado de la Evaluación de Similitud:**  
 APROBADO       PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 02/01/2025

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

\* En caso se realizó la evaluación hasta setiembre de 2023



**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 veintisiete días del mes de diciembre del año dos mil veinticuatro, 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° 586-2024-FCA-UNC, de fecha 18 de noviembre del 2024**, con la finalidad de evaluar la sustentación de la **TESIS** titulada: "**EFECTO DEL ABONAMIENTO FOSFORADO EN EL RENDIMIENTO DE LA ASOCIACIÓN RYE GRASS - TRÉBOL EN EL CASERÍO ALTO PALMITO, SAN MIGUEL - CAJAMARCA**", realizada por la Bachiller **YRIS SAMANTY OCAS RASCO** para optar el Título Profesional de **INGENIERO AGRÓNOMO**.

A las doce 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 trece horas y treinta minutos del mismo día, el Presidente del Jurado dio por concluido el Acto de Sustentación.

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Isidro Rimarachín Cabrera  
PRESIDENTE

  
\_\_\_\_\_  
Ing. Mg. Sc. Jhon Anthony Vergara Copacandori  
SECRETARIO

  
\_\_\_\_\_  
Ing. José Lizandro Silva Mego  
VOCAL

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Edin Edgardo Alva Plasencia  
ASESOR

## **DEDICATORIA**

*A Dios, por ser mi guía y fortaleza en todo momento.*

*A mis padres Alejandro y Margarita, y a mi hermano  
Jheyson, por ser mis pilares fundamentales, siempre  
brindándome su confianza y apoyo incondicional.*

## AGRADECIMIENTO

*A Dios, por darme el conocimiento y la fortaleza para superar los desafíos y alcanzar mis metas con éxito.*

*A mis padres Alejandro y Margarita, y a mi hermano Jheyson, por apoyarme en cada decisión y proyecto, por permitirme cumplir con excelencia el desarrollo de esta tesis; les agradezco y hago presente mi gran afecto hacia ustedes.*

*A la Universidad Nacional de Cajamarca y a los docentes de la Escuela Profesional de Agronomía, por contribuir a mi formación académica y profesional.*

*A mi asesor Dr. Ing. Agr. Edin Edgardo Alva Plasencia, por su orientación y tiempo brindado en el desarrollo de esta tesis.*

*Al Dr. Jorge Piedra Flores, responsable del proyecto “Estrategias Tecnológicas Para Incrementar la Calidad del Suelo, Pasturas y Leche en la Región Cajamarca”, por brindarme la oportunidad para realizar esta tesis.*

*Y a todas las personas, que de una u otra manera estuvieron vinculadas en la realización de la presente tesis.*

## ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE ANEXOS	xii
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Descripción del problema	2
1.2 Formulación del problema	3
1.3 Justificación	4
1.4 Objetivos	5
1.4.1 <i>Objetivo general</i>	5
1.4.2 <i>Objetivos específicos</i>	5
1.5 Hipótesis	5
CAPÍTULO II: REVISIÓN DE LITERATURA	6
2.1 Antecedentes	6
2.1.1 <i>A nivel internacional</i>	6
2.1.2 <i>A nivel nacional</i>	8
2.1.3 <i>A nivel local</i>	10
2.2 Bases teóricas	11
2.2.1 <i>Asociación de especies forrajeras</i>	11
2.2.2 <i>Origen, distribución y taxonomía del rye grass italiano (Lolium multiflorum L.)</i>	12
2.2.3 <i>Origen, distribución y taxonomía del trébol blanco (Trifolium repens L.)</i>	17
2.2.4 <i>Fósforo</i>	22
2.2.5 <i>Abonamiento o fertilización fosforada</i>	29
2.2.6 <i>Rendimiento de cultivos forrajeros</i>	33
2.3 Definición de términos	35

<b>CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>37</b>
<b>3.1 Ubicación</b>	<b>37</b>
<b>3.2 Materiales</b>	<b>39</b>
<i>3.2.1 Material biológico</i>	<b>39</b>
<i>3.2.2 Materiales de campo</i>	<b>39</b>
<i>3.2.3 Materiales de laboratorio</i>	<b>40</b>
<i>3.2.4 Materiales de escritorio</i>	<b>40</b>
<i>3.2.5 Equipos</i>	<b>40</b>
<i>3.2.6 Insumos</i>	<b>41</b>
<b>3.3 Metodología</b>	<b>41</b>
<i>3.3.1 Tratamientos de estudio</i>	<b>41</b>
<i>3.3.2 Diseño experimental</i>	<b>41</b>
<i>3.3.3 Conducción del experimento</i>	<b>43</b>
<i>3.3.4 Variables evaluadas</i>	<b>47</b>
<i>3.3.5 Procesamiento y análisis de datos</i>	<b>49</b>
<b>CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>50</b>
<b>4.1 Altura de planta (cm) a una frecuencia de corte de 60 días</b>	<b>50</b>
<b>4.2 Altura de planta (cm), en función de los tratamientos y la frecuencia de corte</b>	<b>53</b>
<b>4.3 Rendimiento de materia verde (kg ha<sup>-1</sup>) a una frecuencia de corte de 60 días</b>	<b>55</b>
<b>4.4 Rendimiento de materia verde (kg ha<sup>-1</sup>), en función de los tratamientos y la frecuencia de corte</b>	<b>59</b>
<b>4.5 Rendimiento de materia seca (kg ha<sup>-1</sup>) a una frecuencia de corte de 60 días</b>	<b>61</b>
<b>4.6 Rendimiento de materia seca (kg ha<sup>-1</sup>), en función de los tratamientos y la frecuencia de corte</b>	<b>65</b>
<b>CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>68</b>
<b>5.1 Conclusiones</b>	<b>68</b>
<b>5.2 Recomendaciones</b>	<b>69</b>
<b>CAPÍTULO VI: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>70</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>92</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Título	Página
1	<i>Requerimientos edafoclimáticos del rye grass italiano (Lolium multiflorum L.)</i>	14
2	<i>Requerimientos edafoclimáticos del trébol blanco (Trifolium repens L.)</i>	19
3	<i>Niveles de fósforo disponible en el suelo (Olsen modificado)</i>	26
4	<i>Propiedades físicas y químicas del superfosfato triple de calcio (SFT)</i>	31
5	<i>Propiedades físicas y químicas del fosfato diamónico (DAP)</i>	31
6	<i>Propiedades físicas y químicas de la roca fosfórica (RF)</i>	33
7	<i>Descripción de los tratamientos de estudio</i>	41
8	<i>Resultados e interpretación del análisis físico – químico de suelos del campo experimental</i>	43
9	<i>Calidad de semilla empleada en la siembra</i>	44
10	<i>Cantidad de fertilizante aplicado en cada parcela experimental</i>	46
11	<i>Cantidad de semilla distribuida por parcela experimental</i>	46
12	<i>Análisis de varianza (ANOVA) para la altura de planta (AP) de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia a una frecuencia de corte de 60 días</i>	50
13	<i>Prueba de Tukey al 5% para la altura de planta (AP) de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia a una frecuencia de corte de 60 días</i>	51
14	<i>Análisis de varianza (ANOVA) para el rendimiento de materia verde (RMV) de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia a una frecuencia de corte de 60 días</i>	56
15	<i>Prueba de Tukey al 5% para el rendimiento de materia verde (RMV) de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia a una frecuencia de corte de 60 días</i>	57
16	<i>Análisis de varianza (ANOVA) para el rendimiento de materia seca (RMS) de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia a una frecuencia de corte de 60 días</i>	62
17	<i>Prueba de Tukey al 5% para el rendimiento de materia seca (RMS) de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia a una frecuencia de corte de 60 días</i>	63
18	<i>Altura de planta (cm) de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia a una frecuencia de corte de 30 días</i>	92

19	<i>Altura de planta (cm) de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia a una frecuencia de corte de 45 días</i>	92
20	<i>Altura de planta (cm) de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia a una frecuencia de corte de 60 días</i>	93
21	<i>Altura de planta (cm) de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia a una frecuencia de corte de 75 días</i>	93
22	<i>Rendimiento de materia verde (kg ha<sup>-1</sup>) de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia a una frecuencia de corte de 30 días</i>	93
23	<i>Rendimiento de materia verde (kg ha<sup>-1</sup>) de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia a una frecuencia de corte de 45 días</i>	94
24	<i>Rendimiento de materia verde (kg ha<sup>-1</sup>) de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia a una frecuencia de corte de 60 días</i>	94
25	<i>Rendimiento de materia verde (kg ha<sup>-1</sup>) de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia a una frecuencia de corte de 75 días</i>	94
26	<i>Rendimiento de materia seca (kg ha<sup>-1</sup>) de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia a una frecuencia de corte de 30 días</i>	95
27	<i>Rendimiento de materia seca (kg ha<sup>-1</sup>) de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia a una frecuencia de corte de 45 días</i>	95
28	<i>Rendimiento de materia seca (kg ha<sup>-1</sup>) de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia a una frecuencia de corte de 60 días</i>	95
29	<i>Rendimiento de materia seca (kg ha<sup>-1</sup>) de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia a una frecuencia de corte de 75 días</i>	96

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Título</b>	<b>Página</b>
1	<i>Ubicación del campo experimental en el caserío Alto Palmito, distrito de Calquis, provincia de San Miguel y departamento de Cajamarca – Perú.</i>	38
2	<i>Datos meteorológicos promedio mensuales registrados durante el periodo de la investigación (diciembre 2023 – mayo 2024).</i>	39
3	<i>Distribución de tratamientos en el campo experimental.</i>	42
4	<i>Distribución de la frecuencia de corte en cada unidad experimental.</i>	47
5	<i>Efecto de los tratamientos sobre la altura de planta (AP) de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia a una frecuencia de corte de 60 días.</i>	52
6	<i>Altura de planta (AP) de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia, en función de los tratamientos y la frecuencia de corte.</i>	54
7	<i>Efecto de los tratamientos sobre el rendimiento de materia verde (RMV) de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia a una frecuencia de corte de 60 días.</i>	57
8	<i>Rendimiento de materia verde (RMV) de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia, en función de los tratamientos y la frecuencia de corte.</i>	60
9	<i>Efecto de los tratamientos sobre el rendimiento de materia seca (RMS) de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia a una frecuencia de corte de 60 días.</i>	63
10	<i>Rendimiento de materia seca (RMS) de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia, en función de los tratamientos y la frecuencia de corte.</i>	66
11	<i>Resultados e interpretación del análisis físico – químico de suelos del campo experimental</i>	97
12	<i>Prueba de germinación en placas Petri en dos repeticiones. A: Semilla de rye grass Ecotipo Cajamarquino. B: Semilla de trébol blanco Huia.</i>	98
13	<i>Delimitación y trazado de parcelas en el campo experimental.</i>	98
14	<i>Primer corte o corte de limpieza a los 90 días después de la siembra.</i>	99
15	<i>Evaluación de variables en el campo experimental. A: Altura de planta. B: Pesaje de la muestra de materia verde.</i>	99
16	<i>Fase de laboratorio. A: Pesaje de muestras antes de ingresar a la estufa. B: Colocación de las muestras a la estufa.</i>	100

17	<i>Fase de laboratorio. A: Pesaje de las muestras después de salir de la estufa. B: Bolsa de papel con la muestra de materia seca.</i>	100
----	--	-----

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>Anexo</b>	<b>Título</b>	<b>Página</b>
<b>1</b>	<b><i>Datos promedio de las variables evaluadas</i></b>	<b>92</b>
<b>2</b>	<b><i>Análisis de suelos</i></b>	<b>97</b>
<b>3</b>	<b><i>Panel fotográfico</i></b>	<b>98</b>

## RESUMEN

La presente investigación se realizó con el objetivo de evaluar el efecto del abonamiento fosforado en el rendimiento de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia en el caserío Alto Palmito, San Miguel – Cajamarca, entre diciembre de 2023 y mayo de 2024. El área de estudio se ubicó a una altitud de 2537 m s. n. m., con un clima semiseco y templado, una temperatura media anual de 15.40 °C, una humedad relativa media anual de 82% y una precipitación media anual de 816 mm. Para el experimento se empleó el diseño de bloques completos al azar (DBCA) con 4 tratamientos (superfosfato triple de calcio, fosfato diamónico y roca fosfórica en dosis de 80 kg P ha<sup>-1</sup> y un testigo) en 3 repeticiones, y se evaluaron las variables de altura de planta (AP), rendimiento de materia verde (RMV) y rendimiento de materia seca (RMS) a los 30, 45, 60 y 75 días del primer corte, el análisis estadístico se realizó mediante ANOVA y la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ). Los resultados mostraron diferencias significativas entre los tratamientos fosforados en comparación con el testigo a los 60 días del primer corte. El tratamiento con fosfato diamónico registró la mayor altura de planta con 46.22 cm; mientras que, la roca fosfórica produjo los mayores rendimientos de materia verde y seca, con 23,057.78 kg ha<sup>-1</sup> y 5,459.64 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. El abonamiento fosforado resultó ser efectivo en todas las variables evaluadas, destacando la superioridad del fosfato diamónico en altura de planta y la roca fosfórica en rendimiento de materia verde y seca.

*Palabras clave:* abonamiento fosforado, rendimiento, asociación, rye grass, trébol blanco

## ABSTRACT

This research was carried out with the aim of evaluating the effect of phosphorus fertilization on the yield of the association rye grass Ecotype Cajamarquino – white clover Huia in the Alto Palmito hamlet, San Miguel – Cajamarca, between December 2023 and May 2024. The study area was located at an altitude of 2537 m a. s. l., with a semi-dry and temperate climate, an average annual temperature of 15.40 °C, an average annual relative humidity of 82% and an average annual rainfall of 816 mm. For the experiment, the randomized complete block design (RCBD) was used with 4 treatments (triple calcium superphosphate, diammonium phosphate and phosphate rock at a dose of 80 kg P ha<sup>-1</sup> and a control) in 3 repetitions, and the variables plant height (PH), green matter yield (GMY) and dry matter yield (DMY) were evaluated at 30, 45, 60 and 75 days after the first cutting, the statistical analysis was performed using ANOVA and the Tukey test ( $p \leq 0.05$ ). The results showed significant differences between the phosphorus treatments with respect to the control at 60 days after the first cutting. The diammonium phosphate treatment recorded the highest plant height with 46.22 cm; while, the phosphate rock treatment produced the highest green and dry matter yields, with 23,057.78 kg ha<sup>-1</sup> and 5,459.64 kg ha<sup>-1</sup>, respectively. Phosphate fertilizer proved to be effective in all the variables evaluated, highlighting the superiority of diammonium phosphate in plant height and phosphate rock in green and dry matter yield.

*Keywords:* phosphorus fertilization, yield, association, rye grass, white clover

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

Los pastizales, que involucran los ecosistemas de praderas y pasturas, representan alrededor del 70% de las tierras agrícolas de todo el mundo y desempeñan un papel primordial en la seguridad alimentaria, la economía y la ecología debido a su adaptabilidad (Demagnet, 2009; Loka et al., 2018), rendimiento y persistencia (Kemešytė et al., 2023). Las pasturas y/o cultivos forrajeros basados en asociación de rye grass anual o italiano (*Lolium multiflorum* L.) (Ertekin et al., 2022) y trébol blanco (*Trifolium repens* L.) (Bo et al., 2022; Demagnet, 2008c), son ampliamente utilizados en las regiones templadas del mundo debido a su establecimiento rápido, alta palatabilidad y digestibilidad, alto rendimiento y calidad de forraje, y persistencia a diversos métodos de pastoreo (Demagnet, 2008c; Villar et al., 2014). Sin embargo, el rendimiento de estas especies forrajeras se ve afectado por el nivel de pastoreo, el estrés ambiental, las condiciones del suelo y la baja disponibilidad de nutrientes esenciales como el fósforo (Carrasco et al., 2024; Noulas et al., 2023).

El fósforo (P) es un macronutriente esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas, y el rendimiento y calidad de los cultivos agrícolas (Khan et al., 2023; Malhotra et al., 2018), tanto en gramíneas como en leguminosas (L. A. Vallejos, 2009). La deficiencia de este nutriente en el suelo reduce el desarrollo de las raíces, el crecimiento y desarrollo general de las plantas y el rendimiento y calidad en pastizales y sistemas agrícolas (Johan et al., 2021; Karpinska et al., 2024; Malhotra et al., 2018). Se estima que alrededor del 50% de los suelos agrícolas del mundo son deficientes en fósforo (P) (Heuer et al., 2017), lo que resulta en una grave limitación del rendimiento de los cultivos y plantea un riesgo sustancial para la seguridad alimentaria mundial (Khan et al., 2023).

En este contexto, la aplicación de fertilizantes que contienen fósforo (P) ha sido y es la clave para incrementar la producción global de alimentos, con notables contribuciones a una

mayor productividad agrícola y seguridad alimentaria (Sharifi et al., 2024). Muchos estudios señalan que el abonamiento con fósforo aumenta el potencial del rendimiento de los cultivos forrajeros (Bacchi et al., 2021; Cevallos, 2015; Mejía, 2022). De hecho, a nivel mundial existe un excesivo uso de los fertilizantes fosforados, principalmente en algunos países occidentales y asiáticos como China, Japón y Corea; sin embargo, en muchos países de América Latina existe grandes déficits crecientes de fósforo, ya sea debido a una insuficiente reposición de fósforo en los sistemas agrícolas por la falta de accesos a los insumos agrícolas (fertilizantes) o debido a las propiedades del suelo que fijan el fósforo haciendo que no esté disponible para las plantas (Heuer et al., 2017).

En el Perú, el fósforo es el nutriente más limitante en todos los suelos de la sierra y por ende en Cajamarca (L. A. Vallejos, 2009); así mismo, el uso de este nutriente en forrajes para los sistemas de producción ganadera altoandina es poco frecuente (Terroba et al., 2024); por lo que, es necesario poner especial atención en el manejo de la fertilización y/o abonamiento, para mantener niveles adecuados de nutrientes en el suelo, prevenir el uso excesivo de fertilizantes y obtener altos rendimientos y buena calidad nutritiva de los recursos forrajeros (Farfán y Farfán, 2012; Noulas et al., 2023).

Frente a esta realidad, la presente investigación tiene como propósito evaluar el efecto del abonamiento fosforado en el rendimiento de la asociación rye grass – trébol blanco en el caserío Alto Palmito, San Miguel – Cajamarca.

## **1.1 Descripción del problema**

La producción de pastos juega un papel importante en los sistemas de producción ganadera en todo el mundo (Kemešytė et al., 2023). En general, los sistemas de producción de forrajes muchas veces resultan en pastos improductivos desde el punto de vista agrícola, en gran medida debido al bajo rendimiento causado por la baja fertilidad de los suelos, especialmente donde los niveles de fósforo son limitados (Jaramillo et al., 2021). Cabe resaltar

que, en el Perú, la mayoría de los suelos destinados a la producción de forraje son pobres ya que presentan una baja fertilidad natural, con bajo contenido de fósforo disponible, con pH ácido y con alta saturación de aluminio (Farfán y Farfán, 2012; Pashanasi et al., 2012), lo que ocasiona una disminución en la producción de forraje y dificulta gravemente la sostenibilidad de la agricultura nacional (Terroba et al., 2024). Por otro lado, en la región Cajamarca, donde existe un buen potencial forrajero a base de rye grass – trébol blanco como fuente de alimentación para la producción de ganado lechero, solamente el 1% de los productores fertilizan sus pasturas (L. A. Vallejos, 2009); del mismo modo, en la provincia de San Miguel esta situación es aún más crítica debido a que las pasturas son manejadas sin criterio técnico como el sobrepastoreo, la falta siembra y resiembra, el escaso o cero abonamiento, entre otros, lo que ha conducido a una reducción del potencial forrajero. Para resolver este problema, se recomienda hacer uso de prácticas de abonamiento fosforado ajustando la dosis adecuada que asegure la estabilidad sin provocar efectos negativos para el medio ambiente (Terroba et al., 2024), siendo el abonamiento con fósforo una herramienta probada y útil para incrementar la disponibilidad de fósforo en el suelo, la concentración en las plantas y, consecuentemente, el rendimiento de forraje (Malhotra et al., 2018; Marino, 2023).

## **1.2 Formulación del problema**

¿Cuál es el efecto del abonamiento fosforado en el rendimiento de la asociación rye grass – trébol en el caserío Alto Palmito, San Miguel – Cajamarca?

## **1.3 Justificación**

El abonamiento fosforado desempeña un papel importante en la producción forrajera de pasturas (Marino, 2023), especialmente en cultivos asociados de rye grass y trébol blanco (L. A. Vallejos, 2009). Estudios previos recientes señalan que el fósforo es un nutriente vital para el crecimiento y la productividad de las plantas (Malhotra et al., 2018), y su efecto se ve reflejado en el aumento del rendimiento de materia verde y seca (Cevallos, 2015; Mejía, 2022;

Torres, 2022); lo que justifica el interés en estudiar este aspecto en una región como Cajamarca, específicamente en el caserío Alto Palmito en la provincia de San Miguel, donde los suelos de las tierras agrícolas generalmente presentan bajos niveles de fósforo disponible (L. A. Vallejos, 2009). Esta investigación busca contribuir al conocimiento sobre cómo se puede mejorar la productividad de las pasturas mediante el efecto de distintas fuentes fosforadas como superfosfato triple de calcio, fosfato diamónico y roca fosfórica. Asimismo, puede abrir la puerta a futuras investigaciones sobre la interrelación del fósforo con otros nutrientes (N y K) para lograr un abonamiento más eficiente con un enfoque ecológico. Frente a los problemas identificados en el rendimiento de pasturas se podría implementar prácticas de manejo agronómico que incluyan una utilización eficaz y equilibrada de fertilizantes para la seguridad alimentaria local, nacional y mundial (Heuer et al., 2017).

La utilización de diferentes fuentes fosforadas permite identificar el fertilizante más eficiente en términos de rendimiento y costo, mejorando la producción de forrajes en los sistemas ganaderos de la región. Este estudio es relevante porque brinda datos prácticos para los productores locales, permitiendo tomar decisiones correctas basadas en datos reales sobre prácticas de abonamiento en función del tipo de cultivo y la frecuencia de corte con la finalidad de generar un impacto positivo en el rendimiento y calidad de los sistemas agropecuarios.

Esta investigación será de gran utilidad para las entidades públicas y privadas encargadas de promover el desarrollo agrícola en la región Cajamarca y más allá mediante las actividades y programas de extensión, proyección y responsabilidad social, y las cooperativas ganaderas locales; también, servirá como fuente de consulta para estudiantes e investigadores como referente para futuras investigaciones. En lo personal, permite fortalecer mis conocimientos y expandir mis competencias profesionales para entender a fondo los desafíos y oportunidades que enfrenta la producción forrajera y proponer soluciones prácticas y efectivas para ser implementadas en las zonas altoandinas a nivel local y regional.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo general**

Evaluar el efecto del abonamiento fosforado en el rendimiento de la asociación rye grass – trébol en el caserío Alto Palmito, San Miguel – Cajamarca.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Determinar el efecto del superfosfato triple de calcio, fosfato diamónico y roca fosfórica en la altura de planta de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia.
- Determinar el efecto del superfosfato triple de calcio, fosfato diamónico y roca fosfórica en el rendimiento de materia verde de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia.
- Determinar el efecto del superfosfato triple de calcio, fosfato diamónico y roca fosfórica en el rendimiento de materia seca de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia.

## **1.5 Hipótesis**

Las diferentes fuentes fosforadas (superfosfato triple de calcio, fosfato diamónico y roca fosfórica) influyen de manera significativa en el rendimiento de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia.

## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 2.1 Antecedentes

##### 2.1.1 *A nivel internacional*

Cevallos (2015) en su investigación “*Rendimiento de biomasa de dos variedades de ryegrass a tres fuentes de fósforo en la zona Cayambe, provincia de Pichincha*”, determinó el comportamiento agronómico de dos variedades de ryegrass respecto a tres fuentes de fósforo. Utilizó el diseño experimental de bloques completos al azar (DBCA) con arreglo factorial A x B (variedades de ryegrass por fuentes fosfóricas), con 4 repeticiones, en el estudio empleó una dosis de 75 kg P ha<sup>-1</sup>. La investigación reveló que, en promedio, el uso de harina de hueso alcanzó una altura de planta de 76.39 cm, con roca fosfórica 65.50 cm, con superfosfato triple 65.44 cm y sin aplicación 39.76 cm en las variedades de ryegrass Amazon y Pichincha; respecto al rendimiento de materia verde, el tratamiento con harina de hueso obtuvo 58,200.00 kg MV ha<sup>-1</sup>, con superfosfato triple 47,700.00 kg MV ha<sup>-1</sup>, con roca fosfórica 44,200.00 kg MV ha<sup>-1</sup> y sin aplicación 23,100.00 kg MV ha<sup>-1</sup>; en cuanto al rendimiento de materia seca, con la aplicación de harina de hueso obtuvo 11,600.00 kg MS ha<sup>-1</sup>, con superfosfato triple 9,500.00 kg MS ha<sup>-1</sup>, con roca fosfórica 8,800.00 kg MS ha<sup>-1</sup> y sin aplicación 4,800.00 kg MS ha<sup>-1</sup> en ambas variedades. El superfosfato triple y la roca fosfórica resultaron ser ligeramente menos eficaces que la harina de hueso en las variables evaluadas; sin embargo, ambas fuentes superaron ampliamente al tratamiento sin aplicación.

Bacchi et al. (2021) en su artículo “*Potencial forrajero de cultivos intercalados de cereales y leguminosas: rendimiento agronómico, producción, calidad de forraje y LER en dos épocas de cosecha en un entorno mediterráneo*”, evaluaron el potencial de monocultivos como de cultivos intercalados para mejorar el rendimiento y la calidad de siete forrajes anuales (avena cv. Argentina, ryegrass cv. Elunaria, triticale cv. Catria, cebada cv. Aldebaran, guisante cv.

Hardy, trébol de Alejandría cv. Lilibeo y veza común cv. Mirabella) en la granja experimental de la Universidad Mediterránea de Reggio Calabria, situada en Gallina, Reggio Calabria – Italia. Adoptaron el diseño experimental de bloques al azar con 19 tratamientos (7 cultivos puros y 12 cultivos intercalados), en 3 repeticiones, aplicó una dosis de 36 kg N ha<sup>-1</sup> y 92 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> como fosfato diamónico, y se evaluaron 2 cosechas a los 146 y 179 días de la siembra. Los resultados indicaron que, en la primera cosecha, la avena y la veza común alcanzaron las mayores alturas con 90 cm y 80 cm, respectivamente; mientras que, el ryegrass y el trébol fueron los más bajos con 64 cm y 55 cm. En cuanto al rendimiento de biomasa, los cultivos intercalados avena – veza registraron el mayor con 8,520.00 kg MS ha<sup>-1</sup>, y el ryegrass – trébol el menor con 7,060.00 kg MS ha<sup>-1</sup>. En la segunda cosecha, la cebada – guisante presentó el mayor rendimiento con 10,390.00 kg MS ha<sup>-1</sup>, y nuevamente el ryegrass – trébol el menor con 8,230.00 kg MS ha<sup>-1</sup>. Esto indica que la aplicación de fosfato diamónico optimiza el crecimiento y la producción de materia seca en estos cultivos; sin embargo, el ryegrass – trébol mostró la menor producción, es decir, su eficacia varía según la especie y combinación de especies, siendo más beneficiosa para ciertos cultivos.

Bohner (2021) en su investigación “*Medición de la producción de biomasa aérea en verdes de avena y raigrás bajo fertilización nitrogenada, fosforada y fosfo-nitrogenada*”, evaluó la biomasa aérea de *Lolium multiflorum* cv. Bill Max y *Avena sativa* cv. Faraona mediante la aplicación de tres fertilizantes en el establecimiento “Los Charas”, localidad de Jeppener, partido de Brandsen – Argentina. Utilizó el diseño de bloques completos al azar (DBCA) con 3 bloques de 7 tratamientos, tres fertilizantes (urea, superfosfato triple, fosfato diamónico) en dos dosis (100 y 150 kg ha<sup>-1</sup>) y un testigo, con 3 repeticiones, en dos parcelas (raigrás y avena). En el caso de *Lolium multiflorum*, la dosis de 150 kg ha<sup>-1</sup> resultó ser la más efectiva en todos los cortes; en el primer corte, el tratamiento con urea obtuvo 2,403.00 kg MS ha<sup>-1</sup>, con superfosfato triple 2,067.00 kg MS ha<sup>-1</sup> y con fosfato diamónico 1,984.00 kg MS ha<sup>-1</sup>.

<sup>1</sup>; en el segundo corte, el tratamiento con superfosfato triple logró 2,923.00 kg MS ha<sup>-1</sup> y con fosfato diamónico 2,543.00 kg MS ha<sup>-1</sup>; y en el tercer corte, el tratamiento con urea alcanzó 3,167.00 kg MS ha<sup>-1</sup> y con fosfato diamónico 2,914.00 kg MS ha<sup>-1</sup>, en relación a los demás tratamientos que presentaron menores resultados. En cuanto a *Avena sativa*, los tres cortes y ambas dosis mostraron que el superfosfato triple y el fosfato diamónico obtuvieron valores significativamente mayores que el resto de tratamientos. La aplicación de superfosfato triple y fosfato diamónico demostraron ser más efectivos en términos de rendimiento de materia seca en *Lolium multiflorum* y *Avena sativa*.

### **2.1.2 A nivel nacional**

Lima et al. (2020) en su estudio “*Estrategias para mejorar los pastizales altoandinos: el rol del trébol y la fertilización con fósforo*”, evaluaron el efecto del fosfato diamónico y la introducción del trébol blanco Huia en praderas naturales dominadas por *Festuca dolichophylla* en el sector Ayaracra – Pasco. Emplearon el diseño experimental de bloques al azar con arreglo factorial 2x2x5, dos niveles de fósforo (0 y 80 kg ha<sup>-1</sup>), dos distanciamientos de siembra (0.5 y 1.0 m) y cinco periodos climáticos de crecimiento (abril, junio, octubre, diciembre y marzo). Los resultados en respuesta a la fertilización con fosfato diamónico mostraron, en el caso de altura de planta, la dosis de fósforo (80 kg ha<sup>-1</sup>) incrementó significativamente el crecimiento del trébol blanco a 6.30 cm y de la festuca a 46.80 cm; respecto a la biomasa aérea de la asociación festuca – trébol blanco, la dosis de fósforo (80 kg ha<sup>-1</sup>) presentó el mayor rendimiento con 2,314.00 kg MS ha<sup>-1</sup>. Además, el distanciamiento de siembra (0.5 m) y la época de lluvia incrementaron la tasa de crecimiento y, en consecuencia, la acumulación de biomasa del trébol blanco y de la festuca. La aplicación de fosfato diamónico en dosis de fósforo (80 kg ha<sup>-1</sup>), distanciamiento de siembra (0.5 m) y época pico de lluvia (marzo), demostró ser efectivo para mejorar el crecimiento y rendimiento de la asociación de trébol

blanco y festuca, como respuesta a una mayor disponibilidad de fósforo y su absorción por las plantas, facilitada por las condiciones edafoclimáticas locales.

Cayetano (2022) en su investigación “*Efecto de la fertilización fosfatada en el establecimiento y producción de tres variedades de Alfalfa*”, evaluó la adaptación de tres variedades de alfalfa introducidas (Moapa 69, CUF 101 y SW 8210) a las condiciones de la costa peruana y estimó el efecto de la fertilización fosforada en la estructura vegetal, calidad y rendimiento del cultivo de alfalfa, en el campo experimental del Laboratorio de Ecología y Utilización de Pastizales (LEUP) de la Universidad Nacional Agraria La Molina – Lima. Adoptó el diseño experimental completamente al azar con arreglo factorial 3x2, 3 variedades de alfalfa (Moapa 69, CUF 101 y SW 8210) por 2 niveles de fósforo (0 y 35 kg ha<sup>-1</sup>) como fosfato diamónico, con 3 bloques, 6 tratamientos en 3 repeticiones y se desarrolló en dos fases. En la fase 1, los resultados mostraron que la altura promedio de la alfalfa alcanzó 26.851 cm cuando se aplicó una dosis de 35 kg ha<sup>-1</sup> de fósforo; mientras que, sin fertilización la altura promedio llegó a 24.696 cm en las tres variedades. En la fase 2, con la misma dosis de fósforo, la altura promedio de la planta se incrementó a 67.902 cm y el rendimiento fue de 4,154.00 kg MS ha<sup>-1</sup>; por el contrario, sin aplicación de fósforo, la altura promedio alcanzó 63.203 cm y el rendimiento fue de 3,581.00 kg MS ha<sup>-1</sup>. La fertilización con fosfato diamónico favoreció el crecimiento y rendimiento de las tres variedades de alfalfa, tanto en la fase de establecimiento como en la fase de producción forrajera, bajo las condiciones específicas del medio local.

Orellana (2023) en su investigación titulada “*Trébol blanco (Trifolium repens) y roca fosfatada como estrategia de mejora del valor nutritivo de las praderas altoandinas*”, evaluó la respuesta del trébol blanco var. Huia a la fertilización fosfatada y la densidad de siembra en pajonales dominados por *Festuca dolichophylla* y *Calamagrostis vicunarum*, y el rendimiento de la asociación gramínea – leguminosa, en dos experimentos ubicados en la comunidad de Cachimayo, Ascensión – Huancavelica. En el experimento 1, utilizó el diseño de bloque

completo al azar (DBCA) con arreglo factorial 3x2, roca fosfatada en 0, 15 y 30 g hoyo<sup>-1</sup> con siembra a 20 y 40 semillas hoyo<sup>-1</sup>; y en el experimento 2, empleó un DBCA con tres tratamientos: pradera natural, pradera natural + trébol blanco (40 semillas hoyo<sup>-1</sup>) y pradera natural + trébol blanco (40 semillas hoyo<sup>-1</sup>) + roca fosfatada (30 g hoyo<sup>-1</sup>). Los resultados mostraron, en el caso del experimento 1, los tratamientos con 15 g hoyo<sup>-1</sup> de roca fosfatada y 20 semillas hoyo<sup>-1</sup> de trébol blanco alcanzaron los mayores rendimientos con 382.13 y 285.10 kg MS ha<sup>-1</sup>, respectivamente; y con respecto al experimento 2, el tratamiento con pradera natural + trébol blanco (40 semillas hoyo<sup>-1</sup>) + roca fosfatada (30 g hoyo<sup>-1</sup>) obtuvo el mejor rendimiento con 3,207.77 kg MS ha<sup>-1</sup>. La aplicación de roca fosfatada en ambos experimentos tuvo un impacto notable en el crecimiento y desarrollo del trébol blanco, lo que resultó en un aumento del rendimiento de materia seca, tanto en cultivo individual como en asociación con gramíneas, favorecido por una adecuada densidad de siembra y una dosis apropiada de fertilización fosfatada.

### **2.1.3 A nivel local**

Torres (2022) en su investigación titulada “*Dosis de fósforo en rendimiento al primer corte del Rye Grass (Lolium perenne) Viscon y Alto de origen neozelandés – Cutervo*”, determinó el rendimiento de dos variedades de ryegrass procedentes de Nueva Zelanda en relación a la tradicional con y sin dosis de fósforo, al primer corte. Empleó el diseño bloques completamente al azar (BCR) con arreglo factorial 3x3, 3 variedades de ryegrass (Ecotipo Cajamarquino, Viscount y Alto) por 3 dosis de roca fosfórica (0, 70 y 150 kg ha<sup>-1</sup>) con 3 bloques, 9 tratamientos y 3 repeticiones. Los resultados según el nivel de fertilización mostraron que la dosis de fósforo (70 kg ha<sup>-1</sup>) logró el mayor rendimiento con 15,300.00 kg MV ha<sup>-1</sup> y 4,630.00 kg MS ha<sup>-1</sup> en la variedad Ecotipo Cajamarquino, y 15,300.00 kg MV ha<sup>-1</sup> y 4,470.00 kg MS ha<sup>-1</sup> en la variedad Viscount; mientras que, en la variedad Alto fue la dosis (0 kg ha<sup>-1</sup>) con 16,330.00 kg MV ha<sup>-1</sup> y 4,790.00 kg MS ha<sup>-1</sup>. La roca fosfórica en dosis de 70

kg ha<sup>-1</sup> resultó ser la apropiada para incrementar el rendimiento de materia verde y seca en las variedades de ryegrass Ecotipo Cajamarquino y Viscount; sin embargo, la variedad Alto no respondió a la fertilización fosforada.

Mejía (2022) en su investigación “*Dosis de fósforo en rendimiento al primer corte de rye grass (Lolium multiflorum Tabu y, Lolium híbrido Shogun, de origen neozelandés)*”, determinó el rendimiento al primer corte de dos variedades de ryegrass introducidas de Nueva Zelanda respecto a la tradicional con diversas dosis de fósforo en el centro poblado de Yuracyacu, Chota – Cajamarca. Utilizó el diseño de bloques completamente al azar (BCR) con arreglo factorial 3x3, 3 variedades de ryegrass (Ecotipo Cajamarquino, Tabu y Shogun) por 3 dosis de roca fosfórica (0, 80 y 180 kg ha<sup>-1</sup>) con 3 bloques, 9 tratamientos y 3 repeticiones. Los resultados según el nivel de fertilización mostraron que la dosis de fósforo (180 kg ha<sup>-1</sup>) logró el mayor rendimiento con 27,700.00 kg MV ha<sup>-1</sup> y 8,867.00 kg MS ha<sup>-1</sup> en la variedad Shogun, con 21,400.00 kg MV ha<sup>-1</sup> y 6,771.00 kg MS ha<sup>-1</sup> en la variedad Tabu, y con 21,200.00 kg MV ha<sup>-1</sup> y 6,748.00 kg MS ha<sup>-1</sup> en la variedad Ecotipo Cajamarquino, superando a las dosis de 80 y 0 kg ha<sup>-1</sup>. La roca fosfórica en dosis de 180 kg ha<sup>-1</sup> resultó ser la apropiada para incrementar el rendimiento de materia verde y seca en las variedades de ryegrass Shogun, Tabu y Ecotipo Cajamarquino, respectivamente.

## **2.2 Bases teóricas**

### **2.2.1 Asociación de especies forrajeras**

En los ecosistemas agrícolas, las asociaciones o mezclas entre dos o más especies forrajeras individuales, especialmente gramíneas y leguminosas, brindan ventajas en relación a los monocultivos (polyfarming, 2020; B. Wang et al., 2022). Las especies que crecen en asociación suelen utilizar los recursos de diferentes maneras tanto en el espacio como en el tiempo, minimizando la competencia entre especies y explotando el medio de una manera más eficiente y equilibrada que los cultivos de una sola especie (Sturludóttir et al., 2013).

Por otra parte, la asociación de gramíneas (rye grass) y leguminosas (trébol) mejora la calidad de toda la biomasa forrajera, en particular el valor nutritivo, el rendimiento de materia verde y seca, la digestibilidad, así como la estabilidad del cultivo y la eliminación de malezas (Bo et al., 2022; Tahir et al., 2022). Las gramíneas, en una proporción de 70%, aportan energía y un adecuado nivel de fibra en la dieta del ganado (Flores et al., 2022; L. A. Vallejos, 2009), reducen la invasión de malezas, el encamado de las leguminosas y el timpanismo (Tahir et al., 2022). Mientras que, las leguminosas, en una proporción de 30%, contribuyen con la proteína cruda en la dieta (Flores et al., 2022), mejoran el sumidero de carbono del suelo, y cumplen la función de fijar nitrógeno atmosférico (N<sub>2</sub>) disminuyendo el consumo de fertilizantes nitrogenados (Mendoza et al., 2018; Tahir et al., 2022; L. A. Vallejos, 2009).

Sin embargo, para que exista una buena asociación gramínea – leguminosa es necesario considerar diversos factores como prácticas y manejos agrícolas adecuados, la composición de la mezcla (diversidad y compatibilidad), la geografía, y su adaptación a las condiciones edafoclimáticas locales (Mendoza et al., 2018; Tahir et al., 2022).

### **2.2.2 Origen, distribución y taxonomía del rye grass italiano (*Lolium multiflorum* L.)**

Rye grass italiano Lam., nativo de Europa central y meridional, noroeste de África y el suroeste de Asia (Beddows, 1973), cultivado por primera vez en Italia y Gran Bretaña y gran parte de Europa. Se distribuyó en América del Norte, América del sur, Nueva Zelanda y Australia (Klein, 2011). En el Perú, presenta gran adaptabilidad a las condiciones medioambientales de las zonas interandinas y es una de las especies esenciales dentro de los sistemas pastoriles (Villar et al., 2014).

Perdomo et al. (2009) realizó la siguiente clasificación taxonómica del *Lolium multiflorum* L.:

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Liliopsida

Orden: Cyperales

Familia: Poaceae

Subfamilia: Pooideae

Tribu: Poeae

Subtribu: Loliinae

Género: *Lolium*

Especie: *Lolium multiflorum* L.

#### **A. Morfología del rye grass italiano (*Lolium multiflorum* L.)**

El rye grass italiano presenta una raíz fibrosa, adventicia y superficial; sus tallos erectos con nudos y entrenudos (Herrera, 2019), la base de los tallos color verde pálido amarillento, las hojas de color verde claro, brillante en el envés, enrolladas dentro de la vaina, con lámina puntiaguda, lisas en el envés, pero ásperas y opacas en el haz, cuyas aurículas son visibles hacia el ápice (Ahicart y Hernández, 2019).

La inflorescencia posee espigas comprimidas, erectas y dísticas, además de ser aplanadas lateralmente; en estas espigas encontramos espiguillas sésiles, alternas y solitarias de 8 a 25 mm de largo (Ahicart y Hernández, 2019), las cuales contienen de 4 a 22 flores, hermafroditas y basítonas; además, posee glumas de 5 a 10 mm de longitud y lemma de 4 a 8 mm con una arista recta y delgada de hasta 15 mm (Cobos y Narváez, 2018; Herrera, 2019). El fruto es una cariósipide ovoide sin pelos (Díaz y Contreras, 2020); la semilla es de grano pequeño de unos 4 mm de longitud aproximadamente, cubierto por una lemma y una pálea; además, presenta aristas grandes (Velázquez, 2009).

## B. Requerimientos edafoclimáticos del rye grass italiano (*Lolium multiflorum* L.)

Para Monsivais (2013), las condiciones edafoclimáticas afectan el crecimiento, desarrollo y rendimiento de esta especie; en relación a esto, Herrera (2019) señala que el rye grass italiano se adapta a regiones templadas, requiere de suelos preferentemente arcillosos de buena fertilidad, se desarrolla en suelos ligeramente ácidos o neutros y crece en suelos relativamente húmedos con buen drenaje superficial. Por otro lado, Calvache et al. (2014) indicaron que las condiciones climáticas tales como la temperatura, luminosidad, y precipitación por debajo del nivel requerido por la planta, limitan su desarrollo, debido a que inhibe sus funciones fisiológicas de crecimiento e impide la acumulación de nutrientes en sus hojas, provocándole hasta la muerte.

**Tabla 1**

*Requerimientos edafoclimáticos del rye grass italiano (Lolium multiflorum L.)*

Factores	Características
Adaptabilidad	Valle, ladera y jalca de la zona andina
Altitud (m s. n. m.)	2300 – 4000
Clima	Templado y frío
Temperatura (°C)	18 – 20
Humedad relativa (%)	80 – 90
Luminosidad	Óptimo a libre exposición
Tipo de suelo	Franco o franco-arcilloso
pH	5.5 – 7.5
Requerimiento hídrico (mm mes <sup>-1</sup> )	80 – 100

Fuente: Cobos y Narváez (2018), Miramont (s. f.), Monsivais (2013), y Terrones (1999).

## C. Fenología del rye grass italiano (*Lolium multiflorum* L.)

Moore et al. (1991) señala que la fenología del *Lolium multiflorum* L. se basa en cinco etapas principales de crecimiento. Primero, la etapa de germinación (G), cuando la semilla es

colocada en el suelo, se produce el proceso de imbibición, la aparición de la radícula, emergencia del coleóptilo, alargamiento del mesocótilo y/o del coleóptilo y termina con la emergencia del coleóptilo del suelo; luego, la etapa vegetativa (V) referida al crecimiento y desarrollo de las hojas, comienza con la aparición de la primera hoja del coleóptilo o prófalo para el caso de los macollos y finaliza con la enésima hoja con collar; después, la etapa de elongación (E), inicia con el alargamiento de los tallos y cesa con el enésimo nudo palpable o visible, cuando la inflorescencia queda encerrada en la vaina superior de la hoja (fase de bota); posteriormente, la etapa reproductiva (R), la cual empieza con la aparición de la inflorescencia (primera espiguilla visible) y sigue hasta la antesis y la fecundación; y finalmente, la etapa de maduración de la semilla (S) perteneciente al desarrollo de la cariósida, comienza cuando la cariósida en desarrollo se vuelve fácilmente visible y termina cuando está madura (Cobos y Narváez, 2018; Moore et al., 1991).

#### **D. Variedades de rye grass italiano (*Lolium multiflorum* L.)**

Tomando en consideración lo señalado por los investigadores Celen y Orou Ouennon Assouma (2021), existen numerosas variedades de rye grass italiano, tanto diploides ( $2n = 14$  cromosomas), rye grass de hojas angostas, tallos delgados y semilla pequeña, caracterizado por su buena capacidad de emergencia, crecimiento de macollos predominantes, y persistencia, como las tetraploides ( $4n = 28$  cromosomas), rye grass de hojas largas y amplias, tallos y semillas más grandes, pero no lo son necesariamente mayor en rendimiento; además, son más apetecibles por su contenido de azúcar.

El *Lolium multiflorum* Lam. a menudo se subdivide en dos tipos como rye grass anual Westerwold y bianual italiano (Celen y Orou Ouennon Assouma, 2021). Con relación al tipo Westerwold, Demanet (2008a), y la FAAR Productos y Servicios agropecuarios (s. f.) consideran variedades de rye grass como Adrenalina (4n), Andy (4n), Barturbo (4n), Belinda (4n), Big Bang (4n), Bill Max (4n), Bill (4n), Flying (2n), Green Spirit, Hogan (4n), Jumbo

(4n), Magnum (4n), Mega, Oregon (4n), Rey Verde (4n), Surrey nova (2n), Tama (4n), Tamtbo (4n), Trinova (4n), Virgyl (4n), Winter Star (4n) y Winter Star II (4n). Mientras que, para el tipo bianual italiano, Demanet (2008a) describe las siguientes variedades: Aubade (4n), Bolero (4n), Concord (2n), Crusader (2n), Dominó (4n), Edison (4n), Gulf (2n), Hercules (4n), Jack (2n), Monblanc (4n), Selva (4n), Sonik (2n), Status (2n), Tabú (2n), Tetilia (4n), Tetrone (4n), Tonyl (4n) y Warrior (2n). Por otro lado, Terrones (1999) considera la variedad Ecotipo Cajamarquino (2n).

**a. *Rye grass Ecotipo Cajamarquino***

Esta variedad surge del cruzamiento entre un rye grass italiano y un rye grass perenne (Villegas, 2017). Es la especie forrajera que se desarrolla con mayor frecuencia en la región Cajamarca y ha logrado adaptarse a las condiciones edafoclimáticas de la sierra del Perú (Villar et al., 2014).

Para Villar et al. (2014), su desarrollo se limita entre los 2500 y 3500 m s. n. m. en la región altitudinal de la jalca con temperaturas óptimas entre 10 y 16 °C, crece en suelos neutros y tiene la capacidad de tolerar la acidez con un pH de 5.8. Puede alcanzar una altura de hasta 60 cm, y su periodo de corte varía entre los 75 y 90 días después de la siembra.

Esta variedad presenta buena palatabilidad, alta digestibilidad, un alto contenido en agua (80 – 82%) y proteína (12%), un excelente valor energético y un alto contenido en cenizas que tienden a disminuir a medida que alcanza su maduración (Villar et al., 2014); además, se caracteriza por presentar un alto rendimiento, rápido establecimiento y adaptación a una labranza mínima del suelo (L. A. Vallejos, 2009). Está disponible en diferentes entornos y para diferentes propósitos como pastoreo, soiling y corte para ensilaje, henilaje o heno (Demanet, 2019; Kemešytè et al., 2023; Villegas, 2017).

La dosis de semilla requerida es variable y dependerá de numerosos factores como el sistema de cultivo, el método de siembra, la calidad de semilla, el clima, etc. (Farfán y Farfán,

2012); por lo tanto, la densidad de siembra recomendada respecto al sistema de cultivo es de 30 kg ha<sup>-1</sup> en cultivo puro o monocultivo y de 20 kg ha<sup>-1</sup> en mezcla o asociación con trébol blanco (Mamani et al., 2011).

### **2.2.3 Origen, distribución y taxonomía del trébol blanco (*Trifolium repens* L.)**

El trébol blanco es una leguminosa oriunda del mediterráneo, parte de Europa, Oeste de Asia y Norte de África; domesticada en Holanda por primera vez en el siglo XVI y comercializada a partir del siglo XVII (J. A. García, 1995). Distribuido en la mayoría de las regiones del mundo, fue introducido en América a partir del siglo XVI y se extendió por África meridional, Australasia, China, Japón, América del Sur, América del Norte y algunas regiones del Caribe (Lima, 2016). En el Perú, se cultivó por primera vez a finales del siglo XIX, desarrollándose en Cerro de Pasco y Cajamarca en el año 1900 aproximadamente; posteriormente, se extendió por toda la región altoandina (Argote, 2011).

De acuerdo con Fuentes (2022), la clasificación taxonomía del trébol blanco es la siguiente:

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Magnoliopsida

Orden: Fabales

Familia: Fabaceae

Subfamilia: Faboideae

Tribu: Trifolieae

Género: *Trifolium*

Especie: *Trifolium repens* L.

#### **A. Morfología del trébol blanco (*Trifolium repens* L.)**

El trébol blanco es una leguminosa herbácea perenne, presenta un sistema radicular ramificado que incluye raíces adventicias de carácter estolonífero (Villar et al., 2014). Tallos de tipo rastreros, con raíces en los nudos (estolones), sin pelos o casi sin pelos (Vibrans, 2009). Hojas trifoliadas cuyos foliolos son de forma casi acorazonados, elípticos, anchos y ovales, y de tamaño variable (pequeño, mediano y grande); tiene una mancha blanca en forma de “V” en la parte superior de la hoja (León et al., 2018). Inflorescencia, son cabezuelas globulares de 1 a 2 cm de diámetro, que albergan de 50 a 200 flores blancas o blanco-rosadas de forma amariposada (Lima, 2016). El fruto es una legumbre dehiscente, contiene de 3 a 4 semillas pequeñas de superficie lisa en forma acorazonada, ovoide y ligeramente aplastada a los lados de color amarillo brillante a marrón rojizo, sus dimensiones oscilan de 0.9 a 1.2 mm de largo por 0.8 a 1.1 mm de ancho (Lima, 2016; Villar et al., 2014).

#### **B. Requerimientos edafoclimáticos del trébol blanco (*Trifolium repens* L.)**

El trébol blanco se ha adaptado a una amplia gama de condiciones edáficas y climáticas (Widdup, 1980). Esta especie crece en varios tipos de suelo, pero se desempeña mejor en suelos fértiles, bien drenados y con buena retención de agua, y no tolera suelos demasiado ácidos o demasiado alcalinos; por otra parte, es sensible a la alta salinidad, lo que impacta negativamente a características como la densidad de estolones, la floración y el rendimiento de forraje (Lane et al., 2000). Con respecto a los factores climáticos, Widdup (1980) señala que pueden influir en el crecimiento alterando la actividad fotosintética, respiración, formación de hojas, distribución de asimilados y otros procesos esenciales que permiten a la planta sobrevivir en un entorno determinado; Widdup agrega, además, que la temperatura óptima para el crecimiento es 24 °C aproximadamente; sin embargo, el crecimiento se reduce a temperaturas extremas inferiores a 10 °C y superiores a 35 °C. Muy exigente a la alta intensidad de luz solar, aunque puede adaptarse gradualmente a condiciones de poca luz (Office of the Gene

Technology Regulator, 2021). El trébol blanco, también, es susceptible a la sequía, debido a su sistema radicular poco profundo, lo que le dificulta acceder a la humedad más profunda del suelo (Demagnet, 2008b); es decir, el estrés por humedad limita significativamente su crecimiento y supervivencia (Lane et al., 2000); por lo que, Demagnet (2008b) considera esencial realizar un riego frecuente durante periodos secos prolongados.

**Tabla 2**

*Requerimientos edafoclimáticos del trébol blanco (Trifolium repens L.)*

Factores	Características
Adaptabilidad	Valle, ladera y jalca
Altitud (m s. n. m.)	1800 – 4000
Clima	Templado a frío y húmedo
Temperatura (°C)	10 – 35
Humedad relativa (%)	90 – 95
Luminosidad	Muy exigente
Tipo de suelo	Arcilloso a franco-arcilloso
pH	5.5 – 7.5
Requerimiento hídrico (mm año <sup>-1</sup> )	800

Fuente: Alvarado (2020), y Terrones (1999).

### **C. Fenología del trébol blanco (*Trifolium repens* L.)**

El desarrollo fenológico del *Trifolium repens* L. consta de seis etapas. Primero, la etapa de germinación (G), inicia cuando la semilla es enterrada en el suelo, se produce la imbibición de la semilla, la emergencia y elongación de la radícula, la aparición del hipocótilo y finaliza con la emergencia de los cotiledones (Enriquez-Hidalgo et al., 2020); a continuación, la etapa vegetativa (V), comienza cuando los cotiledones están completamente expandidos, se desarrolla la primera hoja verdadera simple desde de la yema terminal, a partir de entonces las hojas desplegadas son normalmente trifoliadas, y termina con la formación de los brotes laterales visibles (Enriquez-Hidalgo et al., 2020; Gibson y Hollowell, 1966); luego, la etapa de

elongación (E), describe el alargamiento de los tallos estoloníferos horizontales a nivel de la superficie del suelo, el estolón consta de nudos y entrenudos, de cada nudo se origina una sola hoja trifoliada, junto con una yema lateral y dos yemas radicales nodales, y así sucesivamente (Foundation for Arable Research [FAR], 2005); después, la etapa reproductiva (R) comienza cuando es visible el primer brote de la inflorescencia, describe la antesis de las flores, la fecundación, el fin de la floración y el cuajado de las legumbres visibles; posteriormente, la etapa de maduración (M), inicia con la primera legumbre verde visible que todavía tiene pétalos senescentes adheridos y termina cuando casi todas las legumbres están maduras y las semillas alcanzan su color y tamaño final, se secan y endurecen; y por último, la etapa de senescencia (S), se define cuando la planta se vuelve seca y amarilla, hasta que muere y se cosechan las legumbres (Enriquez-Hidalgo et al., 2020).

#### **D. Variedades de trébol blanco (*Trifolium repens* L.)**

Las variedades del *Trifolium repens* L. se clasifican en tres grupos de acuerdo con el tamaño de hoja (Demagnet, 2008b, 2019):

- *Cultivares de hoja pequeña*: Demand, Kent, Prop, y Tahora (Demagnet, 2019; Romero, 2005).
- *Cultivares de hoja mediana*: Aberystwyth S-100, Apex, Apolo, Aquiles, Bayucúa, Bounty, Churrinche, Daeno, El Lucero, Goliath, Huia, Lebons, Mainstay, Milka, Nusiral, Prestige, Sustain, Tribute, Weka, y White Irrigation (Demagnet, 2008b, 2009, 2019; Instituto Nacional de Semillas [INASE], s. f.; Romero, 2005; Terrones, 1999).
- *Cultivares de hoja grande (tipo ladino)*: Amaru, Aran, Diabolo, Estanzuela Zapicán, Giant, Haifa, Kopu, Kotare, Kotuku, Ladino Italia, Legacy, Milka Nova, Pitau, Regal, y Will (Demagnet, 2008b, 2009, 2019; INASE, s. f.; Romero, 2005; Terrones, 1999).

**a. Trébol blanco Huia**

Conocido como trébol blanco New Zealand antes de 1964 (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation [CSIRO], 2017), desarrollado a partir de variedades encontradas en pastos permanentes por el Departamento de Investigación Científica e Industrial – DSIR (AgResearch Ltd) de Nueva Zelanda, fue certificado en 1932 y posteriormente denominado Huia en 1964 (Demanet, 2008c).

Prácticamente no existen diferencias en los caracteres morfológicos entre las variedades de trébol blanco, salvo las diferencias en el tamaño de las plantas y sus partes individuales (CSIRO, 2017). Huia posee precocidad intermedia, hábito de crecimiento postrado que favorece la formación de una gran densidad de estolones glabros, hojas de tamaño intermedio con pecíolos largos, sólidos y glabros; inflorescencia, cabezas globulares sobre pedúnculos más largos que los pecíolos, que contienen de 30 – 40 flores blancas a rosadas que nacen sobre tallos cortos y delgados (CSIRO, 2017; Demanet, 2008c). Además, se caracteriza por su relación simbiótica con bacterias del género *Rhizobium* que fijan N<sub>2</sub> (CSIRO, 2017; Demanet, 2019).

Según el CSIRO (2017), se adapta a zonas de sierra alta con un clima templado húmedo y a suelos de fertilidad media a alta, con precipitaciones de 600 mm a más. Presenta un crecimiento limitado en invierno y un elevado rendimiento en verano; de buen valor nutricional, alta palatabilidad, calidad y digestibilidad; y resiste pastoreos continuos e intensos en asociación con gramíneas perennes (Demanet, 2008c).

La dosis de semilla requerida varía con el clima, el sistema de cultivo, el método de siembra, la calidad de semilla, etc. (Farfán y Farfán, 2012); por lo tanto, la densidad de siembra recomendada respecto al sistema de cultivo es de 4 kg ha<sup>-1</sup> en cultivo puro o monocultivo (Mamani et al., 2011), y de 3 kg ha<sup>-1</sup> en asociación con gramíneas forrajeras (Demanet, 2019).

#### **2.2.4 Fósforo**

El fósforo (P) es el segundo nutriente esencial más importante requerido para el crecimiento y desarrollo de las pasturas (L. A. Vallejos, 2009; Ziadi et al., 2013). El P en la naturaleza se origina de la meteorización, lixiviación y erosión de las apatitas y de depósitos de fosfato natural, pero también proviene de las adiciones de fosfato en forma de fertilizantes comerciales, residuos vegetales y desechos agrícolas (Cerón y Aristizábal, 2012; Johan et al., 2021).

El ciclo del fósforo es el ciclo biogeoquímico en el que el fósforo (P) se mueve a través del suelo, el agua y los organismos (Grant y Flaten, 2019). El P ingresa al suelo a través de fuentes orgánicas (estiércol, biosólidos o restos de plantas o animales muertos) y fuentes inorgánicas (fertilizantes sintéticos), circula entre varios depósitos del suelo a través de procesos como mineralización-inmovilización, disolución-precipitación, desorción-adsorción y meteorización (Prasad y Chakraborty, 2019). Una vez en solución, el P se mueve dentro del suelo (p. ej., a las raíces de las plantas) principalmente por difusión (Pierzynski et al., 2005). La pérdida de fósforo se realiza por absorción y remoción de cultivos y/o pasturas (cosecha y pastoreo), erosión, escorrentía y lixiviación en menor proporción (Prasad y Chakraborty, 2019).

##### **A. Fósforo en el suelo: concentración y formas**

El contenido de fósforo (P) en la corteza terrestre (litósfera) es de 1200 mg P kg<sup>-1</sup> de suelo (Lindsay, 1979; Tiessen, 2008); mientras que, las concentraciones de P total en los suelos pueden variar relativamente, con valores entre 200 y 5000 mg P kg<sup>-1</sup> (600 mg P kg<sup>-1</sup> en promedio) (Lindsay, 1979), o valores entre 100 y 3000 mg P kg<sup>-1</sup> (Frossard et al., 2000), o bien entre 200 y 800 mg P kg<sup>-1</sup> (Tiessen, 2008).

Funcionalmente, existe tres formas diferentes de fósforo (P) en el suelo, el P en la solución del suelo, el P lábil (P activo) y el P no lábil (P fijo) (Johan et al., 2021). El P en la solución del suelo oscila entre 0.01 y 1 ppm, y es la fracción que suele estar disponible para las

plantas. El P lábil representa a la fracción absorbida por las plantas, a los minerales de alta solubilidad y a las formas orgánicas de rápida mineralización que están en equilibrio con la solución del suelo. El P no lábil constituye la reserva no disponible para las plantas (>90% del P total del suelo) en formas orgánicas y minerales estables, de difícil solubilización y que no está en equilibrio con la solución del suelo (Johan et al., 2021; Quintero, 2002).

El fósforo (P) presente en el suelo se clasifica ampliamente en forma orgánica ( $P_o$ ) e inorgánica ( $P_i$ ) (Bolan, 1991), cuyas proporciones de  $P_o$  y  $P_i$  varían a medida que se desarrollan los suelos (Johan et al., 2021). La distribución de estas dos formas ( $P_o$  y  $P_i$ ) en los suelos depende de diferentes factores que incluyen el tipo de suelo y su pH, la actividad microbiana, el tipo de vegetación y el historial de fertilizantes (Bolan, 1991; Rooney y Clipson, 2008).

El contenido de fósforo orgánico de los suelos es de tendencia variable. Dalal (1977) indica que el fósforo orgánico puede representar del 20% al 80% del fósforo total en la capa superficial del suelo; por otro lado, Alejo-Iturvide et al. (2016) destacan que constituye del 29% al 65% del fósforo que se encuentra en los suelos superficiales; de manera similar, Johan et al. (2021) indican que representa del 30% al 50% del P total en la superficie del suelo. El fósforo orgánico se encuentra en la materia orgánica del suelo que se origina por la degradación microbiana de restos de animales y vegetales en un proceso llamado mineralización (Beltrán, 2014), que liberan compuestos predominantes como el fosfato de inositol (más del 50% del  $P_o$  total), los fosfolípidos (0.5 – 7.0% del  $P_o$  total) y el ácido nucleico (menos del 3% del  $P_o$  total) (Bolan, 1991; Dalal, 1977), convirtiendo las formas orgánicas de P en inorgánica, la forma inorgánica está representada por los iones ortofosfato ( $H_2PO_4^-$  y  $HPO_4^{2-}$ ) y son las formas primarias de fósforo disponible para ser absorbido por las plantas (Johan et al., 2021; L. A. Vallejos, 2009).

En relación al fósforo inorgánico, Harrison (1987) destaca que representa del 35% al 70% del P total del suelo, Patiño-Torres y Sanclemente-Reyes (2014) indican que abarca entre

el 50% y el 70% del fósforo total del suelo, aunque puede variar entre el 10% y el 90%, Solangi et al. (2023) señalan que del 30% al 65% del fósforo total del suelo suele estar en forma inorgánica, y Y.-P. Wang et al. (2022) sostienen que el fósforo inorgánico constituye del 20% al 60% del fósforo total del suelo.

El fósforo inorgánico, en fase sólida, se encuentra principalmente en minerales primarios de P, minerales secundarios de P y P absorbido (Pierzynski et al., 2005). Los minerales primarios incluyen a las apatitas, estrengitas, variscitas (M. García, 2014); los minerales secundarios incluyen a los fosfatos de calcio (fluorapatita, hidroxiapatita, carbonatoapatita, oxiapatita, fosfato monocálcico, fosfato bicálcico y fosfato tricálcico) predominantes en suelos neutros y alcalinos, fosfatos de hierro (vivianita y estrengita) y fosfatos de aluminio (variscita) predominantes en suelos ácidos (Tsai y Rossetto, 1992), que se originan por precipitación y liberan fósforo muy lentamente por acción de la meteorización (Alejo-Iturvide et al., 2016); y el P absorbido que incluye a las arcillas y óxidos de Fe y Al (M. García, 2014); además de oxihidróxidos de Fe y Al, carbonatos de Ca, y fosfatos ocluidos en hidróxidos de Fe, Al y Mn (Restrepo-Franco et al., 2015; Tsai y Rossetto, 1992). Estas formas inorgánicas de P tienen una solubilidad muy baja y son poco disponibles para las plantas; sin embargo, contribuyen lentamente a la solución del suelo (Johan et al., 2021). El fósforo inorgánico también proviene de la aplicación de productos agroquímicos (fertilizantes) en forma de superfosfato, aproximadamente el 70% del  $P_i$  se convierte en complejos insolubles y que pueden convertirse en formas solubles por la acción de los microorganismos (Cerón y Aristizábal, 2012; Restrepo-Franco et al., 2015).

En la solución del suelo, las formas iónicas del fósforo inorgánico dependen del pH; cuando el pH es ácido de 4.0 a 6.0, el  $P_i$  en su mayoría se presenta como ion ortofosfato primario  $H_2PO_4^-$ ; cuando el pH es neutro de 6.5 a 7.5, el  $P_i$  está presente principalmente como  $H_2PO_4^-$  y  $HPO_4^{2-}$ ; y cuando el pH es alcalino de 8.0 a 10.0, el ion ortofosfato secundario  $HPO_4^{2-}$  es

dominante (Restrepo-Franco et al., 2015); es decir, valores bajos de pH incrementan la absorción del ion  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , mientras que, los valores más altos de pH incrementan la absorción de la forma  $\text{HPO}_4^{2-}$  (L. A. Vallejos, 2009). Además, en un pH mayor que 10.0, la forma iónica  $\text{PO}_4^{3-}$  es dominante, y solo el P-Na es disponible para las plantas, y en un pH menor o igual que 3.0, el fósforo se encuentra como  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , en la cual, el fosfato reacciona muy rápidamente con Fe y Al por precipitación formando productos insolubles menos disponibles para las plantas (Patiño-Torres y Sanclemente-Reyes, 2014; Restrepo-Franco et al., 2015).

### **B. El fósforo y su rol en la planta**

El fósforo (P) es un macronutriente importante para las plantas y su concentración oscila entre el 0.05% y el 0.5% del peso seco de la planta (Johri et al., 2015; Vance et al., 2003). Es un elemento esencial que participa en una serie de procesos, incluido el almacenamiento y transferencia de energía a través del trifosfato de adenosina (ATP), la fotosíntesis, la respiración, la división y expansión celular, el metabolismo de los carbohidratos, la transferencia de las características genéticas y el transporte de nutrientes a través de la planta (Espinosa, 1992; Johnson, 2020; Mullins, 2009). Las plantas absorben el fósforo del suelo en su forma inorgánica ( $\text{P}_i$ ), una vez en la planta, el  $\text{P}_i$  se convierte en formas orgánicas como trifosfato de adenosina (ATP) y difosfato de adenosina (ADP); además, el  $\text{P}_i$  forma parte de otros compuestos orgánicos como ácidos nucleicos, fosfolípidos y polifosfatos inorgánicos (poliP) (Khan et al., 2023); lo que estimula la germinación de semillas, el crecimiento y desarrollo de raíces y brotes, el fortalecimiento de tallos, la formación de flores y semillas, y en particular, la cantidad y calidad del rendimiento (Johan et al., 2021; Malhotra et al., 2018). Por otra parte, en leguminosas, al incrementar la disponibilidad de fósforo, aumenta la capacidad de fijación del nitrógeno atmosférico (realizada por bacterias del género *Rhizobium* presentes en las raíces) (L. A. Vallejos, 2009). El fósforo es móvil y se desplaza del tejido más

viejo al tejido más joven, los niveles más altos de fósforo se encuentran en el tejido en el punto de crecimiento (Johnson, 2020).

### C. Niveles de fósforo disponible en el suelo

El fósforo (P) es uno de los elementos más limitantes en los suelos. En la sierra del Perú, los niveles de P disponible oscilan desde <7 ppm hasta 22 ppm (Farfán y Farfán, 2012; Lima et al., 2020; Terroba et al., 2024; L. A. Vallejos, 2009), lo que constituye una limitante para el crecimiento, desarrollo y persistencia de las especies forrajeras (Castaño, 2003; Mamani et al., 2011; Restrepo-Franco et al., 2015). Las plantas (especialmente los pastos) requieren entre 25 y 60 ppm de fósforo para potenciar su rendimiento y calidad (L. A. Vallejos, 2009).

**Tabla 3**

*Niveles de fósforo disponible en el suelo (Olsen modificado)*

Nivel	Fósforo disponible (ppm)
Bajo	<7
Medio	7 – 14
Alto	>14

*Nota.* De Decreto Supremo N.º 0005-2022-MIDAGRI, por Normas y Documentos Legales – Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego – Plataforma del Estado Peruano, s. f. (<https://www.gob.pe/institucion/midagri/normas-legales/2979424-0005-2022-midagri>). En el dominio público.

### D. Factores que condicionan la disponibilidad de fósforo

La disponibilidad de fósforo es una variable dinámica fuertemente influenciada por los factores del suelo (propiedades físicas, químicas y biológicas), los factores de la planta y los factores ambientales (Gueçaimburu et al., 2019; Ziadi et al., 2013).

#### a. Factores del suelo

El P disponible en el suelo se ve afectado por las propiedades físicas del suelo como la textura. Johan et al. (2021), y Ziadi et al. (2013) señalan que los suelos de textura fina (>300 g

de arcilla  $\text{kg}^{-1}$  de suelo) como los suelos francos arcillosos, tienen mayor capacidad de fijación de P que los suelos arenosos de textura gruesa ( $\leq 300$  g de arcilla  $\text{kg}^{-1}$  de suelo). La estructura del suelo también influye en la disponibilidad de P en el suelo, debido a las interacciones entre el P soluble y la fase sólida del suelo asociada con los agregados del suelo y la materia orgánica del suelo (Ziadi et al., 2013).

Dentro de las propiedades químicas, el pH del suelo es el principal factor que afecta la disponibilidad de iones P en suelos ácidos como en suelos alcalinos (Armstrong, 1988; Ziadi et al., 2013); la máxima disponibilidad de P en los suelos está en un rango de pH de 6.5 a 7.5; así, en un rango de pH inferior a 6.5 (ácido), el fósforo precipita como P-Fe y P-Al de baja solubilidad y deja de estar disponible; mientras que, en un rango de pH superior a 7.5 (alcalino), se forman compuestos como P-Ca de baja solubilidad y menos disponible (Johan et al., 2021; Rojas, 2006). El material parental también contribuye a la reserva de P disponible en el suelo, al determinar la cantidad inicial de fósforo, cómo se libera y se transforma en formas disponibles para las plantas durante el proceso de formación de los suelos (Johan et al., 2021; Ziadi et al., 2013).

La disponibilidad de P depende, además, de las propiedades biológicas del suelo como la materia orgánica (MO). Suelos con alto contenido de MO presentan grandes cantidades de fósforo orgánico que está mineralizado principalmente por microorganismos solubilizadores de fosfato (MSF) disponible para las plantas; además, actúa como agente quelante formando complejos estables, evitando así la formación de P-Fe y P-Al insolubles (Johan et al., 2021).

#### ***b. Factores de la planta***

La morfología y la arquitectura de las raíces es importante para la adquisición de fósforo debido a su inherente baja movilidad en el suelo (Lynch y Brown, 2001). Las adaptaciones de las plantas a la baja disponibilidad de P incluyen simbiosis con hongos micorrízicos y ciertas bacterias (Lynch y Brown, 2001; White y Hammond, 2008), cambios en la morfología de las

raíces (formación de raíces laterales y proliferación de pelos radiculares) (Lynch y Brown, 2001), y la exudación de compuestos movilizadores de fósforo como protones, ácidos orgánicos y fosfatasas (Marschner, 2012). En la rizosfera, al menos el 1% del volumen total del suelo está ocupado por las raíces; por eso, cualquier factor manipulable que potencie su desarrollo puede servir para aumentar la eficiencia en la absorción de fosfatos por la planta (Rojas, 2006).

*c. Factores ambientales*

La temperatura es un factor que influye en los mecanismos involucrados en la absorción de fósforo (P) por las plantas (Ercoli et al., 1996). Las más bajas temperaturas reducen la tasa de mineralización del P orgánico del suelo debido a una menor actividad microbiana, también reducen las tasas de crecimiento de las raíces y de difusión del P (Armstrong, 1988). Las más altas temperaturas del suelo reducen la solubilidad del P al incrementar la tasa de inmovilización y fijación química del P en el suelo (Singh y Jones, 1977). Así también, Ercoli et al. (1996) señalan que un aumento en la temperatura baja del suelo puede incrementar la concentración de P soluble del suelo o la tasa de descomposición química de las formas inorgánicas de P, lo que potencialmente podría aumentar su disponibilidad para las plantas.

Por otra parte, la humedad del suelo cambia rápidamente después de periodos de alta intensidad y corta duración de lluvias o riego (Ziadi et al., 2013). Esta variación del contenido de agua afecta la concentración de P-disponible en el suelo (He et al., 2002). Durante la fase de rehumedecimiento del suelo se libera P orgánico de la biomasa microbiana; además, la materia orgánica ocluida por los agregados del suelo también libera compuestos orgánicos de P en la solución suelo, la cual induce a un incremento de iones fosfato en la solución del suelo (Ziadi et al., 2013). Por otro lado, Rojas (2006) señala que las formas inorgánicas (P-Ca, P-Fe y P-Al) presentes en el suelo relativamente insolubles, bajo condiciones específicas, cierta cantidad del compuesto es soluble; sin embargo, aunque mantiene una concentración

relativamente constante, la cantidad de iones P solubles se amplifica si se incrementa los niveles de agua en la solución del suelo. Así, la cantidad de fósforo absorbido por las plantas adaptadas a condiciones de secano es menor en periodos de sequías frecuentes y mayor en periodos de lluvias intensas.

Por último, la aireación del suelo podría acelerar el proceso de transformación de P y proporcionar más P-disponible para el crecimiento y desarrollo normal de las plantas (R. Wang et al., 2022). Una buena aireación promueve la abundancia de los microorganismos solubilizadores de fosfato (Zhao et al., 2019), esenciales para la mineralización y descomposición de la materia orgánica del suelo (Espinosa, 1991; R. Wang et al., 2022). La aireación del suelo ayuda a reducir la compactación y aumenta el espacio poroso de la zona radicular, lo que incrementa a absorción de P por las plantas (Espinosa, 1991).

### ***2.2.5 Abonamiento o fertilización fosforada***

La fertilización fosforada siempre ha sido importante, dado que, suele incrementar la disponibilidad de P en el suelo, la concentración en las plantas y, por ende, la producción de forraje (Marino, 2023; Mengel et al., 2001); sin embargo, la reacción de las pasturas a la fertilización fosforada depende de la capacidad de fijación de P del suelo o de su reacción, la extracción de fósforo por las plantas, el nivel de P-disponible en el suelo, y de los antecedentes al historial de fertilización como fuentes, tasas, formas y épocas de aplicación de fósforo (Rojas, 2006); de igual manera, es afectada por factores como la variedad y el tipo de cultivo, el tipo de suelo, las condiciones ambientales y el sistema de cultivo (Fayiga y Nwoke, 2016).

Marino (2023) señala que es necesario ajustar la dosis adecuada de fertilización fosforada (previo análisis de suelo) para evitar ineficiencias y repercusiones adversas tanto económicas como ambientales. Por lo tanto, la dosis recomendada para pasturas asociadas (rye grass – trébol) de la región altoandina del Perú es de 60 – 80 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (Mamani et al., 2011), o de 80 – 150 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (Noli, 2004).

## **A. Fertilizantes fosforados**

Los fertilizantes fosforados se elaboran a partir del procesamiento de fosforitas de origen sedimentario o, en menor cantidad, magmático (Merkel y Hoyer, 2012). Estos fertilizantes se aplican para superar la deficiencia de P nativo del suelo y mejorar el rendimiento y calidad de las pasturas (Nadarajan y Sukumaran, 2021; Vance et al., 2003). Los fertilizantes fosforados más utilizados en la agricultura mundial son el superfosfato simple (SSP), el superfosfato triple (STP), el fosfato monoamónico (MAP), el fosfato diamónico (DAP), los termofosfatos y los fosfatos naturales simplemente molidos [p. ej., la roca fosfórica (RF)], seguidos o no de acidulación parcial (Guelfi et al., 2022).

Diversos factores afectan la disolución de los fertilizantes fosforados en los suelos y la disponibilidad del fósforo disuelto para las plantas; entre ellos, la reactividad de cada fertilizante, las propiedades del suelo (pH, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, concentración de P, etc.), las condiciones climáticas, las especies cultivadas y las prácticas de manejo (Zapata y Roy, 2007). Así, por ejemplo, un aumento en la acidez del suelo ( $\text{pH} \leq 5.5$ ) favorece la disolución de la roca fosfórica; por el contrario, un nivel de pH por encima de 5.5 facilita la disolución del superfosfato triple y fosfato diamónico (Botero, 2015; Zapata y Roy, 2007).

### ***a. Superfosfato triple de calcio (SFT)***

El superfosfato triple de calcio es un fertilizante comúnmente empleado en la agricultura en todo el mundo, la IndustryARC (s. f.) indica que es el resultado de la reacción entre la roca fosfórica y el ácido fosfórico con una alta concentración de fosfato. Técnicamente, es conocido como fosfato monocálcico y como fosfato diácido de calcio (International Plant Nutrition Institute [IPNI], s. f.-a). Además, la Fertinova Agroproductos (2015b) señala que es una excelente fuente de fósforo que contiene 46% de  $\text{P}_2\text{O}_5$  soluble en agua y 21% expresado como CaO, cuya fórmula química es  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2\text{H}_2\text{O}$  (IPNI, s. f.-a).

**Tabla 4***Propiedades físicas y químicas del superfosfato triple de calcio (SFT)*

Tipo	Propiedades	Especificaciones
Físicas	Estado físico	Sólido granulado esférico
	Color	Gris claro
	Densidad aparente (kg m <sup>-3</sup> )	1040
	Solubilidad en agua, 20 °C (100 g 100 ml <sup>-1</sup> )	85%
	Humedad relativa crítica (30 °C)	94%
	Volatilización	Baja
Químicas	Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	46%
	Calcio (CaO)	21%
	pH (1%)	2 a 3 unidades

Fuente: Fertinova Agroproductos (2015b).

**b. Fosfato diamónico (DAP)**

El International Plant Nutrition Institute (IPNI, s. f.-b) señala que el fosfato diamónico es el fertilizante más empleado en el mundo, está formulado a partir de la reacción neutralizada de ácido fosfórico con amoníaco. Químicamente, se conoce como fosfato de amonio dibásico, o simplemente DAP (Ataman Kimya, 2020). Al mismo tiempo, Barba (2022) señala que se compone de dos macronutrientes [nitrógeno (N) y fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) en proporciones de 18% y 46%, respectivamente] y tiene por fórmula química a (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>.

**Tabla 5***Propiedades físicas y químicas del fosfato diamónico (DAP)*

Tipo	Propiedades	Especificaciones
Físicas	Estado físico	Sólido granulado esférico
	Color	Marrón claro
	Densidad aparente (kg m <sup>-3</sup> )	955 – 1040
	Solubilidad en agua, 20 °C (100 g 100 ml <sup>-1</sup> )	58.0 g 100 ml <sup>-1</sup> de agua
	Humedad relativa crítica (30 °C)	83%

Tipo	Propiedades	Especificaciones
Químicas	Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	46%
	Nitrógeno (N)	18%
	Azufre (S)	2 – 3%
	Calcio (CaO)	1100 ppm
	Zinc (Zn)	500 ppm
	Manganeso (Mn)	100 ppm
	Hierro (Fe)	1%
	pH (10%)	7.4 a 8.0 unidades

Fuente: Anagra (s. f.), y Fertinova Agroproductos (2015a).

### *c. Roca fosfórica (RF)*

La roca fosfórica es un fertilizante natural que contiene uno o más minerales de fosfato, proviene de depósitos sedimentarios marinos (75%), de depósitos ígneos, metamórficos y erosionados (15 – 20%), y de fuentes biogénicas (2 – 3%) (acumulaciones de guano de aves y murciélagos) (van Straaten, 2002), ubicados en diferentes partes del mundo (Fayiga y Nwoke, 2016). Se obtiene a partir de la trituración, molienda, tamizado, separación magnética y flotación de las rocas de fosfato (van Straaten, 2007). Químicamente, es un fosfato tricálcico combinado con una cierta cantidad de flúor, cloro o el grupo hidroxilo, cuya estructura está representada por la fórmula  $Ca_{10}(PO_4, CO_3, SO_4)_6(F, Cl, OH)_2$  y pertenece a la familia mineralógica de las apatitas (Chappa, 1992; Nielson y Sarudiansky, 2005). En el Perú, las rocas fosfóricas presentan una composición química muy variable (Besoain et al., 1991), con concentraciones que pueden alcanzar hasta un 30% de fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) y hasta un 48% de calcio (CaO) (Sierra, 1990); sin embargo, en esta investigación se utilizó roca fosfórica con 20% de fósforo y 32% de calcio, proveniente de Bayóvar, Sechura – Perú (Corporación Agrosechura Perú S.A.C.).

**Tabla 6***Propiedades físicas y químicas de la roca fosfórica (RF)*

Tipo	Propiedades	Especificaciones
Físicas	Estado físico	Arena grano fino
	Color	Marrón-Plomo
	Densidad (TM m <sup>-3</sup> )	1.49 a 1.51
	Solubilidad en ácido cítrico al 2%	15.3%
	Humedad	08 a 10%
	Olor	Inodoro
	Químicas	Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )
Calcio (CaO)		25 a 35%
Magnesio (MgO)		0.6 a 0.8%
Sodio (Na <sub>2</sub> O)		1.1 a 1.3%
Microelementos		Fe, Zn, Cu, en trazas
pH		6 a 8 unidades

Fuente: Central Café & Cacao (2017), y Nielson y Sarudiansky (2005).

### 2.2.6 Rendimiento de cultivos forrajeros

Muchas plantas pueden cultivarse para la producción de forraje, los cultivos forrajeros suelen ser gramíneas o leguminosas herbáceas, en particular el rye grass o el trébol, respectivamente (Batello et al., 2011). De hecho, la característica más importante de un buen cultivo forrajero es el rendimiento o la rápida producción de biomasa, ya que estos se cortan o se pastorean directamente, a su vez, existe una buena correlación con la altura de planta en la mayoría de los cultivos (Capstaff y Miller, 2018). En efecto, Mejía (2022) evaluó el rendimiento de rye grass Ecotipo Cajamarquino en Chota – Cajamarca, y registró valores de 9,860.00 kg MV ha<sup>-1</sup> corte<sup>-1</sup> y 3,176.00 kg MS ha<sup>-1</sup> corte<sup>-1</sup>; asimismo, Vallejos et al. (2021) en su investigación realizada con trébol blanco Huia en Santa Cruz – Cajamarca, reportaron un rendimiento de 6,366.80 kg MS ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>.

La diversidad de especies forrajeras también puede influir benéficamente en el rendimiento de biomasa de los cultivos (Tahir et al., 2022). Estudios informan que la asociación de pasturas aumenta el rendimiento de forraje en comparación con los cultivos puros (Bacchi et al., 2021; Orellana, 2023). En la misma línea, Tafur-Sanchez y García-Torres (2022) evaluaron el comportamiento productivo de asociaciones de especies forrajeras en Luya – Amazonas, y obtuvieron 20,475.00 kg MV ha<sup>-1</sup> corte<sup>-1</sup> y 4,034.40 kg MS ha<sup>-1</sup> corte<sup>-1</sup> en rye grass – trébol blanco; de la misma manera, R. E. Vallejos (2021) evaluó la producción de forraje de la asociación rye grass ecotipo cajamarquino – trébol blanco en Cajamarca, y encontró valores de 5,588.00 kg MS ha<sup>-1</sup> corte<sup>-1</sup>, con una altura de planta de 47.10 cm, a una frecuencia de corte de 60 días. Sin embargo, el rendimiento y calidad del forraje está influenciado por varios parámetros como prácticas de manejo, composición botánica, condiciones edafoclimáticas, y en particular, la disponibilidad de nutrientes del suelo (Perotti et al., 2021).

El fósforo tiene un efecto significativo en el desarrollo de raíces, la altura de planta, y la producción y expansión de hojas, lo que aumenta la cantidad y calidad del rendimiento de los cultivos forrajeros (Johan et al., 2021; Ullah et al., 2023). Por lo tanto, el suministro de fertilizantes a base de fósforo es esencial para reponer los niveles de P en los suelos, satisfacer las demandas nutricionales y favorecer el rendimiento de los cultivos (Marino, 2023; Ullah et al., 2023; Vance et al., 2003). Varios autores como Bohner (2021), Cevallos (2015), y Lima et al. (2020) han informado que el rendimiento de pasturas a base de rye grass y trébol blanco se ha incrementado significativamente con la aplicación de fertilizantes fosforados. En Cajamarca se ha reportado un incremento en el rendimiento de la asociación rye grass – trébol blanco en 19.5% de MS en respuesta a la fertilización fosforada en dosis de 80 kg P ha<sup>-1</sup> (L. A. Vallejos, 2009); de manera similar, Torres (2022) en Cutervo – Cajamarca, con una dosis de 70 kg P ha<sup>-1</sup>, obtuvo un rendimiento de 15,177.00 kg MV ha<sup>-1</sup> y 4,580.00 kg MS ha<sup>-1</sup> equivalente a un 11.43% y 11.71% de incremento en relación con el testigo, respectivamente; y, Mejía

(2022) en Chota – Cajamarca, fertilizando con  $80 \text{ kg P ha}^{-1}$ , halló un rendimiento de  $20,067.00 \text{ kg MV ha}^{-1}$  y  $6,223.00 \text{ kg MS ha}^{-1}$ , lo que representa un incremento del 65.12% y 66.70% en comparación con el tratamiento sin aplicación, en las variedades de rye grass evaluadas. Sin embargo, el nivel de respuesta de las pasturas a la fertilización fosforada varía de manera considerable según el tipo de cultivo y la variedad, el tipo de suelo, el sistema de cultivo, el historial de manejo, la fuente de fósforo y las condiciones ambientales (Daoui et al., 2014; Fayiga y Nwoke, 2016; Silveira y Kohmann, 2020).

### 2.3 Definición de términos

**Abonamiento o fertilización:** Se refiere a la aplicación de nutrientes, principalmente nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) en cantidades óptimas, en las proporciones adecuadas a través de métodos apropiados y en los momentos correctos para un cultivo y una situación agroclimática específica, con la finalidad de mantener la fertilidad del suelo, corregir deficiencias de nutrientes en cultivos y en recursos forrajeros, y aumentar la productividad de los cultivos (Mahajan y Gupta, 2009; Marino, 2023).

**Altura de planta (AP):** Es uno de los componentes más importantes del crecimiento de las plantas y afecta la biomasa de la planta y el rendimiento; sin embargo, puede verse afectada por el genotipo, la regulación hormonal de la planta, las interacciones con otras plantas y las condiciones ambientales como la temperatura, la luz, el agua, el suelo, los nutrientes y otros (Miao et al., 2024).

**Asociación forrajera:** Es la mezcla entre dos o más especies forrajeras, especialmente gramíneas y leguminosas, que es una práctica eficiente para mejorar la producción de forrajes y garantizar el desarrollo sostenible de la agricultura y la ganadería (polyfarming, 2020; B. Wang et al., 2022).

**Fosfato diamónico (DAP):** Es un abono o fertilizante granulado universal de uso común, perfecto para cualquier cultivo agrícola, y una excelente fuente de fósforo (46%) y nitrógeno

(18%) para la nutrición de las plantas durante todo su crecimiento y desarrollo (Ataman Kimya, 2020).

**Rendimiento de forraje:** Es el peso del forraje que se produce por unidad de superficie terrestre durante un periodo de tiempo determinado. Se expresa como materia verde, materia seca (secado al aire o al horno) y puede calificarse como rendimiento anual, del año en curso o estacional. El rendimiento se refiere a la producción anual de forraje disponible expresado en kilogramos de materia verde por hectárea ( $\text{kg MV ha}^{-1}$ ) o en kilogramos de materia seca por hectárea ( $\text{kg MS ha}^{-1}$ ) (Harris, 2000).

**Roca fosfórica (RF):** Es un abono simple fosfatado o fertilizante natural de liberación lenta utilizado en la agricultura principalmente como fuente de fósforo y calcio para la nutrición de las plantas (Fayiga y Nwoke, 2016).

**Rye grass italiano:** Es una especie de gramínea anual (*Lolium multiflorum* var. *Westerwoldicum*) o bianual (*Lolium multiflorum* var. *Italicum*) de establecimiento rápido, alta producción y excelente calidad de forraje dentro de los sistemas pastoriles (Demagnet, 2009).

**Superfosfato triple de calcio (SFT):** Es un abono o fertilizante granulado comúnmente empleado en la agricultura en todo el mundo como fuente de fósforo (46%) y como complemento secundario de calcio (21%) para mejorar la calidad de los cultivos y una mejor producción agrícola (Fertinova Agroproductos, 2015b; IndustryARC, s. f.).

**Trébol blanco:** Es la principal leguminosa perenne en sistemas pastoriles y aporta nitrógeno a través de la fijación, mejora el valor nutritivo del forraje, buena palatabilidad, de alta persistencia en pasturas sometidas a pastoreo y, complementa, en asociación, con todas las gramíneas perennes (Demagnet, 2019).

## **CAPÍTULO III**

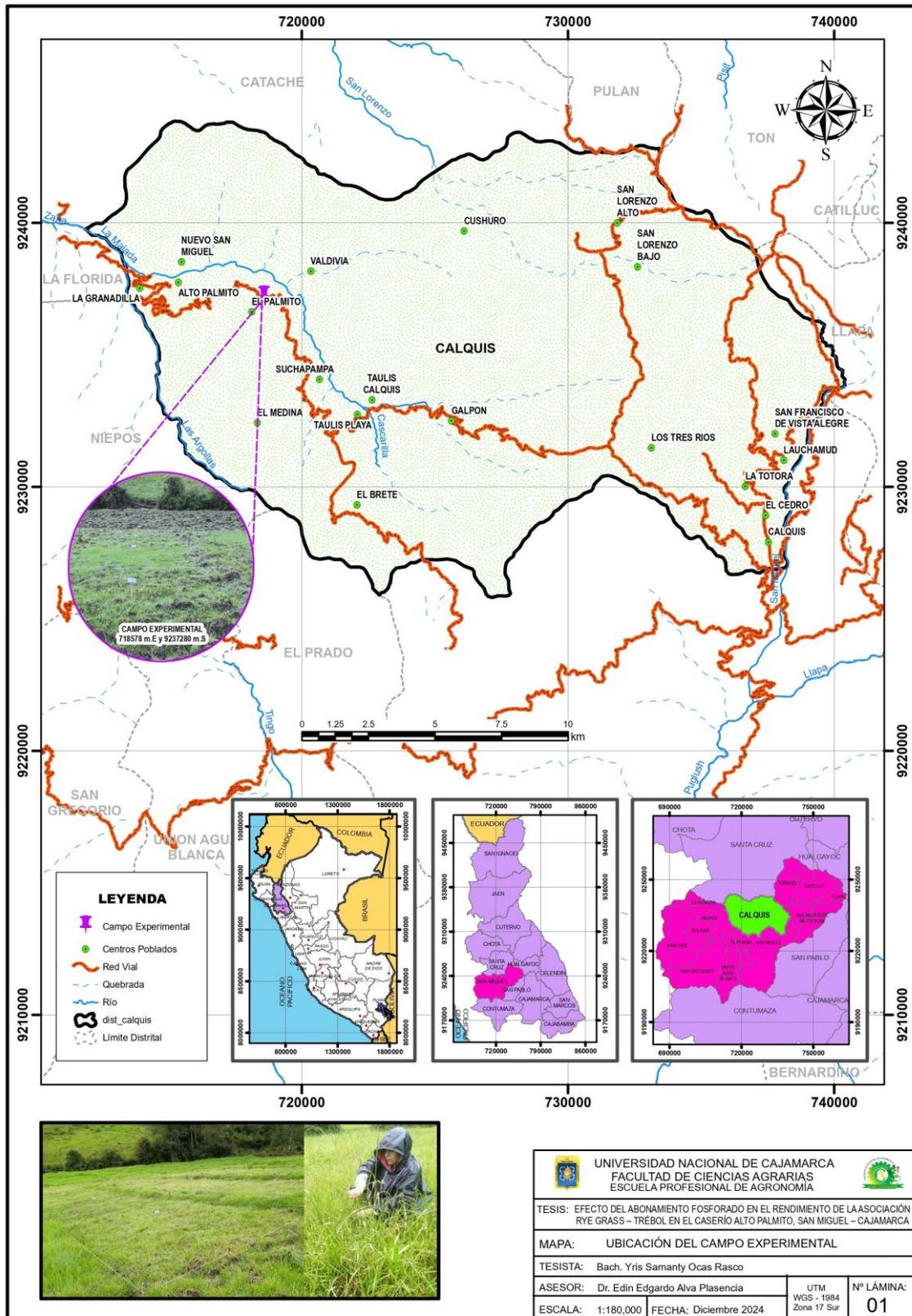
### **MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1 Ubicación**

La presente investigación se realizó en la propiedad del señor Edilbrando Bustamante Quispe, situada en el caserío Alto Palmito, distrito de Calquis, provincia de San Miguel y departamento de Cajamarca, entre los meses de diciembre de 2023 y mayo de 2024, con coordenadas UTM 718578 m E y 9237280 m S, a una altitud de 2537 m s. n. m. Presenta un clima semiseco y templado, lluvioso en verano y frío en invierno, con una temperatura media anual de 15.40 °C, una humedad relativa media anual de 82% y una precipitación pluvial media anual de 816 mm (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú [SENAMHI], 2024).

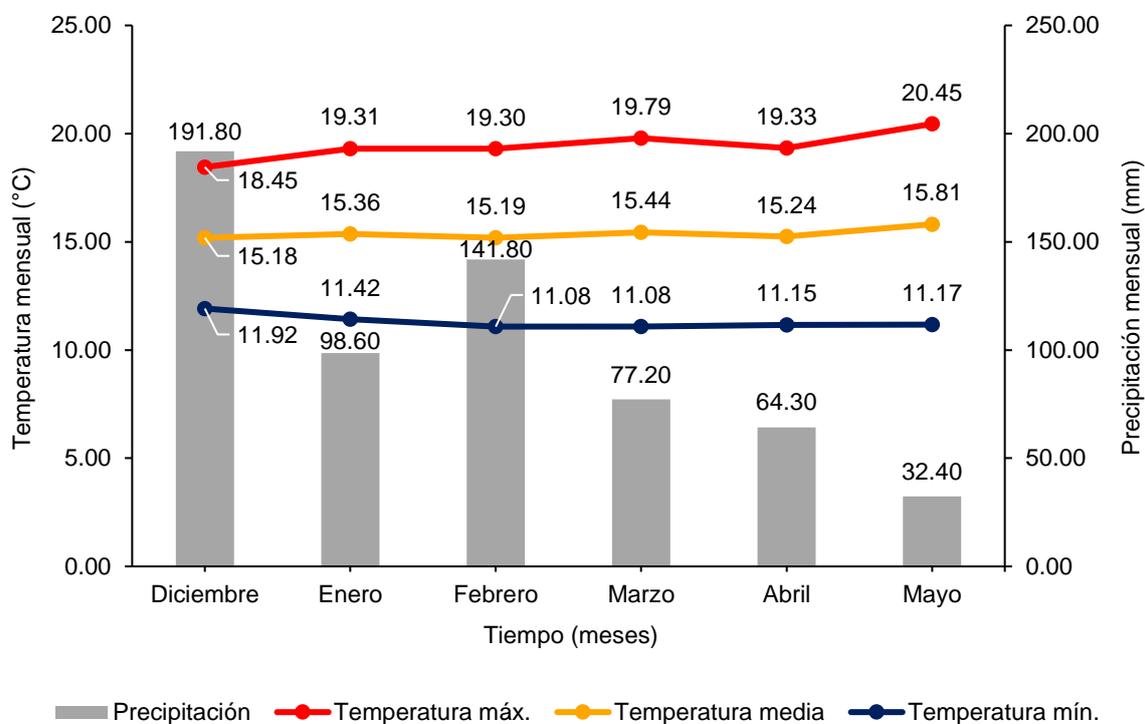
**Figura 1**

*Ubicación del campo experimental en el caserío Alto Palmito, distrito de Calquis, provincia de San Miguel y departamento de Cajamarca – Perú.*



**Figura 2**

*Datos meteorológicos promedio mensuales registrados durante el periodo de la investigación (diciembre 2023 – mayo 2024).*



Fuente: SENAMHI (2024).

## 3.2 Materiales

### 3.2.1 Material biológico

- Semilla de rye grass Ecotipo Cajamarquino
- Semilla de trébol blanco var. Huia AGP Semillas

### 3.2.2 Materiales de campo

- Barreno
- Wincha
- Azada
- Picota
- Rastrillo

- Estacas
- Rafia
- Letreros
- Cuadrante (0.50 m x 0.50 m)
- Hoz
- Bolsas de polietileno
- Guantes Clute Superflex
- Libreta de campo

### **3.2.3 *Materiales de laboratorio***

- Balanza analítica
- Placas Petri
- Bolsas de papel Kraft
- Mandil
- Mascarilla

### **3.2.4 *Materiales de escritorio***

- Impresora
- Hojas bond A4
- Cinta masking
- Lapicero
- Tijeras
- Laptop

### **3.2.5 *Equipos***

- Estufa MRC
- Motoguadaña Honda UMK435T
- Cámara fotográfica

- GPS

### 3.2.6 Insumos

- Superfosfato triple de calcio Molinos & Cía
- Fosfato diamónico Inkafert
- Roca fosfórica Fosbayovar

## 3.3 Metodología

### 3.3.1 Tratamientos de estudio

**Tabla 7**

*Descripción de los tratamientos de estudio*

Clave	Dosis (kg P ha <sup>-1</sup> )	Tratamiento
T0	0	Testigo
T1	80	Superfosfato triple de calcio (00-46-00)
T2	80	Fosfato diamónico (18-46-00)
T3	80	Roca fosfórica (00-20-00)

### 3.3.2 Diseño experimental

En esta investigación se utilizó el diseño de bloques completos al azar (DBCA), con 4 tratamientos y 3 repeticiones, resultando en un total de 12 unidades experimentales.

#### A. Dimensiones del campo experimental

##### a. Bloques

Número de bloques	:	03
Largo de bloques	:	20.00 m
Ancho de bloques	:	4.00 m
Área total de bloques	:	80.00 m <sup>2</sup>
Camino	:	1.00 m

##### b. Parcelas

Número de parcelas	:	12
--------------------	---	----

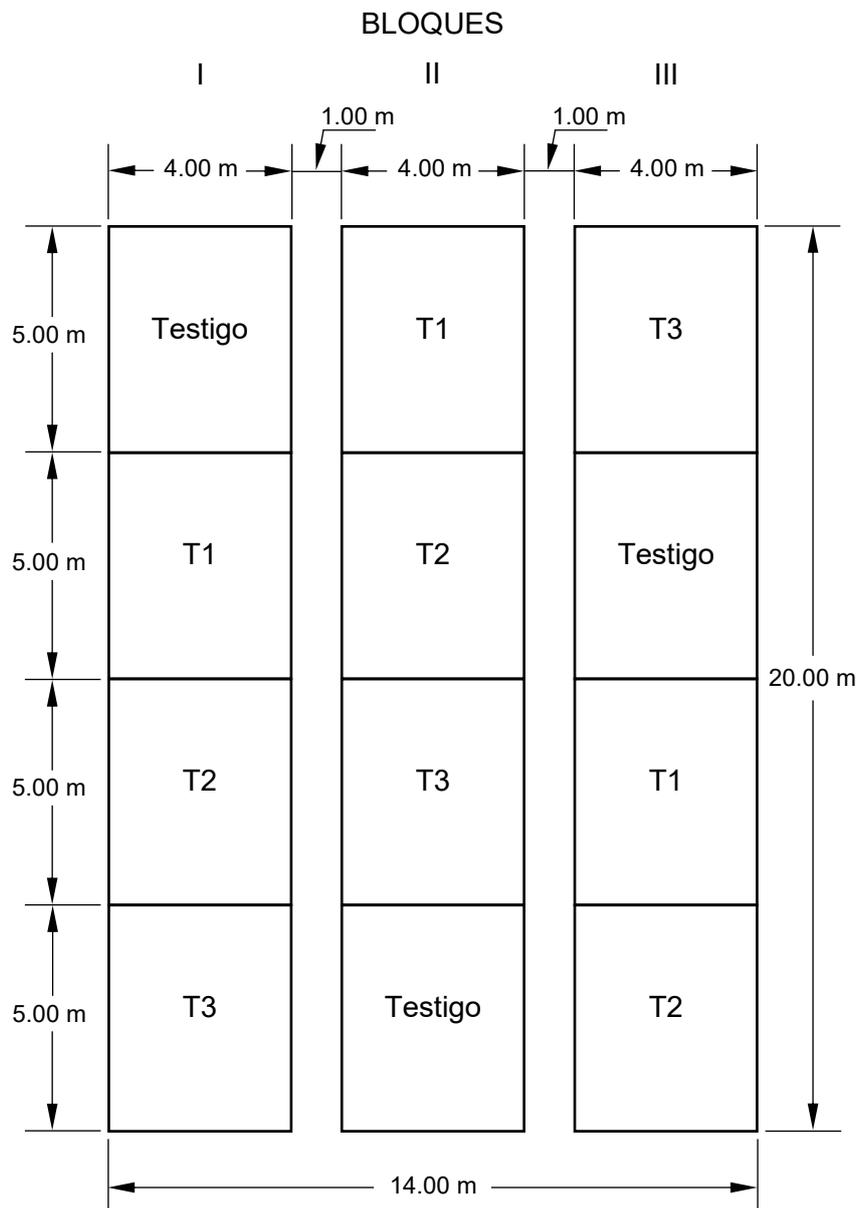
Largo de la parcela : 5.00 m  
 Ancho de la parcela : 4.00 m  
 Área total de la parcela : 20.00 m<sup>2</sup>

**c. Campo experimental**

Largo del experimento : 20.00 m  
 Ancho del experimento : 14.00 m  
 Área total del experimento : 280.00 m<sup>2</sup>

**Figura 3**

*Distribución de tratamientos en el campo experimental.*



### 3.3.3 *Conducción del experimento*

#### **A. Muestreo y análisis de suelos**

El proceso consistió en tomar submuestras en forma de zigzag empleando un barreno del área a cultivar, cada porción colectada se mezcló en forma homogénea con el fin de obtener una sola muestra representativa (1 kg aprox.); después, esta muestra se depositó en una bolsa plástica nueva previamente identificada y, finalmente, se envió al Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María – Huánuco para su respectivo análisis. Los resultados del análisis físico – químico se muestran en la Tabla 8.

**Tabla 8**

*Resultados e interpretación del análisis físico – químico de suelos del campo experimental*

<b>Determinación analítica</b>	<b>Unidad</b>	<b>Resultado</b>	<b>Interpretación</b>
Arena (A)	%	53.52	
Arcilla (Ar)	%	11.76	Franco Arenoso
Limo (L)	%	34.72	
pH	1:1	5.28	Medianamente ácido
Conductividad eléctrica (CE)	dS/m	0.158	-
Materia orgánica (M.O.)	%	4.478	Alto
Nitrógeno total (N)	%	0.224	Alto
Fósforo disponible (P)	ppm	8.154	Medio
Potasio disponible (K)	ppm	171.975	Medio

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (2023).

#### **B. Prueba de germinación de semillas**

La prueba de germinación de semillas se realizó en cajas Petri de vidrio que contenían algodón y papel de filtro humedecido, donde se colocaron 100 semillas bien distribuidas por recipiente, en dos repeticiones; luego, se ubicaron en un ambiente con condiciones estándares de humedad, luz y temperatura. Diariamente se observaron y se contaron las semillas

germinadas por un periodo de 10 días (León et al., 2018). Para determinar la calidad de semilla utilizada (Tabla 9), se empleó las Ecuaciones 1, 2 y 3 (Farfán y Farfán, 2012).

$$\text{Poder germinativo} = \frac{\text{Semillas germinadas}}{\text{Total de semillas (100)}} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Pureza física} = \frac{\text{Peso de la muestra (100 g)} - \text{Peso de impurezas}}{\text{Peso de la muestra (100 g)}} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{Valor cultural} = \frac{\text{Poder germinativo} \times \text{Pureza física}}{100} \quad (3)$$

**Tabla 9**

*Calidad de semilla empleada en la siembra*

Semillas	Poder germinativo (%)	Pureza física (%)	Valor cultural (%)
Rye grass Ecotipo Cajamarquino	57	70	39.90
Trébol blanco Huia	94	99	93.06

### **C. Preparación del suelo**

La preparación del terreno se realizó durante 7 días previos a la siembra. La labranza del suelo se realizó con una yunta de toros; luego, la cruza en forma perpendicular hasta deshacer los grandes terrones; y posteriormente, el mullido y nivelación del terreno con una azada hasta que el suelo quede completamente trabajado y desmenuzado.

### **D. Delimitación y trazado de parcelas**

La marcación del campo experimental se realizó con la ayuda de una wincha, estacas y rafia. El área total del experimento fue de 280.00 m<sup>2</sup>, la cual se dividió en 3 bloques y 4 parcelas por bloque de 5.00 m x 4.00 m cada una; además, se delimitó caminos de 1.00 m entre bloques. En cada unidad experimental (parcela) se señaló con letreros conforme a la distribución de los tratamientos en el croquis (Figura 3).

### **E. Abonamiento al suelo**

De acuerdo al análisis de suelos, se optó por utilizar fuentes fosforadas como superfosfato triple de calcio (46%P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), fosfato diamónico (46%P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) y roca fosfórica

(20%P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). Aplicando la fórmula de abonamiento (0%N–80%P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>–0%K<sub>2</sub>O) recomendada para pasturas asociadas de rye grass – trébol (Mamani et al., 2011), se calculó la dosis requerida para cada tratamiento (Tabla 10). Posteriormente, se realizó el pesaje y se aplicó al terreno en forma manual por el método al voleo. Este proceso se efectuó sólo al momento de la siembra. Para ningún fertilizante se consideró la eficiencia de uso.

### **Cálculo de la dosis de abonamiento**

Fuente 1: Superfosfato triple de calcio (SFT) (46% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>);

$$\begin{array}{l}
 100 \text{ kg SFT} \text{-----} 46 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \\
 X \text{-----} 80 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} \\
 X = \frac{(100 \text{ kg SFT})(80 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1})}{46 \text{ kg P}_2\text{O}_5} \\
 X = 173.91 \approx 174 \text{ kg SFT ha}^{-1}
 \end{array}$$

Fuente 2: Fosfato diamónico (DAP) (46% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>);

$$\begin{array}{l}
 100 \text{ kg DAP} \text{-----} 46 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \\
 X \text{-----} 80 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} \\
 X = \frac{(100 \text{ kg DAP})(80 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1})}{46 \text{ kg P}_2\text{O}_5} \\
 X = 173.91 \approx 174 \text{ kg DAP ha}^{-1}
 \end{array}$$

Fuente 3: Roca fosfórica (RF) (20% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>);

$$\begin{array}{l}
 100 \text{ kg RF} \text{-----} 20 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \\
 X \text{-----} 80 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} \\
 X = \frac{(100 \text{ kg RF})(80 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1})}{20 \text{ kg P}_2\text{O}_5} \\
 X = 400 \text{ kg RF ha}^{-1}
 \end{array}$$

**Tabla 10***Cantidad de fertilizante aplicado en cada parcela experimental*

Fuente	Contenido de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	Dosis recomendada (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> )	Dosis de abonamiento	
			kg ha <sup>-1</sup>	kg parcela <sup>-1</sup>
Superfosfato triple de calcio	46	80	174	0.348
Fosfato diamónico	46	80	174	0.348
Roca fosfórica	20	80	400	0.800

**F. Siembra**

Antes de efectuar este proceso, se calculó la densidad de siembra empleando la Ecuación 4 (Farfán y Farfán, 2012; León et al., 2018), teniendo en cuenta la prueba de germinación (Tabla 9) y la cantidad de semilla recomendada (Tabla 11); luego, se pesó la dosis exacta de semilla requerida por parcela. La siembra se realizó inmediatamente después al abonamiento, en forma manual y al voleo y, a continuación, se pasó rastrillo ligeramente para cubrir las semillas.

$$Densidad\ de\ siembra = \frac{Semilla\ recomendada\ (kg\ ha^{-1})}{Valor\ cultural} \times 100 \quad (4)$$

**Tabla 11***Cantidad de semilla distribuida por parcela experimental*

Cultivar	Semilla recomendada (kg ha <sup>-1</sup> )	Valor cultural (%)	Densidad de siembra	
			kg ha <sup>-1</sup>	kg parcela <sup>-1</sup>
Rye grass Ecotipo Cajamarquino	20	39.90	50.13	0.100
Trébol blanco Huia	3	93.06	3.22	0.006

**G. Deshierbo y primer corte**

El deshierbo se realizó manualmente empleando una picota con el fin de eliminar la presencia de malezas en el terreno durante el desarrollo del cultivo. El primer corte o corte de limpieza se realizó a los 90 días después de la siembra con la ayuda de una motoguadaña, con

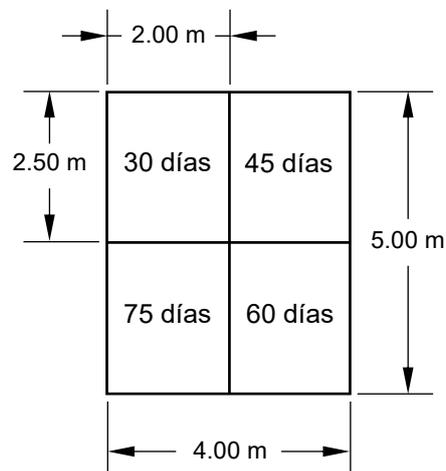
el propósito de mantener un control efectivo de las malezas y promover un crecimiento uniforme de la pastura (Flores et al., 2022).

### 3.3.4 Variables evaluadas

Las evaluaciones se realizaron teniendo en cuenta cuatro frecuencias de corte a los 30, 45, 60 y 75 días después del primer corte o corte de limpieza, comprendida entre los meses de marzo y mayo del año 2024, y en época de lluvia. Para evaluar las variables, cada unidad experimental se dividió en cuatro subparcelas en función a la frecuencia de corte (Figura 4).

#### Figura 4

*Distribución de la frecuencia de corte en cada unidad experimental.*



#### A. Altura de planta (AP)

Para evaluar esta variable se tomó una planta seleccionada al azar dentro de un cuadrante de  $0.25 \text{ m}^2$  ( $0.50 \text{ m} \times 0.50 \text{ m}$ ) lanzado en forma aleatoria. La medición se realizó solamente a la gramínea, desde la base (nivel del suelo) hasta la parte con la mayor concentración de hojas con la ayuda de una wincha. Se realizó 3 mediciones por tratamiento en función a la frecuencia de corte (Figura 4). Los resultados fueron expresados en centímetros (cm).

## B. Rendimiento de materia verde (RMV)

Para evaluar el rendimiento de materia verde se cortó el forraje delimitado por un cuadrante de 0.25 m<sup>2</sup> (0.50 m x 0.50 m). Se tomaron 3 muestras al azar por tratamiento según la frecuencia de corte (Figura 4), dejando un remanente de 5 cm de altura. Cada una de las muestras se pesaron en una balanza analítica y luego se transportaron al Laboratorio de Pastos y Forrajes de la Facultad de Ingeniería en Ciencia Pecuarias de la Universidad Nacional de Cajamarca para su posterior procesamiento. Los datos del pesaje sirvieron para calcular el rendimiento de materia verde en kilogramos por hectárea (kg ha<sup>-1</sup>), teniendo en cuenta la Ecuación 5 (Farfán y Farfán, 2012).

$$RMV(kg\ ha^{-1}) = \frac{\text{Peso promedio de las muestras (kg)} \times 10\ 000\ (m^2)}{\text{Área del cuadrante (m}^2)} \quad (5)$$

Donde:

*RMV*: rendimiento de materia verde, kg ha<sup>-1</sup>.

## C. Rendimiento de materia seca (RMS)

Para evaluar la variable rendimiento de materia seca se pesaron 100 g de forraje (peso fresco) por tratamiento de las muestras de materia verde provenientes de campo; luego, se procedió a secar en una estufa a 105 °C durante 24 horas hasta que se alcanzó un peso seco constante. Las muestras secas fueron retiradas, se dejaron enfriar y se registró el peso (peso seco). Para calcular el porcentaje y el rendimiento de materia seca se utilizó la Ecuación 6 y 7 (Calvache-Ulloa y Valle, 2021).

$$\% MS = \frac{\text{Peso de muestra seca (g)}}{\text{Peso de muestra húmeda (g)}} \times 100 \quad (6)$$

Donde:

*% MS* : porcentaje de materia seca.

$$RMS(kg\ ha^{-1}) = \frac{\% MS \times \text{Peso de materia verde } (kg\ ha^{-1})}{100} \quad (7)$$

Donde:

$RMS$  : rendimiento de materia seca,  $kg\ ha^{-1}$ ,

$\% MS$  : porcentaje de materia seca.

### 3.3.5 *Procesamiento y análisis de datos*

Los datos obtenidos de campo se registraron en un Libro de Excel (Microsoft Office 2016). Para evaluar diferencias significativas entre tratamientos se realizó el análisis de varianza (ANOVA) al 5%; mientras que, para comparar las medias de los tratamientos se utilizó la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ). El procesamiento de los datos se realizó en el software estadístico InfoStat versión 2020.

El análisis de datos se realizó considerando el modelo estadístico lineal de la Ecuación 8 (Vásquez, 2014).

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij} \quad (8)$$

Donde:

$Y_{ij}$  : rendimiento de la asociación rye grass – trébol blanco en el  $i$  – ésimo tratamiento y en el  $j$  – ésimo bloque,

$\mu$  : efecto medio de la muestra,

$\tau_i$  : efecto del  $i$  – ésimo tratamiento (superfosfato triple de calcio, fosfato diamónico, roca fosfórica y testigo),

$\beta_j$  : efecto del  $j$  – ésimo bloque,

$\varepsilon_{ij}$  : efecto del error experimental.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 Altura de planta (cm) a una frecuencia de corte de 60 días

En la Tabla 12, se muestra los resultados del análisis de varianza (ANOVA) para la altura de planta de rye grass Ecotipo Cajamarquino asociado con trébol blanco Huia, donde se puede observar que no existe diferencias significativas entre bloques; dado que, el valor de significación (p-valor = 0.3186) es mayor que el 0.05. Para los tratamientos, el valor de significación (p-valor = 0.0002) es menor que el 0.05, lo que indica que hay diferencias significativas en la altura de planta entre los diferentes tratamientos; es decir, que los tratamientos con diferentes fuentes fosforadas afectaron significativamente la altura de planta del rye grass asociado con trébol blanco en comparación con el testigo.

El coeficiente de variación estimado (CV) es de 4.25%, el cual indica que la variabilidad de los resultados dentro de cada tratamiento es baja; por lo que, el diseño empleado en el experimento presentó un buen control sobre la variabilidad de la altura de planta.

**Tabla 12**

*Análisis de varianza (ANOVA) para la altura de planta (AP) de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia a una frecuencia de corte de 60 días*

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F calculado	p-valor
Bloques	7.39	2	3.69	1.39	0.3186
Tratamientos	370.46	3	123.49	46.56	0.0002
Error	15.91	6	2.65		
Total	393.76	11			

CV = 4.25%

En la Tabla 13 y Figura 5, al realizar la prueba de Tukey al 5%, se observan diferencias significativas entre los tratamientos fosforados y el tratamiento testigo. La mayor altura de planta lo presentó el tratamiento con fosfato diamónico con un valor promedio de 46.22 cm situado en el grupo A, en relación al tratamiento testigo con 31.22 cm ubicado en el grupo C, lo que proporciona una diferencia significativa favorable y resalta la efectividad y superioridad del fosfato diamónico como fuente de fósforo. Por otro lado, el tratamiento con roca fosfórica presentó un resultado promedio en altura de 40.22 cm colocándose en el grupo B, menos efectivo que el fosfato diamónico, pero mostrando una mejora en relación con el testigo. El tratamiento con superfosfato triple de calcio presentó una altura promedio de 35.67 cm ubicándose en el grupo BC, este resultado es semejante al obtenido con el testigo; con el cual se obtuvo una altura promedio de 31.22 cm situado en el grupo C, resultando en un crecimiento menor y diferenciándose del resto de tratamientos.

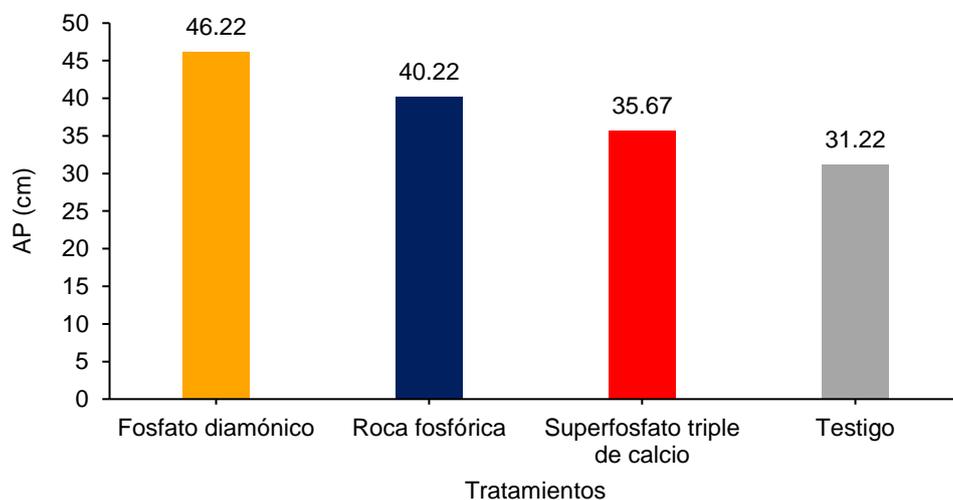
**Tabla 13**

*Prueba de Tukey al 5% para la altura de planta (AP) de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia a una frecuencia de corte de 60 días*

Tratamientos	Altura de planta (cm)	Agrupación
Fosfato diamónico (T2)	46.22	A
Roca fosfórica (T3)	40.22	B
Superfosfato triple de calcio (T1)	35.67	BC
Testigo (T0)	31.22	C

## Figura 5

Efecto de los tratamientos sobre la altura de planta (AP) de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia a una frecuencia de corte de 60 días.



A los 60 días de corte, la mayor altura de planta se obtuvo con fosfato diamónico (46.22 cm), seguido del tratamiento con roca fosfórica (40.22 cm) y superfosfato triple de calcio (35.67 cm), superando al tratamiento testigo cuyo valor fue de 31.22 cm. Por lo tanto, el uso de fuentes fosforadas incrementa la altura de rye grass Ecotipo Cajamarquino asociado con trébol blanco Huia frente al tratamiento sin aplicación. Estos resultados se asemejan a los hallados por Lima et al. (2020), quienes evaluaron el efecto del fosfato diamónico en dosis de 80 kg P ha<sup>-1</sup>, en praderas de *Festuca dolichophylla* asociadas con trébol blanco Huia en el sector Ayaracra – Pasco, y registraron una altura de gramínea de 46.80 cm, en comparación con los 41.00 cm del tratamiento sin aplicación; evidenciando la respuesta del fosfato diamónico en el crecimiento y desarrollo de la festuca. Así mismo, son inferiores a lo reportado por Bacchi et al. (2021), quienes realizaron una investigación en Reggio Calabria – Italia, en cultivos forrajeros anuales fertilizados con fosfato diamónico en dosis de 36 kg N ha<sup>-1</sup> y 92 kg P ha<sup>-1</sup>, y obtuvieron una altura promedio de 64 cm en rye grass cv. Elunaria; en tal sentido, esta ligera superioridad puede atribuirse a la variedad del cultivo, a la dosis de fertilización y a las condiciones específicas del lugar; puesto que, según Daoui et al. (2014), y Fayiga y Nwoke

(2016), la respuesta del cultivo a la fertilización con fósforo está influenciado fuertemente por factores como la variabilidad genética y el tipo de cultivo, la fuente y la tasa de aplicación de fósforo, el tipo de suelo, el sistema de cultivo y las condiciones ambientales.

El efecto superior del fosfato diamónico en la altura de planta del rye grass Ecotipo Cajamarquino asociado con trébol blanco Huia se atribuye a su contenido de macronutrientes esenciales (N y P), presentes en concentraciones medianamente altas, tal como lo señala Nadarajan y Sukumaran (2021), el fosfato diamónico es una fuente efectiva de nitrógeno y fósforo, que se disuelve rápidamente en el suelo, permitiendo que las plantas absorban estos nutrientes en forma de fosfato y amonio. El nitrógeno del fosfato diamónico contribuye a la síntesis de aminoácidos, proteínas, enzimas y ácidos nucleicos necesarios para un adecuado crecimiento vegetativo de las plantas (Chrysargyris et al., 2016; Chuma et al., 2022); mientras que, el fósforo estimula la producción de ácidos nucleicos, fosfolípidos y ATP, necesarios para la división celular, la replicación del ADN y el almacenamiento y transferencia de energía, así como una adecuada formación y expansión de raíces, mejorando la capacidad de absorción de agua y nutrientes del suelo; el cual tiene un efecto significativo sobre los caracteres fisiológicos de los cultivos, incluido la superficie foliar y la altura de planta (Johnson, 2020; Ullah et al., 2023).

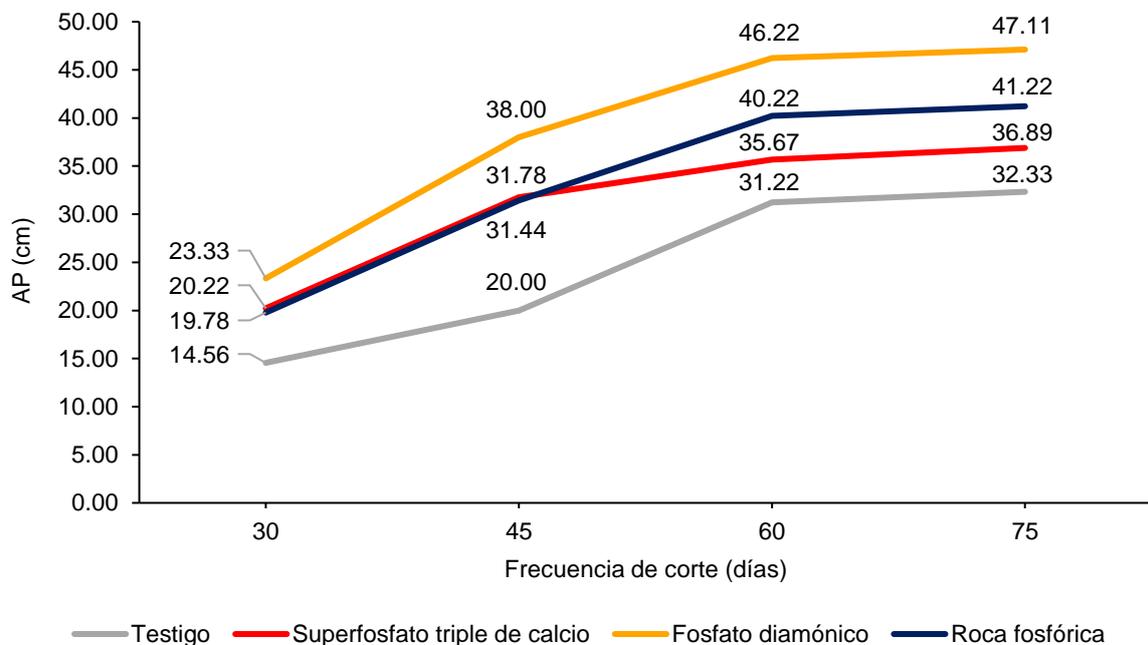
#### **4.2 Altura de planta (cm), en función de los tratamientos y la frecuencia de corte**

En la Figura 6, se muestra los resultados de la altura de planta del rye grass Ecotipo Cajamarquino asociado con trébol blanco Huia por el efecto de diferentes tratamientos fosforados y el testigo, en función de la frecuencia de corte. A los 30 días, la mayor altura de planta lo presentó el tratamiento con fosfato diamónico con un valor promedio de 23.33 cm, seguido del superfosfato triple de calcio con 20.22 cm y la roca fosfórica con 19.78 cm; mientras que, el tratamiento testigo con 14.56 cm mostró el valor más bajo entre todos los tratamientos, esto indica que el fosfato diamónico presenta mejores resultados en relación con

el testigo en las primeras etapas de crecimiento. A los 45 días, el tratamiento con fosfato diamónico siguió mostrando superioridad en la altura de planta con 38.00 cm, respecto a los demás tratamientos fosforados y al tratamiento testigo de 20.00 cm; sin embargo, la diferencia entre el superfosfato triple de calcio con 31.78 cm y la roca fosfórica con 31.44 cm es mínima. A los 60 días, el fosfato diamónico siguió manteniéndose como el tratamiento fosforado más efectivo en el crecimiento de las plantas con una altura de 46.22 cm, seguido de la roca fosfórica con 40.22 cm que superó al superfosfato triple de calcio con 35.67 cm y al testigo con 31.22 cm. A los 75 días, el fosfato diamónico se destacó como el tratamiento con mayor eficacia en la altura de planta con 47.11 cm, seguido de la roca fosfórica con 41.22 cm, el superfosfato triple de calcio con 36.89 cm y el testigo con 32.33 cm, pero con un ritmo de crecimiento menor respecto a los 60 días, debido a que la planta ya alcanzó su madurez total.

**Figura 6**

*Altura de planta (AP) de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia, en función de los tratamientos y la frecuencia de corte.*



Los resultados indican que el fosfato diamónico mejora notablemente la altura de planta en todas las frecuencias de corte. El superfosfato triple de calcio y la roca fosfórica, aunque menos eficaces que el fosfato diamónico en las primeras etapas, contribuyen significativamente al crecimiento a medida que el cultivo madura. Es decir, un adecuado abonamiento fosforado puede maximizar el potencial de crecimiento en altura de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia. Estos resultados son consistentes con los de Cayetano (2022), quien estimó el efecto de la fertilización fosforada en variedades de alfalfa Moapa 69, CUF 101 y SW 8210 en el campo experimental del Laboratorio de Ecología y Utilización de Pastizales de la Universidad Nacional Agraria La Molina – Lima, y obtuvo las mayores alturas de planta con la aplicación de fosfato diamónico en dosis de 35 kg P ha<sup>-1</sup> a medida que aumentaba la frecuencia de muestreo (30, 60 y 90 días) durante la fase de establecimiento y crecimiento.

#### **4.3 Rendimiento de materia verde (kg ha<sup>-1</sup>) a una frecuencia de corte de 60 días**

En la Tabla 14, se muestra los resultados del análisis de varianza (ANOVA) para el rendimiento de materia verde de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia, en la cual se puede observar que no existe diferencias significativas entre bloques; dado que, el valor de significación (p-valor = 0.1339) es mayor que el 0.05. En el caso de los tratamientos, el valor de significación (p-valor = 0.0001) es considerablemente menor que el 0.05, lo que indica que existe diferencias significativas en el rendimiento de materia verde entre los diferentes tratamientos; es decir, los tratamientos con diferentes fuentes fosforadas influyeron significativamente en el rendimiento de materia verde de la asociación rye grass – trébol blanco respecto al tratamiento testigo.

El coeficiente de variación (CV) es de 4.22%, el cual demuestra que la variabilidad de los resultados dentro de cada tratamiento es baja; por lo que, el diseño experimental empleado en el estudio presentó un buen control sobre la variabilidad del rendimiento de materia verde.

**Tabla 14**

*Análisis de varianza (ANOVA) para el rendimiento de materia verde (RMV) de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia a una frecuencia de corte de 60 días*

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F calculado	p-valor
Bloques	2929278.61	2	1464639.31	2.86	0.1339
Tratamientos	286941357.48	3	95647119.16	187.04	<0.0001
Error	3068230.10	6	511371.68		
Total	292938866.19	11			

CV = 4.22%

Al realizar la prueba de Tukey al 5% (Tabla 15 y Figura 7), se observan diferencias significativas entre los tratamientos fosforados y el tratamiento testigo. El tratamiento con roca fosfórica mostró el mayor rendimiento con un promedio de 23,057.78 kg MV ha<sup>-1</sup> ubicándose en el grupo A, en relación al testigo con 9,546.67 kg MV ha<sup>-1</sup> situado en el grupo D, lo que resalta la superioridad de la roca fosfórica respecto a los demás tratamientos y al testigo en la evaluación del rendimiento de materia verde. El tratamiento con fosfato diamónico alcanzó un promedio de 18,768.89 kg MV ha<sup>-1</sup> posicionándose en el grupo B, muestra una mejora en comparación con el testigo, pero en menor medida que la roca fosfórica. El tratamiento superfosfato triple de calcio resultó en el tercer lugar con un promedio de 16,475.56 kg MV ha<sup>-1</sup> clasificado en el grupo C, aunque menos efectivo que la roca fosfórica y el fosfato diamónico, todavía logró un incremento significativo en relación al testigo. Por último, el testigo con 9,546.67 kg MV ha<sup>-1</sup> en el grupo D, confirma que la ausencia del abonamiento fosforado resulta en una productividad significativamente menor.

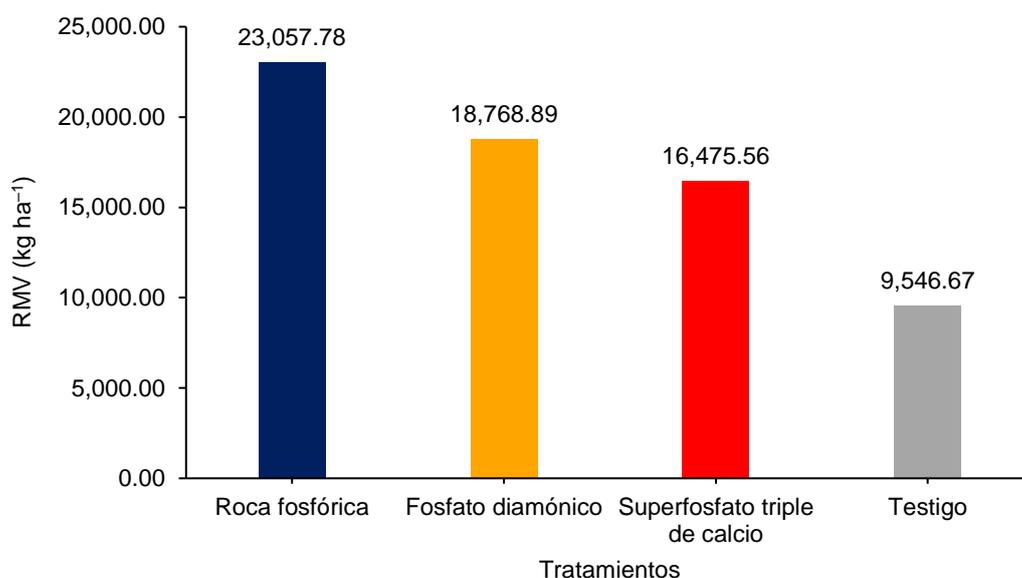
**Tabla 15**

*Prueba de Tukey al 5% para el rendimiento de materia verde (RMV) de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia a una frecuencia de corte de 60 días*

Tratamientos	Rendimiento de materia verde (kg ha <sup>-1</sup> )	Agrupación
Roca fosfórica (T3)	23,057.78	A
Fosfato diamónico (T2)	18,768.89	B
Superfosfato triple de calcio (T1)	16,475.56	C
Testigo (T0)	9,546.67	D

**Figura 7**

*Efecto de los tratamientos sobre el rendimiento de materia verde (RMV) de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia a una frecuencia de corte de 60 días.*



A los 60 días de corte, el mayor rendimiento de materia verde se obtuvo con roca fosfórica (23,057.78 kg ha<sup>-1</sup>), seguido del tratamiento con fosfato diamónico (18,768.89 kg ha<sup>-1</sup>) y superfosfato triple de calcio (16,475.56 kg ha<sup>-1</sup>), superando al testigo que mostró un valor de 9,546.67 kg ha<sup>-1</sup>. Por lo tanto, la aplicación de fuentes fosforadas genera mayores rendimientos de materia verde de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco

Huia en comparación con el testigo. Dichos resultados son semejantes a los obtenidos por Mejía (2022), quien, en su investigación llevada a cabo en Chota – Cajamarca, logró obtener rendimientos de 19,200.00 y 21,200.00 kg MV ha<sup>-1</sup> en rye grass Ecotipo Cajamarquino, mediante la aplicación de roca fosfórica en dosis de 80 y 180 kg P ha<sup>-1</sup>, respectivamente, siendo significativamente superiores respecto a 9,860.00 kg MV ha<sup>-1</sup> del tratamiento testigo, demostrando la eficacia de la roca fosfórica al incrementar el rendimiento de materia verde. Pero inferiores a los encontrados por Cevallos (2015), quien aplicó roca fosfórica en dosis de 75 kg P ha<sup>-1</sup> en su estudio realizado en la zona Cayambe – Ecuador, y obtuvo 44,200.00 kg MV ha<sup>-1</sup> en promedio en las variedades de rye grass Amazon y Pichincha, superando ampliamente al tratamiento sin fertilización, esta diferencia en el resultado podría estar relacionado con el tipo de variedad, las condiciones ambientales del lugar y el sistema de cultivo. Al respecto, Fayiga y Nwoke (2016), y Rojas (2006) señalan que los altos rendimientos en cultivos con la adición de fertilizantes fosforados dependen de factores como la variabilidad genética del cultivo, las propiedades del suelo, las condiciones ambientales y el sistema de cultivo que modifican la disponibilidad del fósforo para las plantas.

El efecto superior de la roca fosfórica en el rendimiento de materia verde de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia puede estar relacionado con la presencia de macroelementos como el fósforo y el calcio, que se encuentran en proporciones medianamente altas. Como sostienen Fayiga y Nwoke (2016), quienes indican que la roca fosfórica incluye macroelementos (P y Ca) esenciales para la nutrición de las plantas. El fósforo es un componente vital en la síntesis y transferencia de energía, el metabolismo de carbohidratos y la síntesis de proteínas (Johan et al., 2021); en tanto, el calcio está involucrado en el desarrollo de la pared celular y membranas, la activación de enzimas, la transducción de señales, la regulación estomática, etc. (Liu et al., 2023), este macronutriente, clave en el equilibrio iónico del suelo, también reduce la saturación de aluminio en suelos ácidos (Zapata

y Roy, 2007), lo que genera el desarrollo de raíces y brotes, una mayor producción de hojas y un crecimiento general de las plantas, traducido en cantidad y calidad del rendimiento (Johan et al., 2021; Ullah et al., 2023).

El impacto más significativo de la roca fosfórica está vinculado a las condiciones de acidez del suelo en este estudio cuyo pH es 5.28. Tal como lo indican Botero (2015), y Zapata y Roy (2007), la roca fosfórica aumenta su disolución en suelos ácidos ( $\text{pH} \leq 5.5$ ) y con bajos niveles de fósforo absorbible, liberando el fósforo de manera gradual y a largo plazo para ser asimilado por las plantas antes de ser retenido y fijado por los óxidos de Al y Fe y las arcillas de suelo, lo que produce un aumento en el rendimiento. La menor eficacia del fosfato diamónico y superfosfato triple de calcio puede deberse a que requieren suelos con  $\text{pH} > 5.5$  para una mejor disolución, lo que favorece la fijación de fósforo por el suelo y su disponibilidad para las plantas (Botero, 2015).

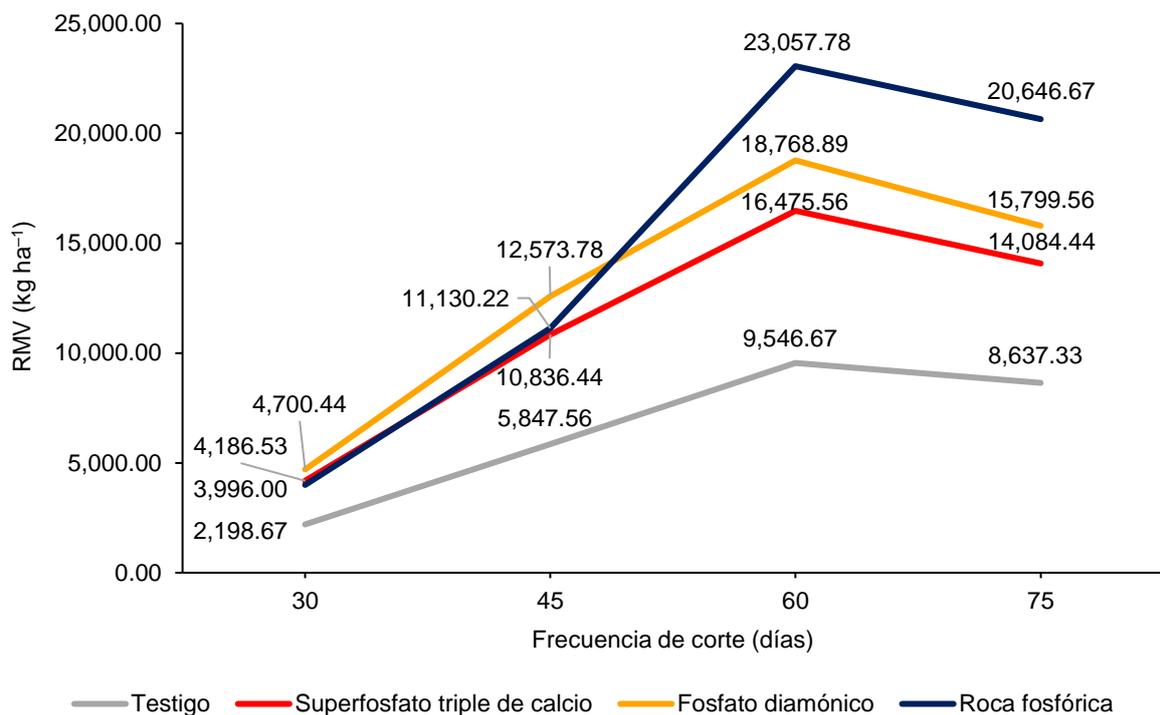
#### **4.4 Rendimiento de materia verde ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), en función de los tratamientos y la frecuencia de corte**

La Figura 8 presenta los resultados del rendimiento de materia verde de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia por el efecto de diferentes tratamientos fosforados y el testigo, en función de la frecuencia de corte. A los 30 días, el tratamiento con fosfato diamónico mostró el mayor rendimiento con  $4,700.44 \text{ kg MV ha}^{-1}$ , seguido del superfosfato triple de calcio con  $4,186.53 \text{ kg MV ha}^{-1}$ , la roca fosfórica con  $3,996.00 \text{ kg MV ha}^{-1}$  y el testigo con  $2,198.67 \text{ kg MV ha}^{-1}$ ; es decir, el fosfato diamónico tiene un efecto más superior entre los fertilizantes aplicados y el testigo en los primeros días de crecimiento. A los 45 días, el tratamiento con fosfato diamónico continuó presentando el mayor rendimiento con  $12,573.78 \text{ kg MV ha}^{-1}$ ; luego, la roca fosfórica con  $11,130.22 \text{ kg MV ha}^{-1}$  que superó al superfosfato triple de calcio con  $10,836.44 \text{ kg MV ha}^{-1}$  respecto al anterior corte, y el testigo  $5,847.56 \text{ kg MV ha}^{-1}$  con el menor rendimiento entre todos. A los 60 días, el tratamiento con

roca fosfórica con un valor de 23,057.78 kg MV ha<sup>-1</sup> superó en rendimiento a los demás tratamientos fosforados y al testigo con 9,546.67 kg MV ha<sup>-1</sup> en contraste al corte de 30 y 45 días, destacando su efectividad en periodos de corte más largos por la liberación de fósforo de manera gradual. A los 75 días, el tratamiento con roca fosfórica se mantuvo con un alto rendimiento de 20,646.67 kg MV ha<sup>-1</sup> en comparación al fosfato diamónico con 15,799.56 kg MV ha<sup>-1</sup>, al superfosfato triple de calcio con 14,084.44 kg MV ha<sup>-1</sup> y al testigo con 8,637.33 kg MV ha<sup>-1</sup>; sin embargo, la tendencia es menor que el anterior corte (60 días), debido a que la planta llega a su madurez.

**Figura 8**

*Rendimiento de materia verde (RMV) de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia, en función de los tratamientos y la frecuencia de corte.*



El fosfato diamónico mostró ser el más eficaz durante las primeras etapas de desarrollo, promoviendo los mayores rendimientos de materia verde. La roca fosfórica, aunque menos efectiva en las primeras etapas, superó a los otros tratamientos en los cortes de 60 y 75 días, indicando su efectividad a largo plazo. El superfosfato triple de calcio, aunque mejoró el

rendimiento respecto al testigo, fue menos efectivo que las otras dos fuentes fosfóricas. Los resultados obtenidos demuestran claramente que el fosfato diamónico y la roca fosfórica impactan significativamente en el rendimiento de materia verde de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia; sin embargo, estará en función a la frecuencia de corte. Estos resultados concuerdan con el estudio de Torres (2022), quien obtuvo los mayores rendimientos en variedades de rye grass Ecotipo Cajamarquino, Viscount y Alto en la provincia de Cutervo – Cajamarca con la aplicación de roca fosfórica en dosis de  $70 \text{ kg P ha}^{-1}$  en un periodo corte de 120 días, lo que resalta la eficacia de este fertilizante a frecuencias de corte más largas. Igualmente, Mejía (2022) encontró resultados similares en variedades de rye grass Ecotipo Cajamarquino, Tabu y Shogun en Chota – Cajamarca con la aplicación de roca fosfórica en dosis de  $180 \text{ kg P ha}^{-1}$  en un intervalo de corte de 120 días.

#### **4.5 Rendimiento de materia seca ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) a una frecuencia de corte de 60 días**

En la Tabla 16, se muestra los resultados del análisis de varianza (ANOVA) para el rendimiento de materia seca de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia, donde se puede observar que no existe diferencias significativas entre bloques; dado que, el valor de significación (p-valor = 0.141) es mayor que el 0.05. Respecto a los tratamientos, el valor de significación (p-valor = 0.0001) es menor que el 0.05, lo que indica que existe diferencias significativas en el rendimiento de materia seca entre los diferentes tratamientos; es decir, que los tratamientos con diferentes fuentes fosforadas afectaron significativamente el rendimiento de materia seca de la asociación rye grass – trébol blanco en comparación con el tratamiento testigo.

El coeficiente de variación estimado (CV) es de 5.00%, el cual demuestra que la variabilidad de los resultados dentro de cada tratamiento es baja; por lo que, el diseño experimental empleado en el estudio presentó un buen control sobre la variabilidad del rendimiento de materia seca.

**Tabla 16**

*Análisis de varianza (ANOVA) para el rendimiento de materia seca (RMS) de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia a una frecuencia de corte de 60 días*

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F calculado	p-valor
Bloques	215242.50	2	107621.25	2.76	0.1410
Tratamientos	16222763.35	3	5407587.78	138.85	<0.0001
Error	233675.61	6	38945.93		
Total	16671681.46	11			

CV = 4.22%

Al realizar la prueba de Tukey al 5% (Tabla 17 y Figura 9), se observan diferencias significativas entre los tratamientos fosforados y el testigo. El tratamiento con roca fosfórica presentó el mayor rendimiento con un valor promedio de 5,459.64 kg MS ha<sup>-1</sup> dispuesto en el grupo A, diferenciándose del testigo con 2,227.15 kg MS ha<sup>-1</sup> en el grupo C, destaca la superioridad de la roca fosfórica para mejorar el rendimiento en comparación con los demás tratamientos y el testigo. El tratamiento con fosfato diamónico obtuvo 4,316.85 kg MS ha<sup>-1</sup> ubicado en el grupo B, lo que evidencia una mejora significativa en relación con el testigo, pero inferior a la roca fosfórica. El tratamiento con superfosfato triple de calcio alcanzó un promedio de 3,789.38 kg MS ha<sup>-1</sup> situándose en el grupo B, aunque menos efectivo que la roca fosfórica y similar al fosfato diamónico, logró un incremento significativo a diferencia del testigo. Por su parte, el testigo con un promedio de 2,227.15 kg MS ha<sup>-1</sup> posicionado en el grupo C, confirma que existe un menor rendimiento cuando no se aplica un abonamiento fosforado.

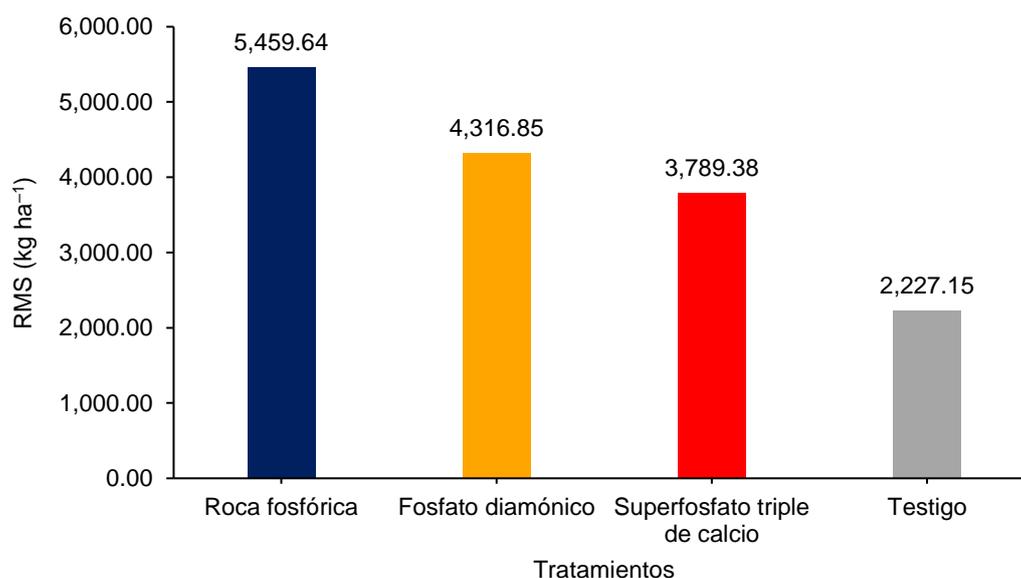
**Tabla 17**

*Prueba de Tukey al 5% para el rendimiento de materia seca (RMS) de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia a una frecuencia de corte de 60 días*

Tratamientos	Rendimiento de materia seca (kg ha <sup>-1</sup> )	Agrupación
Roca fosfórica (T3)	5,459.64	A
Fosfato diamónico (T2)	4,316.85	B
Superfosfato triple de calcio (T1)	3,789.38	B
Testigo (T0)	2,227.15	C

**Figura 9**

*Efecto de los tratamientos sobre el rendimiento de materia seca (RMS) de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia a una frecuencia de corte de 60 días.*



A los 60 días de corte, el mayor rendimiento de materia seca se obtuvo con roca fosfórica (5,459.64 kg ha<sup>-1</sup>), seguido del tratamiento con fosfato diamónico (4,316.85 kg ha<sup>-1</sup>) y superfosfato triple de calcio (3,789.38 kg ha<sup>-1</sup>), superando al testigo que presentó el menor valor con 2,227.15 kg ha<sup>-1</sup>. En otras palabras, la aplicación de fuentes fosforadas proporciona mayores rendimientos de materia seca de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol

blanco Huia respecto al testigo. Estos resultados son semejantes a los reportados por Torres (2022), quien realizó un estudio sobre el rendimiento de rye grass Ecotipo Cajamarquino en la provincia de Cutervo – Cajamarca con suministro de roca fosfórica en una dosis de  $70 \text{ kg P ha}^{-1}$  y logró obtener  $4,630.00 \text{ kg MS ha}^{-1}$ , superando al tratamiento testigo; resalta el efecto positivo de la roca fosfórica en el rendimiento de materia seca, lo cual concuerda con los resultados de esta investigación. Del mismo modo, es semejante al estudio realizado por Orellana (2023), quien evaluó la respuesta de la roca fosfatada en trébol blanco Huia introducido en praderas dominadas por *Festuca dolichophylla* y *Calamagrostis vicunarum* en la comunidad de Cachimayo – Huancavelica, y reportó un rendimiento de  $3,207.77 \text{ kg MS ha}^{-1}$  con el tratamiento [pradera + trébol blanco ( $40 \text{ semillas hoyo}^{-1}$ ) + roca fosfatada ( $30 \text{ g hoyo}^{-1}$ )], en comparación con el testigo.

El efecto superior de la roca fosfórica en el rendimiento de materia seca de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia puede atribuirse a la mayor disponibilidad de fósforo y calcio. Como lo sostienen Fayiga y Nwoke (2016), la roca fosfórica contiene macroelementos (P y Ca) esenciales para la nutrición de las plantas. El fósforo liberado de la roca fosfórica participa en la fotosíntesis, la respiración y la transferencia de energía (Ullah et al., 2023); en tanto, el calcio está involucrado en el desarrollo de la pared celular, la activación de enzimas, la transducción de señales, etc. (Liu et al., 2023), este nutriente también reduce la saturación de aluminio en suelos ácidos (Zapata y Roy, 2007), lo que genera el desarrollo de raíces, una mayor producción de hojas y un crecimiento general de las plantas, traducido en un rendimiento óptimo de las pasturas (Johan et al., 2021; Ullah et al., 2023).

El impacto más significativo de la roca fosfórica está relacionado a las condiciones de acidez del suelo en este estudio cuyo pH es 5.28. Como lo reportan Botero (2015), y Zapata y Roy (2007), en suelos ácidos ( $\text{pH} < 5.5$ ), con bajos niveles de fósforo, la roca fosfórica aumenta su disolución liberando fósforo lentamente y a largo plazo para ser absorbido rápidamente por

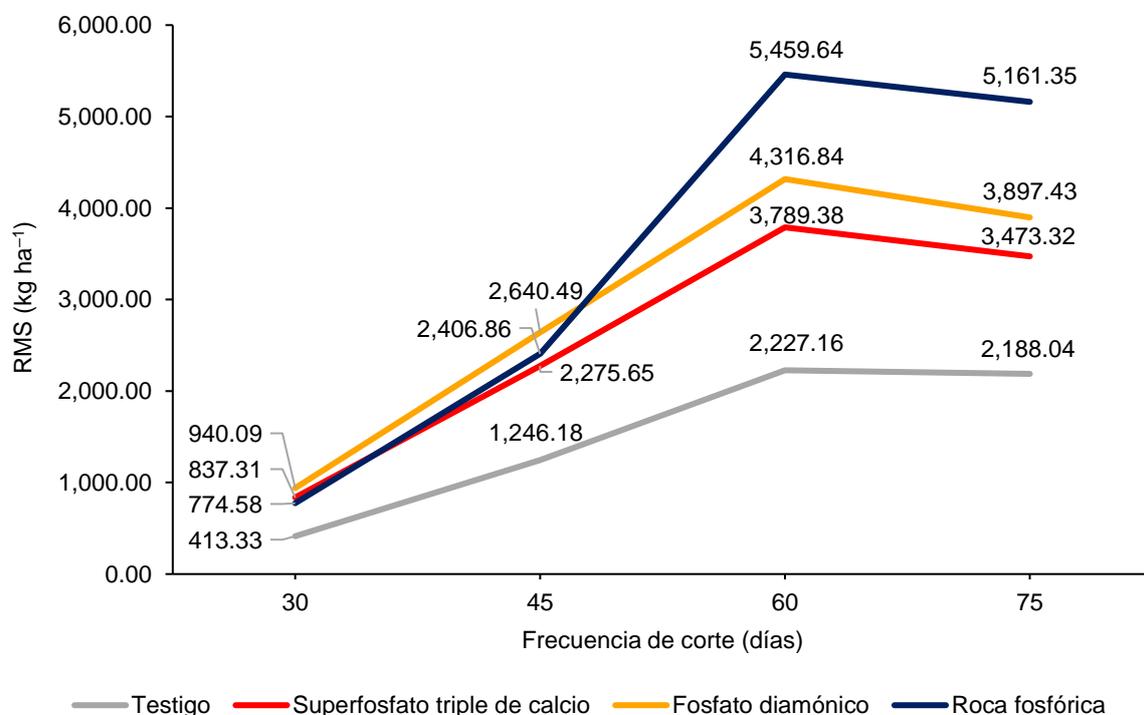
las plantas antes de ser fijado por los óxidos de Al y Fe y las arcillas del suelo, lo que incrementa el rendimiento. La menor eficacia del fosfato diamónico y superfosfato triple de calcio puede deberse a que requieren suelos con  $\text{pH} > 5.5$  para una mejor disolución, lo que favorece la fijación de fósforo por el suelo y su disponibilidad para las plantas (Botero, 2015).

#### **4.6 Rendimiento de materia seca ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), en función de los tratamientos y la frecuencia de corte**

La Figura 10 muestra los resultados del rendimiento de materia seca de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia por el efecto de diferentes tratamientos fosforados y el testigo, en función de la frecuencia de corte. A los 30 días, el tratamiento con fosfato diamónico presentó el mayor rendimiento con  $940.09 \text{ kg MS ha}^{-1}$ , seguido del superfosfato triple de calcio con  $837.31 \text{ kg MS ha}^{-1}$ , la roca fosfórica con  $774.58 \text{ kg MS ha}^{-1}$  y el testigo con  $413.33 \text{ kg MS ha}^{-1}$ , resaltando el efecto positivo del fosfato diamónico en relación a los demás tratamientos y al testigo en los primeros días de crecimiento. A los 45 días, el tratamiento con fosfato diamónico siguió mostrando un mayor rendimiento con un valor de  $2,640.49 \text{ kg MS ha}^{-1}$  en comparación con la roca fosfórica que registró  $2,406.86 \text{ kg MS ha}^{-1}$ , superando al superfosfato triple de calcio con  $2,275.65 \text{ kg MS ha}^{-1}$  y al testigo con  $1,246.18 \text{ kg MS ha}^{-1}$  en contraste al corte de 30 días. A los 60 días, hubo un incremento superior en el RMS entre todos los tratamientos, siendo el tratamiento con roca fosfórica el que destacó con  $5,459.64 \text{ kg MS ha}^{-1}$  por encima de los demás tratamientos fosforados y del testigo con  $2,227.16 \text{ kg MS ha}^{-1}$ , lo que representa su efectividad en periodos de corte a largo plazo. A los 75 días, el tratamiento con roca fosfórica continuó manteniendo un alto rendimiento de  $5,161.35 \text{ kg MS ha}^{-1}$  en comparación al fosfato diamónico con  $3,897.43 \text{ kg MS ha}^{-1}$ , al superfosfato triple de calcio con  $3,473.32 \text{ kg MS ha}^{-1}$  y al testigo con  $2,188.04 \text{ kg MS ha}^{-1}$ , pero con una disminución en la tasa de rendimiento en comparación con el corte de 60 días, debido a que la planta ha sido influenciada por su madurez.

**Figura 10**

*Rendimiento de materia seca (RMS) de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia, en función de los tratamientos y la frecuencia de corte.*



El fosfato diamónico resultó ser el más eficiente en las etapas iniciales de crecimiento (30 y 45 días) en cuanto al rendimiento de materia seca. La roca fosfórica en las primeras etapas fue menos efectiva; sin embargo, a los 60 y 75 días superó a los demás tratamientos, indicando su efectividad a largo plazo. El superfosfato triple de calcio en comparación con el testigo fue superior, pero menos efectivo que las otras dos fuentes fosfóricas. Esto indica que el abonamiento fosforado con fosfato diamónico y roca fosfórica influyen significativamente en el rendimiento de materia seca de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia; pero, dependerá principalmente de la frecuencia de corte. Los resultados obtenidos coinciden con el estudio de Bohner (2021), quien obtuvo los mayores rendimientos de materia seca en *Lolium multiflorum* cv. Bill Max y *Avena sativa* cv. Faraona en una localidad del partido de Brandsen – Argentina con aplicación de fosfato diamónico y superfosfato triple en dosis de 150 kg P ha<sup>-1</sup> y al tercer corte (46 días), mostrando su mejor comportamiento en el inicio de

ciclo. Asimismo, concuerda con lo reportado por Orellana (2023), quien demostró que el mayor rendimiento de la asociación trébol blanco Huia – *Festuca dolichophylla* y *Calamagrostis vicunarum* en la comunidad de Cachimayo – Huancavelica, se obtiene con la aplicación de roca fosfatada en dosis de 30 g hoyo<sup>-1</sup> y 40 semillas hoyo<sup>-1</sup> de trébol blanco a una frecuencia de corte de 445 días después de la siembra, lo que evidencia la efectividad de la roca fosfatada en el establecimiento y la persistencia del trébol blanco en praderas nativas a lo largo del tiempo, especialmente en suelos con mayor acidez (pH = 5.16).

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

El tratamiento con fosfato diamónico alcanzó el mejor resultado en la variable altura de planta con un valor de 46.22 cm, en una frecuencia de corte de 60 días; por su parte, los tratamientos con roca fosfórica y superfosfato de triple de calcio alcanzaron alturas de planta de 40.22 cm y 35.67 cm, respectivamente. Mientras que, el tratamiento testigo (sin aplicación) presentó el menor crecimiento con un valor de 31.22 cm.

El tratamiento con roca fosfórica generó el mayor rendimiento de materia verde con un valor de 23,057.78 kg ha<sup>-1</sup>, a una frecuencia de corte de 60 días; así mismo, los tratamientos con fosfato diamónico y superfosfato triple de calcio alcanzaron valores de 18,768.89 kg MV ha<sup>-1</sup> y 16,475.56 kg MV ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Por el contrario, el tratamiento testigo presentó el menor rendimiento con 9,546.67 kg MV ha<sup>-1</sup>.

El tratamiento con roca fosfórica fue significativamente mayor en el rendimiento de materia seca con 5,459.64 kg ha<sup>-1</sup>, a una frecuencia de corte de 60 días; por su parte, los tratamientos con fosfato diamónico y superfosfato triple de calcio obtuvieron rendimientos estadísticamente similares de 4,316.85 kg MS ha<sup>-1</sup> y 3,789.38 kg MS ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Mientras que, el tratamiento testigo mostró el menor rendimiento con 2,227.15 kg MS ha<sup>-1</sup>.

## **5.2 Recomendaciones**

Aplicar roca fosfórica en suelos con pH ácido, por su efecto positivo a largo plazo en el rendimiento de pasturas asociadas a base de rye grass y trébol blanco.

Realizar un monitoreo constante del suelo, para ajustar la dosis de abonamiento en función a las condiciones específicas de cada área de cultivo, optimizando así la eficiencia del abonamiento y evitando aplicaciones innecesarias que puedan impactar en el medio ambiente.

Realizar un abonamiento balanceado (NPK), ajustado a las necesidades del suelo y del cultivo, para mejorar significativamente el rendimiento y la calidad del forraje.

## CAPÍTULO VI

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahicart, M., y Hernández, E. (2019). *Actividad + naturaleza: proyecto parque Sant Oleguer: barrio Nostra Llar, Sabadell* [Tesis de maestría, Universitat Politècnica de Catalunya]. UPCommons. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/165328?show=full>
- Alejo-Iturvide, F., Márquez-Lucio, M. A., Gonzáles-López, C. I., y De La Rivadela-Riva, G. A. (2016). Biosolubilizadores de fósforo orgánico e inorgánico del bosque templado de Santa Rosa Guanajuato, México. *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales*, 2(3), 10-17. [https://www.ecorfan.org/spain/researchjournals/Ciencias\\_Ambientales\\_y\\_Recursos\\_Naturales/vol2num3/Revista\\_de\\_Ciencias\\_Ambientales\\_y\\_Recursos\\_Naturales\\_V2\\_N3.pdf](https://www.ecorfan.org/spain/researchjournals/Ciencias_Ambientales_y_Recursos_Naturales/vol2num3/Revista_de_Ciencias_Ambientales_y_Recursos_Naturales_V2_N3.pdf)
- Alvarado, L. C. (2020). *Estudio de adaptación de siete pastos y tres mezclas forrajeras con la utilización de lactofermentos, en el barrio San Francisco, Parroquia Toacazo, Cantón Latacunga, Provincia de Cotopaxi, 2019-2020* [Proyecto de investigación, Universidad Técnica de Cotopaxi]. Repositorio Digital Universidad Técnica de Cotopaxi. <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/6642>
- Anagra. (s. f.). *Ficha técnica y hoja de seguridad Fosfato Diamónico* [Ficha Técnica]. Recuperado 12 de julio de 2024, de <https://www.anagra.cl/Content/Documento/FichaTecnica/DAP.pdf>
- Argote, G. (2011). *Práctica de labranza mínima y Trébol blanco (Trifolium repens) para mejorar la calidad nutritiva de pastos naturales*. Instituto Nacional de Innovación Agraria. <https://es.scribd.com/document/264559460/Labranza-Minima-y-Trebol-Blanco>

- Armstrong, D. L. (Ed.). (1988). Important Factors Affecting Crop Response to Phosphorus. *Better Crops with Plant Food*, 72(4), 9-11. [http://www.ipni.net/publication/bettercrops.nsf/0/9F91995F66F2018385257D2A0051A809/\\$FILE/BC-1988-3.pdf](http://www.ipni.net/publication/bettercrops.nsf/0/9F91995F66F2018385257D2A0051A809/$FILE/BC-1988-3.pdf)
- Ataman Kimya. (2020). *Diammonium Phosphate (DAP)*. Ataman Chemicals. [https://www.atamanchemicals.com/diammonium-phosphate-dap\\_u23765/](https://www.atamanchemicals.com/diammonium-phosphate-dap_u23765/)
- Bacchi, M., Monti, M., Calvi, A., Lo Presti, E., Pellicanò, A., & Preiti, G. (2021). Forage Potential of Cereal/Legume Intercrops: Agronomic Performances, Yield, Quality Forage and LER in Two Harvesting Times in a Mediterranean Environment. *Agronomy*, 11(1), 121. <https://doi.org/10.3390/agronomy11010121>
- Barba, N. (2022). *Efecto de la aplicación de cal y fosfato diamónico en el crecimiento de Tectona grandis L.f. de un año de edad* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Agraria La Molina. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/5214>
- Batello, C., Brinkman, R., Mannetje, L., Martinez, A., & Suttie, J. (2011). *Plant Genetic Resources of Forage Crops, Pasture and Rangelands*. Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. [https://www.fao.org/fileadmin/templates/agphome/documents/PGR/SoW2/thematicstudy\\_forage.pdf](https://www.fao.org/fileadmin/templates/agphome/documents/PGR/SoW2/thematicstudy_forage.pdf)
- Beddows, A. R. (1973). *Lolium Multiflorum* Lam. *Journal of Ecology*, 61(2), 587-600. <https://doi.org/10.2307/2259046>
- Beltrán, M. E. (2014). La solubilización de fosfatos como estrategia microbiana para promover el crecimiento vegetal. *Revista Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 15(1), 101-113. <http://www.scielo.org.co/pdf/ccta/v15n1/v15n1a09.pdf>
- Besoain, E., Sepúlveda, G., y Molina, R. (1991). Rocas fosfóricas nacionales. I. Caracterización mineralógica y química. *Agricultura Técnica*, 52(2), 121-130. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/35626>

- Bo, P. T., Bai, Y., Dong, Y., Shi, H., Htet, M. N. S., Samoon, H. A., Zhang, R., Tanveer, S. K., & Hai, J. (2022). Influence of Different Harvesting Stages and Cereals–Legume Mixture on Forage Biomass Yield, Nutritional Compositions, and Quality under Loess Plateau Region. *Plants*, *11*(20), 2801. <https://doi.org/10.3390/plants11202801>
- Bohner, L. (2021). *Medición de la producción de biomasa aérea en verdes de avena y raigrás bajo fertilización nitrogenada, fosforada y fosfo-nitrogenada* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de La Plata]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de La Plata. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/114489>
- Bolan, N. S. (1991). A critical review on the role of mycorrhizal fungi in the uptake of phosphorus by plants. *Plant and Soil*, *134*(2), 189-207. <https://doi.org/10.1007/BF00012037>
- Botero, R. (2015, noviembre 22). Dosis recomendadas de aplicación de fertilizantes I. *Página del Ganadero Fedegán - Fondo Nacional del Ganado FNG*, 286. [https://static.fedegan.org.co/notas/PG\\_23112015.pdf](https://static.fedegan.org.co/notas/PG_23112015.pdf)
- Calvache, I. D., Ardila, R. G., Charry, L., y Navas, A. (2014). Conozca el crecimiento de sus praderas. *Federación Colombiana de Ganaderos [FEDEGAN]*, 76-78. <https://www.fedegan.org.co/carta-fedegan-140-20-anos-patrimonio-de-los-ganaderos-colombianos>
- Calvache-Ulloa, M., y Valle, L. (2021). Índice de cosecha con macro-nutrientes en grano de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd). *Alfa, Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinarias*, *5*(13), 15-28. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v5i13.95>
- Capstaff, N. M., & Miller, A. J. (2018). Improving the Yield and Nutritional Quality of Forage Crops. *Frontiers in Plant Science*, *9*, 535. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00535>

- Carrasco, W., Cervantes, M., Mendoza, L., Muñoz, Y., Quilcate, C., Casanova, D., Vásquez, H., & Alvarez, W. Y. (2024). Morphological Differentiation, Yield, and Cutting Time of *Lolium multiflorum* L. under Acid Soil Conditions in Highlands. *Plants*, 13(16), 2331. <https://doi.org/10.3390/plants13162331>
- Castaño, J. (2003). *Adaptación y manejo de especies forrajeras y técnicas para optimizar su producción*. 1.<sup>a</sup> Jornada de Actualización Ganadera, Balcarce, Argentina. [https://www.produccion-animal.com.ar/produccion\\_y\\_manejo\\_pasturas/pastoreo%20sistemas/14-adaptacion\\_manejo\\_tecnicas.pdf](https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/pastoreo%20sistemas/14-adaptacion_manejo_tecnicas.pdf)
- Cayetano, A. B. (2022). *Efecto de la fertilización fosfatada en el establecimiento y producción de tres variedades de Alfalfa* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Agraria La Molina. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/5890>
- Celen, A. E., & Orou Ouennon Assouma, S. M. S. (2021). Annual Ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.). En G. Demiroglu & S. Seydosoglu (Eds.), *Sustainable Forage Production and Ecological Safety* (pp. 91-117). IKSAD Publishing House. [https://www.researchgate.net/publication/353548604\\_CHAPTER\\_VI\\_ANNUAL\\_RY\\_EGRASS\\_Lolium\\_multiflorum\\_Lam](https://www.researchgate.net/publication/353548604_CHAPTER_VI_ANNUAL_RY_EGRASS_Lolium_multiflorum_Lam)
- Central Café & Cacao. (2017, julio 21). *TDR – Adquisición de 500 Sacos de Roca Fosfórica*. Central café y cacao del Perú. <https://centralcafeycacao.wordpress.com/2017/07/21/tdr-adquisicion-de-500-sacos-de-roca-fosforica/>
- Cerón, L. E., y Aristizábal, F. A. (2012). Dinámica del ciclo del nitrógeno y fósforo en suelos. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 14(1), 285-295. <http://www.scielo.org.co/pdf/biote/v14n1/v14n1a26.pdf>
- Cevallos, V. E. (2015). *Rendimiento de biomasa de dos variedades de rye grass a tres fuentes de fósforo en la zona Cayambe, provincia de Pichincha* [Tesis de pregrado, Universidad

- Técnica de Babahoyo]. DSpace de la Universidad Técnica de Babahoyo. <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/1064>
- Chappa, C. E. (1992). *Evaluación preliminar de fuentes y niveles de fósforo para el cultivo de maíz en suelos ácidos de la banda de shilcayo – San Martín* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Martín]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de San Martín. <http://hdl.handle.net/11458/721>
- Chrysargyris, A., Panayiotou, C., & Tzortzakis, N. (2016). Nitrogen and phosphorus levels affected plant growth, essential oil composition and antioxidant status of lavender plant (*Lavandula angustifolia* Mill.). *Industrial Crops and Products*, 83, 577-586. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.12.067>
- Chuma, G. B., Mulalisi, B., Mondo, J. M., Ndeko, A. B., Bora, F. S., Bagula, E. M., Mushagalusa, G. N., & Civava, R. (2022). Di-ammonium phosphate (DAP) and plant density improve grain yield, nodulation capacity, and profitability of peas (*Pisum sativum* L.) on ferralsols in eastern D.R. Congo. *CABI Agriculture and Bioscience*, 3(65). <https://doi.org/10.1186/s43170-022-00130-6>
- Cobos, F. B., y Narváez, D. M. (2018). *Fenología y producción de Rye grass (Lolium multiflorum) bajo sistema de labranza convencional y alternativa en la Granja de Irquis* [Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca]. Repositorio Institucional Universidad de Cuenca. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/28826>
- Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation [CSIRO]. (2017). *Legumes [Clover/Trifolium repens L. (white clover)/Grasslands Huia]*. Register of Australian Herbage Plant Cultivars. <https://research.csiro.au/cultivars/legumes/>
- Dalal, R. C. (1977). Soil Organic Phosphorus. En N. C. Brady (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 29, pp. 83-117). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60216-](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60216-3)

- Daoui, K., Mrabet, R., Benbouaza, A., & Achbani, E. H. (2014). Responsiveness of Different Potato (*Solanum Tuberosum*) Varieties to Phosphorus Fertilizer. *Procedia Engineering*, 83, 344-347. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.026>
- Decreto Supremo N.º 0005-2022-MIDAGRI. (s. f.). Normas y Documentos Legales - Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego - Plataforma del Estado Peruano. Recuperado 4 de julio de 2024, de <https://www.gob.pe/institucion/midagri/normas-legales/2979424-0005-2022-midagri>
- Demagnet, R. (2008a). *El Género Lolium* [Diapositivas de PowerPoint]. Universidad de La Frontera. [https://praderasypasturas.com/files/menu/catedras/praderas\\_y\\_pasturas/2008/25-Genero-Lolium.pdf](https://praderasypasturas.com/files/menu/catedras/praderas_y_pasturas/2008/25-Genero-Lolium.pdf)
- Demagnet, R. (2008b). *Leguminosas Forrajeras* [Diapositivas de PowerPoint]. Universidad de La Frontera. [https://praderasypasturas.com/rolando/01.-Catedras/01.-Praderas\\_y\\_Pasturas/2008/26.-Leguminosas\\_Forrajeras.pdf](https://praderasypasturas.com/rolando/01.-Catedras/01.-Praderas_y_Pasturas/2008/26.-Leguminosas_Forrajeras.pdf)
- Demagnet, R. (2008c). *Manual de Especies Forrajeras y Manejo de Pastoreo*. Universidad de La Frontera. [https://praderasypasturas.com/documentos/124.-Manuales\\_Watts/2008/Manual%20de%20Especies%20Forrajeras%20y%20Manejo%20de%20Pastoreo.%20Watt,s,%202008.pdf](https://praderasypasturas.com/documentos/124.-Manuales_Watts/2008/Manual%20de%20Especies%20Forrajeras%20y%20Manejo%20de%20Pastoreo.%20Watt,s,%202008.pdf)
- Demagnet, R. (2009). *Pastizales en el Sur de Chile*. Universidad de La Frontera. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/server/api/core/bitstreams/0009c5df-2ef4-48c5-8d54-dca3ae196b27/content>
- Demagnet, R. (2019). *Manual de Especies Forrajeras*. Universidad de La Frontera. [https://praderasypasturas.com/rolando/03.-Libros/Manual\\_de\\_Especies\\_Forrajeras\\_Watt\\_s\\_2019.pdf](https://praderasypasturas.com/rolando/03.-Libros/Manual_de_Especies_Forrajeras_Watt_s_2019.pdf)
- Díaz, J., y Contreras, G. (2020). Ballica, principal maleza gramínea invasora de cultivos anuales. *Tierra Adentro*, 113, 105-110. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/67190>

- Enriquez-Hidalgo, D., Cruz, T., Teixeira, D. L., & Steinfort, U. (2020). Phenological stages of Mediterranean forage legumes, based on the BBCH scale. *Annals of Applied Biology*, 176(3), 357-368. <https://doi.org/10.1111/aab.12578>
- Ercoli, L., Mariotti, M., Masoni, A., & Massantini, F. (1996). Effect of Temperature and Phosphorus Fertilization on Phosphorus and Nitrogen Uptake by Sorghum. *Crop Science*, 36(2), 348-354. <https://doi.org/10.2135/cropsci1996.0011183X003600020023x>
- Ertekin, I., Atis, I., Aygun, Y. Z., Yilmaz, S., & Kizilsimsek, M. (2022). Effects of different nitrogen doses and cultivars on fermentation quality and nutritive value of Italian ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.) silages. *Animal Bioscience*, 35(1), 39-46. <https://doi.org/10.5713/ab.21.0113>
- Espinosa, J. (Ed.). (1991). *Informaciones Agronómicas N.º 2*. Instituto de la Potasa y el Fósforo. [http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/180F809FDE507C8485258013006103E8/\\$FILE/Inf-Agro2.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/180F809FDE507C8485258013006103E8/$FILE/Inf-Agro2.pdf)
- Espinosa, J. (Ed.). (1992). *Informaciones Agronómicas N.º 7*. Instituto de la Potasa y el Fósforo. [http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/691759258F45144385258013005CD86A/\\$FILE/Inf-Agro7.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/691759258F45144385258013005CD86A/$FILE/Inf-Agro7.pdf)
- FAAR Productos y Servicios agropecuarios. (s. f.). *Semillas de Pastos* [Ryegrass Anual y Bianual]. Recuperado 2 de julio de 2024, de <https://www.faaragropecuario.com/index.php/productos/semillas-de-pastos>
- Farfán, R. D., y Farfán, E. R. (2012). *Producción de pasturas cultivadas y manejo de pastos naturales altoandinos*. Instituto Nacional de Innovación Agraria. <http://repositorio.inia.gob.pe/handle/20.500.12955/417>

- Fayiga, A. O., & Nwoke, O. C. (2016). Phosphate Rock: Origin, Importance, Environmental Impacts and Future roles. *Environmental Reviews*, 24(4), 403-415. <https://doi.org/10.1139/er-2016-0003>
- Fertinova Agroproductos. (2015a). *DAP 18-46-00* [Ficha Técnica]. Fertinova. <https://www.fertinova.mx/sites/default/files/FICHA%20DAP.pdf>
- Fertinova Agroproductos. (2015b). *Súper Fosfato de Calcio Triple* [Ficha Técnica]. Fertinova. <https://www.fertinova.mx/productos/fertilizantes/super-fosfato-de-calcio-triple>
- Flores, E., Ruiz, J., Zárate, R., y Sono, B. (2022). *Manual de Siembra de Pastos Cultivados para Mejorar el Manejo Nutricional del Ganado*. Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria [FONTAGRO]. [https://www.fontagro.org/new/uploads/productos/ATN-RF-16680-RG\\_Producto\\_12\\_-\\_Manual\\_de\\_siembra\\_de\\_pastos\\_cultivados\\_para\\_mejorar\\_el\\_manejo\\_nutricional\\_del\\_ganado.pdf](https://www.fontagro.org/new/uploads/productos/ATN-RF-16680-RG_Producto_12_-_Manual_de_siembra_de_pastos_cultivados_para_mejorar_el_manejo_nutricional_del_ganado.pdf)
- Foundation for Arable Research [FAR]. (2005). *White Clover – Understanding growth & development* [Report No. 44]. FAR Research. [https://assets.far.org.nz/uploads/H44\\_Clover\\_development.pdf](https://assets.far.org.nz/uploads/H44_Clover_development.pdf)
- Frossard, E., Condrón, L. M., Oberson, A., Sinaj, S., & Fardeau, J. C. (2000). Processes Governing Phosphorus Availability in Temperate Soils. *Journal of Environmental Quality*, 29(1), 15-23. <https://doi.org/10.2134/jeq2000.00472425002900010003x>
- García, J. A. (1995). *Varietades de Trébol Blanco*. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria La Estanzuela-Uruguay. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2976/1/111219220807125648.pdf>
- García, M. (2014). *Residuos Orgánicos como Fuentes de Fósforo* [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid]. Archivo Digital UPM. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.33104>

- Gibson, P. B., & Hollowell, E. A. (1966). *White Clover*. United States Department of Agriculture. <https://www.govinfo.gov/content/pkg/GOVPUB-A-PURL-gpo22888/pdf/GOVPUB-A-PURL-gpo22888.pdf>
- Grant, C., & Flaten, D. (2019). *4R Management of Phosphorus Fertilizer in the Northern Great Plains: A Review of the Scientific Literature*. [https://canadianagronomist.ca/wp-content/uploads/2019/09/4R-P-fertilizer-mgmt-for-NGP-Detailed-version-July-3-2019\\_VF.pdf](https://canadianagronomist.ca/wp-content/uploads/2019/09/4R-P-fertilizer-mgmt-for-NGP-Detailed-version-July-3-2019_VF.pdf)
- Gueçaimburu, J. M., Vázquez, J. M., Tancredi, F., Reposo, G. P., Rojo, V., Martínez, M., y Introcaso, R. M. (2019). Evolución del fósforo disponible a distintos niveles de compactación por tráfico agrícola en un argiudol típico. *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences*, 35(1), 81-89. [https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0719-38902019000100081#aff1](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0719-38902019000100081#aff1)
- Guelfi, D., Pereira, A. P., Fernandes, L., & Pádua, D. (2022). Innovative Phosphate Fertilizer Technologies to Improve Phosphorus Use Efficiency in Agriculture. *Sustainability*, 14(21), 14266. <https://doi.org/10.3390/su142114266>
- Harris, P. S. (2000). *Grassland resource assessment for pastoral systems*. Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. <https://www.fao.org/4/X9137E/x9137e00.htm#TopOfPage>
- Harrison, A. F. (1987). *Soil organic phosphorus: a review of world literature*. CAB International, Wallingford, U.K.
- He, Y. Q., Zhu, Y. G., Smith, S. E., & Smith, F. A. (2002). Interactions between soil moisture content and phosphorus supply in spring wheat plants grown in pot culture. *Journal of Plant Nutrition*, 25(4), 913-925. <https://doi.org/10.1081/PLN-120002969>
- Herrera, S. A. (2019). *El compost en el rendimiento del forraje Rye Grass Italiano (Lolium multiflorum Lam) variedad Oregon común, en condiciones agroecológicas del ámbito*

- de Limpacocha distrito de Huacrachuco 2018* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional «Hermilio Valdizán» - Huánuco]. Repositorio Institucional UNHEVAL. <https://repositorio.unheval.edu.pe/handle/20.500.13080/4893>
- Heuer, S., Gaxiola, R., Schilling, R., Herrera-Estrella, L., López-Arredondo, D., Wissuwa, M., Delhaize, E., & Rouached, H. (2017). Improving phosphorus use efficiency: a complex trait with emerging opportunities. *The Plant Journal*, 90(5), 868-885. <https://doi.org/10.1111/tpj.13423>
- IndustryARC. (s. f.). *Triple Superphosphate Market - Forecast (2024 - 2030)*. Recuperado 12 de julio de 2024, de <https://www.industryarc.com/Report/16987/triple-superphosphate-market.html#:~:text=Triple%20Superphosphate%20Market%20is%20forecast,phosphoric%20acid%20with%20phosphate%20rocks>
- Instituto Nacional de Semillas [INASE]. (s. f.). *Catálogo Nacional de Cultivares*. Recuperado 3 de julio de 2024, de <https://gestion.inase.gob.ar/consultaGestion/gestiones/index/gjozmzbkbpfcdp/page:678>
- International Plant Nutrition Institute [IPNI]. (s. f.-a). *Nutrient Source Specifics N.º 14: Triple Superphosphate*. Recuperado 12 de julio de 2024, de [http://www.ipni.net/publication/nss.nsf/0/35039C5F78D8740C852579AF0076567A/\\$FILE/NSS-14%20Triple%20Superphosphate.pdf](http://www.ipni.net/publication/nss.nsf/0/35039C5F78D8740C852579AF0076567A/$FILE/NSS-14%20Triple%20Superphosphate.pdf)
- International Plant Nutrition Institute [IPNI]. (s. f.-b). *Nutrient Source Specifics N.º 17: Diammonium Phosphate*. Recuperado 12 de julio de 2024, de [http://www.ipni.net/publication/nss.nsf/0/66D92CC07C016FA7852579AF00766CBD/\\$FILE/NSS-17%20Diammonium%20Phosphate.pdf](http://www.ipni.net/publication/nss.nsf/0/66D92CC07C016FA7852579AF00766CBD/$FILE/NSS-17%20Diammonium%20Phosphate.pdf)
- Jaramillo, D. M., Sheridan, H., Soder, K., & Dubeux, J. C. B. (2021). Enhancing the Sustainability of Temperate Pasture Systems through More Diverse Swards. *Agronomy*, 11(10), 1912. <https://doi.org/10.3390/agronomy11101912>

- Johan, P. D., Ahmed, O. H., Omar, L., & Hasbullah, N. A. (2021). Phosphorus Transformation in Soils Following Co-Application of Charcoal and Wood Ash. *Agronomy*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/agronomy11102010>
- Johnson, S. B. (2020). Phosphorus: An Essential Element for Potatoes. En *University of Maine Cooperative Extension* (Número 2250, pp. 1-3). <https://extension.umaine.edu/publications/wp-content/uploads/sites/52/2020/05/2250.pdf>
- Johri, A. K., Oelmüller, R., Meenakshi, D., Yadav, V., Kumar, M., Tuteja, N., Varma, A., Bonfante, P., Persson, B. L., & Stroud, R. M. (2015). Fungal association and utilization of phosphate by plants: success, limitations, and future prospects. *Frontiers in Microbiology*, 6(984), 1-13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00984>
- Karpinska, A., Kakouli-Duarte, T., Ashekuzzaman, S. M., Byrne, J., Schmalenberger, A., & Forrestal, P. J. (2024). Plant and Soil Effects of Alternative Sources of Phosphorus over Three Years of Application. *Agronomy*, 14(7), 1591. <https://doi.org/10.3390/agronomy14071591>
- Kemešytė, V., Statkevičiūtė, G., Norkevičienė, E., & Jaškūnė, K. (2023). Italian Ryegrass as a Forage Crop for the Baltics: Opportunities and Challenges in Light of Climate Change. *Plants*, 12(22), 3841. <https://doi.org/10.3390/plants12223841>
- Khan, F., Siddique, A. B., Shabala, S., Zhou, M., & Zhao, C. (2023). Phosphorus Plays Key Roles in Regulating Plants' Physiological Responses to Abiotic Stresses. *Plants*, 12(15), 2861. <https://doi.org/10.3390/plants12152861>
- Klein, H. (2011). *Italian ryegrass Lolium multiflorum Lam.* [https://accs.uaa.alaska.edu/wp-content/uploads/Lolium\\_multiflorum\\_BIO\\_LOMU.pdf](https://accs.uaa.alaska.edu/wp-content/uploads/Lolium_multiflorum_BIO_LOMU.pdf)
- Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología de la Universidad Nacional Agraria de la Selva. (2023). *Análisis de Suelos.*

- Lane, L. A., Ayres, J. F., & Lovett, J. V. (2000). The pastoral significance, adaptive characteristics, and grazing value of white clover (*Trifolium repens* L.) in dryland environments in Australia: a review. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 40(7), 1033-1046. <https://doi.org/10.1071/EA99141>
- León, R., Bonifaz, N., y Gutiérrez, F. (2018). *Pastos y forrajes del Ecuador: siembra y producción de pasturas*. Editorial Universitaria ABYA-YALA de la UPS. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19019>
- Lima, N. (2016). *Mejorando praderas nativas a través de la introducción de trébol blanco (Trifolium repens): Efecto de la dosis de fósforo y distanciamiento entre golpes* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Agraria La Molina. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/2738>
- Lima, N., Aguirre, L., y Flores, E. (2020). Estrategias para mejorar los pastizales altoandinos: el rol del trébol y la fertilización con fósforo. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 31(2), e17840. <https://doi.org/10.15381/rivep.v31i2.17840>
- Lindsay, W. L. (1979). *Chemical Equilibria in Soils*. Blackburn Press.
- Liu, J., Feng, X., Qiu, G., Li, H., Wang, Y., Chen, X., Fu, Q., & Guo, B. (2023). Inhibition Roles of Calcium in Cadmium Uptake and Translocation in Rice: A Review. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(14), 11587. <https://doi.org/10.3390/ijms241411587>
- Loka, D., Harper, J., Humphreys, M., Gasior, D., Wootton-Beard, P., Gwynn-Jones, D., Scullion, J., Doonan, J., Kingston-Smith, A., Dodd, R., Wang, J., Chadwick, D., Hill, P., Jones, D., Mills, G., Hayes, F., & Robinson, D. (2018). Impacts of abiotic stresses on the physiology and metabolism of cool-season grasses: A review. *Food and Energy Security*, 8(1), e00152. <https://doi.org/10.1002/fes3.152>

- Lynch, J. P., & Brown, K. M. (2001). Topsoil foraging – an architectural adaptation of plants to low phosphorus availability. *Plant and Soil*, 237(2), 225-237. <https://doi.org/10.1023/A:1013324727040>
- Mahajan, A., & Gupta, R. D. (Eds.). (2009). *Integrated Nutrient Management (INM) in a Sustainable Rice-Wheat Cropping System*. Springer Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9875-8>
- Malhotra, H., Vandana, Sharma, S., & Pandey, R. (2018). Phosphorus Nutrition: Plant Growth in Response to Deficiency and Excess. En M. Hasanuzzaman, M. Fujita, H. Oku, K. Nahar, & B. Hawrylak-Nowak (Eds.), *Plant Nutrients and Abiotic Stress Tolerance* (pp. 171-190). Springer Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-9044-8\\_7](https://doi.org/10.1007/978-981-10-9044-8_7)
- Mamani, G., Villantoy, A., y Parian, A. (2011). *Producción de pasturas en los valles interandinos*. Instituto Nacional de Innovación Agraria. <http://repositorio.inia.gob.pe/handle/20.500.12955/751>
- Marino, M. A. (2023). *Nutrición eficiente de pasturas para una producción ganadera sustentable* [Simposio]. Simposio Fertilidad 2023, Al gran suelo argentino, ¡salud! [https://fertilizar.org.ar/wp-content/uploads/2023/06/17\\_Nutricion-eficiente-de-pasturas-para-una-produccion-ganadera-sustentable.pdf](https://fertilizar.org.ar/wp-content/uploads/2023/06/17_Nutricion-eficiente-de-pasturas-para-una-produccion-ganadera-sustentable.pdf)
- Marschner, P. (2012). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants* (3rd ed.). Academic Press. [https://home.czu.cz/storage/737/65060\\_Mineral-Nutrition-of-higher-plants-Marschner-2012.pdf](https://home.czu.cz/storage/737/65060_Mineral-Nutrition-of-higher-plants-Marschner-2012.pdf)
- Mejía, M. L. (2022). *Dosis de fósforo en rendimiento al primer corte de rye grass (Lolium multiflorum Tabu y, Lolium hibrido Shogun, de origen Neozelandés* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. <https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/11436>

- Mendoza, S. I., Hernández, A., Rojas, A. R., Vaquera, H., Ramírez, O., y Castro, R. (2018). Comportamiento productivo de pasto ballico perenne solo y asociado con pasto ovilla y trébol blanco. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(2), 343-353. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i2.1076>
- Mengel, K., Kirkby, E. A., Kosegarten, H., & Appel, T. (2001). Phosphorus. En *Principles of Plant Nutrition* (5th ed., pp. 453-479). Springer Science+Business Media Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-94-010-1009-2\\_9](https://doi.org/10.1007/978-94-010-1009-2_9)
- Merkel, B. J., & Hoyer, M. (2012). Remediation of sites contaminated by radionuclides. En C. Poinsot & H. Geckeis (Eds.), *Radionuclide Behaviour in the Natural Environment: Science, implications and lessons for the nuclear industry* (pp. 601-645). Woodhead Publishing Series in Energy. <https://doi.org/10.1533/9780857097194.3.601>
- Miao, L., Wang, X., Yu, C., Ye, C., Yan, Y., & Wang, H. (2024). What factors control plant height? *Journal of Integrative Agriculture*, 23(6), 1803-1824. <https://doi.org/10.1016/j.jia.2024.03.058>
- Miramont. (s. f.). *Semillas Forrajeras Clima Frío* [Ryegrass Anual]. Recuperado 2 de julio de 2024, de <https://www.miramont.com.ec/semillas-forrajeras-clima-frio/>
- Monsivais, K. L. (2013). *Crecimiento y productividad estacional de Festuca arundinacea Schreber, Festulolium sp. y Lolium multiflorum Lam. en una región semiárida* [Tesis de pregrado, Universidad Autónoma de San Luis Potosí]. Repositorio Institucional de la UASLP. <https://repositorioinstitucional.uaslp.mx/xmlui/handle/i/3445>
- Moore, K. J., Moser, L. E., Vogel, K. P., Waller, S. S., Johnson, B. E., & Pedersen, J. F. (1991). Describing and Quantifying Growth Stages of Perennial Forage Grasses. *Agronomy Journal*, 83(6), 1073-1077. <https://doi.org/10.2134/agronj1991.00021962008300060027x>

- Mullins, G. L. (2009). *Phosphorus, Agriculture & the Environment*. Virginia Polytechnic Institute and State University. <https://efotg.sc.egov.usda.gov/references/public/va/PhosphorousAgEnv.pdf>
- Nadarajan, S., & Sukumaran, S. (2021). Chemistry and toxicology behind chemical fertilizers. En F. B. Lewu, T. Volova, S. Thomas, & K. R. Rakhimol (Eds.), *Controlled Release Fertilizers for Sustainable Agriculture* (pp. 195-229). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819555-0.00012-1>
- Nielson, H., y Sarudiansky, R. (Eds.). (2005). *Minerales para la Agricultura en Latinoamérica*. Centro de Estudios para la Sustentabilidad CEPS. <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/LIB-223.pdf>
- Noli, E. C. (2004). *Instalación y establecimiento de pasturas cultivadas en la sierra central del Perú*. Instituto Nacional de Innovación Agraria. <http://repositorio.inia.gob.pe/handle/20.500.12955/759>
- Noulas, C., Torabian, S., & Qin, R. (2023). Crop Nutrient Requirements and Advanced Fertilizer Management Strategies. *Agronomy*, 13(8), 2017. <https://doi.org/10.3390/agronomy13082017>
- Office of the Gene Technology Regulator. (2021). *The Biology of Trifolium repens L. (White Clover)*. Australian Government. [https://www.ogtr.gov.au/sites/default/files/files/2021-07/the\\_biology\\_of\\_white\\_clover.pdf](https://www.ogtr.gov.au/sites/default/files/files/2021-07/the_biology_of_white_clover.pdf)
- Orellana, J. A. (2023). *Trébol blanco (Trifolium repens) y roca fosfatada como estrategia de mejora del valor nutritivo de las praderas altoandinas* [Tesis doctoral, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Agraria La Molina. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/5972>
- Pashanasi, B., Vásquez, H., y Araujo, R. C. (2012). Determinación de niveles óptimos de fósforo en la recuperación de pasturas degradadas con establecimiento de pastos

- asociados de *Brachiaria brizantha* y *Centrosema macrocarpum*. *Conocimiento Amazónico*, 3(2), 99-108. <https://revistas.unapiquitos.edu.pe/ojs-2.4.8-5/index.php/Conocimientoamazonico/article/view/55>
- Patiño-Torres, C. O., y Sanclemente-Reyes, O. E. (2014). *Los microorganismos solubilizadores de fósforo (MSF): una alternativa biotecnológica para una agricultura sostenible*. 10(2). [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1900-38032014000200018](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1900-38032014000200018)
- Perdomo, F., Mondragón, J., y Vibrans, H. (Ed.). (2009, agosto 23). *Lolium multiflorum Lam.* Malezas de México. <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/poaceae/lolium-multiflorum/fichas/ficha.htm>
- Perotti, E., Huguenin-Elie, O., Meisser, M., Dubois, S., Probo, M., & Mariotte, P. (2021). Climatic, soil, and vegetation drivers of forage yield and quality differ across the first three growth cycles of intensively managed permanent grasslands. *European Journal of Agronomy*, 122, 126194. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126194>
- Pierzynski, G. M., McDowell, R. W., & Sims, J. T. (2005). Chemistry, Cycling, and Potential Movement of Inorganic Phosphorus in Soils. En J. T. Sims & A. N. Sharpley (Eds.), *Agronomy Monographs Phosphorus: Agriculture and the Environment* (Vol. 46, pp. 53-86). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr46.c3>
- polyfarming. (2020). *Gestión del prado y los animales que pastan en él* [Ficha n.º 2: Tipos de especies de pasto y combinaciones de ellas]. <https://polyfarming.eu/fichas-tecnicas/?lang=es>
- Prasad, R., & Chakraborty, D. (2019, abril 19). *Phosphorus Basics: Understanding Phosphorus Forms and Their Cycling in the Soil*. Alabama A&M University and Auburn University.

<https://www.aces.edu/blog/topics/crop-production/understanding-phosphorus-forms-and-their-cycling-in-the-soil/>

- Quintero, C. E. (2002). Dosificación del Fósforo según Tipos de Suelos. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*, 16, 8-10. [http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/C6F5001B54460C798525799C0058C6CC/\\$FILE/nota2.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/C6F5001B54460C798525799C0058C6CC/$FILE/nota2.pdf)
- Restrepo-Franco, G. M., Marulanda-Moreno, S., De la Fe-Pérez, Y., Díaz-de la Osa, A., Lucia-Baldani, V., y Hernández-Rodríguez, A. (2015). Bacterias solubilizadoras de fosfato y sus potencialidades de uso en la promoción del crecimiento de cultivos de importancia económica. *Revista CENIC Ciencias Biológicas*, 46(1), 63-76. <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/119061/1/Bacterias-solubilizadoras-de-fosfato-y-sus-potencialidades-de-uso-Baldani.pdf>
- Rojas, C. (2006). *Interpretación de la disponibilidad de fósforo en los suelos de Chile*. Centro Regional de Investigación INIA La Platina. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/8534>
- Romero, O. (2005). Pradera permanente en la zona sur. Trébol blanco: clave en los sistemas pastoriles. *Tierra Adentro*, 64, 21-23. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/6195>
- Rooney, D. C., & Clipson, N. J. W. (2008). Phosphate Addition and Plant Species Alters Microbial Community Structure in Acidic Upland Grassland Soil. *Microbial Ecology*, 57(1), 4-13. <https://doi.org/10.1007/s00248-008-9399-2>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú [SENAMHI]. (2024). *Datos Hidrometeorológicos*. SENAMHI Cajamarca - Estaciones. <https://www.senamhi.gob.pe/servicios/main.php?dp=cajamarca&p=estaciones>
- Sharifi, S., Shi, S., Obaid, H., Dong, X., & He, X. (2024). Differential Effects of Nitrogen and Phosphorus Fertilization Rates and Fertilizer Placement Methods on P Accumulations in Maize. *Plants*, 13(13), 1778. <https://doi.org/10.3390/plants13131778>

- Sierra, C. (1990). *Rocas fosfóricas: nueva fuente de fósforo para praderas y cultivos*. Centro Regional de Investigación INIA Remehue. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/38089>
- Silveira, M. L., & Kohmann, M. M. (2020). Maintaining soil fertility and health for sustainable pastures. En M. Rouquette & G. E. Aiken (Eds.), *Management Strategies for Sustainable Cattle Production in Southern Pastures* (pp. 35-58). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814474-9.00003-7>
- Singh, B. B., & Jones, J. P. (1977). Phosphorus sorption isotherm for evaluating phosphorus requirements of lettuce at five temperature regimes. *Plant and Soil*, 46(1), 31-44. <https://doi.org/10.1007/BF00693112>
- Solangi, F., Zhu, X., Khan, S., Rais, N., Majeed, A., Sabir, M. A., Iqbal, R., Ali, S., Hafeez, A., Ali, B., Ercisli, S., & Kayabasi, E. T. (2023). The Global Dilemma of Soil Legacy Phosphorus and Its Improvement Strategies under Recent Changes in Agro-Ecosystem Sustainability. *ACS Omega*, 8(26), 23271-23282. <http://dx.doi.org/10.1021/acsomega.3c00823>
- Sturludóttir, E., Brophy, C., Bélanger, G., Gustavsson, A.-M., Jørgensen, M., Lunnan, T., & Helgadóttir, A. (2013). Benefits of mixing grasses and legumes for herbage yield and nutritive value in Northern Europe and Canada. *Grass and Forage Science*, 69(2), 229-240. <https://doi.org/10.1111/gfs.12037>
- Tafur-Sanchez, E., y García-Torres, C. H. (2022). Comportamiento productivo de asociaciones de especies de pastos forrajeros, en el Anexo de San Francisco de Tintín – Amazonas. *Revista de investigación Agropecuaria Science and Biotechnology*, 2(4), 41-49. <https://doi.org/10.25127/riagrop.20224.880>
- Tahir, M., Li, C., Zeng, T., Xin, Y., Chen, C., Javed, H. H., Yang, W., & Yan, Y. (2022). Mixture Composition Influenced the Biomass Yield and Nutritional Quality of Legume–Grass Pastures. *Agronomy*, 12(6), 1449. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061449>

- Terroba, N., Flores, E., y Cañazaca, E. (2024). Implicancias del manejo de una pastura cultivada en seco y la respuesta al abonamiento. *Revista de Investigaciones Altoandinas – Journal of High Andean Research*, 26(1), 16-23. <https://doi.org/10.18271/ria.2024.569>
- Terrones, J. N. (1999). *Tecnologías para la producción de semillas forrajeras en la zona andina del Perú*. Instituto Nacional de Innovación Agraria. <https://repositorio.inia.gob.pe/handle/20.500.12955/999>
- Tiessen, H. (2008). Phosphorus in the Global Environment. En P. J. White & J. P. Hammond (Eds.), *Plant Ecophysiology: The Ecophysiology of Plant-Phosphorus Interactions* (Vol. 7, pp. 1-7). Springer Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8435-5\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8435-5_1)
- Torres, É. (2022). *Dosis de fósforo en rendimiento al primer corte del Rye Grass (Lolium perenne) Viscon y Alto de origen neozelandés - Cutervo* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. <https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/10910>
- Tsai, S. M., & Rossetto, R. (1992). Transformações Microbianas do Fósforo. En E. J. B. N. Cardoso, S. M. Tsai, & M. C. P. Neves (Eds.), *Microbiologia do Solo* (pp. 231-242). Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. [https://www.esalq.usp.br/departamentos/iso/arquivos\\_aula/LSO\\_400%20LIVRO%20-%20MICROBIOLOGIA%20DO%20SOLO.pdf](https://www.esalq.usp.br/departamentos/iso/arquivos_aula/LSO_400%20LIVRO%20-%20MICROBIOLOGIA%20DO%20SOLO.pdf)
- Ullah, J., Chen, S., Ruan, Y., Ali, A., Khan, N. M., Rehman, M. N. U., & Fan, P. (2023). Combined Di-Ammonium Phosphate and Straw Return Increase Yield in Sweet Corn. *Agronomy*, 13(7), 1885. <https://doi.org/10.3390/agronomy13071885>
- Vallejos, L. A. (2009). *Efecto de la fertilización fosforada y frecuencia de pastoreo sobre el valor nutritivo de la dieta y el comportamiento ingestivo de las vacas Holstein en*

- pasturas de ryegrass-trébol en Cajamarca* [Tesis doctoral inédita]. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Vallejos, L. A., Alvarez, W. Y., Paredes, M., Saldanha, S., Guillén-Sánchez, R., Pinares, C., Bustíos, J., y García, R. (2021). Comportamiento productivo y valor nutricional de siete genotipos de trébol en tres pisos altitudinales de la sierra norte del Perú. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 32(1), e17690. <https://doi.org/10.15381/rivep.v32i1.17690>
- Vallejos, R. E. (2021). *Producción de forraje y valor nutricional de la asociación raigrás ecotipo cajamarquino-trébol blanco en Cajamarca* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Cajamarca]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Cajamarca. <http://hdl.handle.net/20.500.14074/6125>
- van Straaten, P. (2002). *Rocks for Crops: Agrominerals of sub-Saharan Africa*. ICRAF International Centre for Research in Agroforestry. [https://apps.worldagroforestry.org/Units/Library/Books/PDFs/11\\_Rocks\\_for\\_crops.pdf](https://apps.worldagroforestry.org/Units/Library/Books/PDFs/11_Rocks_for_crops.pdf)
- van Straaten, P. (2007). *Agrogeology: The use of rocks for crops*. Enviroquest Ltd.
- Vance, C. P., Uhde-Stone, C., & Allan, D. L. (2003). Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New Phytologist*, 157(3), 423-447. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00695.x>
- Vásquez, V. (2014). *Diseños experimentales con SAS* (CONCYTEC/FONDECYT, Ed.). Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica [CONCYTEC].
- Velázquez, P. A. (2009). *Evaluación morfoagronómica y nutricional de cinco variedades de Rye Grass BIANUAL (*Lolium multiflorum*) en lugares representativos de las zonas de producción de leche de las provincias de Carchi, Imbabura y Pichincha* [Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional]. Repositorio Digital Institucional de la Escuela Politécnica Nacional. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/1664>

- Vibrans, H. (2009, julio 22). *Trifolium repens* L. Malezas de México. <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/fabaceae/trifolium-repens/fichas/ficha.htm>
- Villar, M. Á., Cuéllar, J. E., y Valentin, S. L. (2014). *Valoración técnica, económica y ambiental de tres sistemas de silvopasturas, en la región Cajamarca*. Instituto Nacional de Innovación Agraria. <https://repositorio.inia.gob.pe/handle/20.500.12955/376>
- Villegas, N. Y. (2017). *Selección de gramíneas forrajeras perennes para el mejoramiento alimenticio de ganado bovino en el distrito de Florida, Pomacochas-Bongará- Amazonas* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Cajamarca]. Repositorio Institucional de la UNC. <https://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/1680>
- Wang, B., Deng, J., Wang, T., Ni, W., Feng, Q., & Lan, J. (2022). Effect of Seeding Options on Interspecific Competition in Oat (*Avena sativa* L.)–Common Vetch (*Vicia sativa* L.) Forage Crops. *Agronomy*, 12(12), 3119. <https://doi.org/10.3390/agronomy12123119>
- Wang, R., Shi, W., & Li, Y. (2022). Link Between Aeration in the Rhizosphere and P-Acquisition Strategies: Constructing Efficient Vegetable Root Morphology. *Frontiers in Environmental Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.906893>
- Wang, Y.-P., Huang, Y., Augusto, L., Goll, D. S., Helfenstein, J., & Hou, E. (2022). Toward a Global Model for Soil Inorganic Phosphorus Dynamics: Dependence of Exchange Kinetics and Soil Bioavailability on Soil Physicochemical Properties. *Global Biogeochemical Cycles*, 36(3), 1-20. <https://doi.org/10.1029/2021GB007061>
- White, P. J., & Hammond, J. P. (2008). Phosphorus nutrition of terrestrial plants. En *Plant Ecophysiology: The Ecophysiology of Plant-Phosphorus Interactions* (Vol. 7, pp. 51-81). Springer Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8435-5\\_4](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8435-5_4)

- Widdup, K. H. (1980). *The effect of temperature on the growth and development of five white clover (*Trifolium repens* L.) populations* [Master's thesis, Massey University]. Massey Research Online. <http://hdl.handle.net/10179/10288>
- Zapata, F., y Roy, R. N. (2007). *Utilización de las rocas fosfóricas para una agricultura sostenible*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO]. <https://www.fao.org/4/y5053s/y5053s.pdf>
- Zhao, F., Sun, J., Yu, S., Liu, H., & Yu, K. (2019). Aeration Irrigation Can Improve Growth of Table Grape cv. Red Globe (*Vitis vinifera* L.) in Greenhouse. *HortScience*, 54(4), 732-737. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI13732-18>
- Ziadi, N., Whalen, J. K., Messiga, A. J., & Morel, C. (2013). Assessment and Modeling of Soil Available Phosphorus in Sustainable Cropping Systems. En *Advances in Agronomy* (Vol. 122, pp. 85-126). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-417187-9.00002-4>

## ANEXOS

### Anexo 1. Datos promedio de las variables evaluadas

**Tabla 18**

*Altura de planta (cm) de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia a una frecuencia de corte de 30 días*

Bloques	Tratamientos			
	T0	T1	T2	T3
I	15.67	19.67	23.00	18.67
II	12.67	20.00	21.33	20.00
III	15.33	21.00	25.67	20.67
Promedio	14.56	20.22	23.33	19.78

**Tabla 19**

*Altura de planta (cm) de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia a una frecuencia de corte de 45 días*

Bloques	Tratamientos			
	T0	T1	T2	T3
I	20.00	31.00	37.33	31.33
II	20.33	32.33	36.67	32.00
III	19.67	32.00	40.00	31.00
Promedio	20.00	31.78	38.00	31.44

**Tabla 20**

*Altura de planta (cm) de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia a una frecuencia de corte de 60 días*

Bloques	Tratamientos			
	T0	T1	T2	T3
I	31.00	34.33	47.00	39.67
II	30.67	33.67	44.67	41.33
III	32.00	39.00	47.00	39.67
Promedio	31.22	35.67	46.22	40.22

**Tabla 21**

*Altura de planta (cm) de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia a una frecuencia de corte de 75 días*

Bloques	Tratamientos			
	T0	T1	T2	T3
I	34.67	36.67	47.67	40.00
II	29.33	34.67	45.00	42.33
III	33.00	39.33	48.67	41.33
Promedio	32.33	36.89	47.11	41.22

**Tabla 22**

*Rendimiento de materia verde ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia a una frecuencia de corte de 30 días*

Bloques	Tratamientos			
	T0	T1	T2	T3
I	1,874.67	4,058.67	4,520.00	3,846.67
II	2,122.67	4,236.93	4,621.33	3,522.67
III	2,598.67	4,264.00	4,960.00	4,618.67
Promedio	2,198.67	4,186.53	4,700.44	3,996.00

**Tabla 23**

*Rendimiento de materia verde (kg ha<sup>-1</sup>) de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia a una frecuencia de corte de 45 días*

Bloques	Tratamientos			
	T0	T1	T2	T3
I	5,458.67	11,784.00	13,460.00	9,834.67
II	5,630.67	8,908.00	13,070.67	12,536.00
III	6,453.33	11,817.33	11,190.67	11,020.00
Promedio	5,847.56	10,836.44	12,573.78	11,130.22

**Tabla 24**

*Rendimiento de materia verde (kg ha<sup>-1</sup>) de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia a una frecuencia de corte de 60 días*

Bloques	Tratamientos			
	T0	T1	T2	T3
I	9,266.67	15,760.00	18,653.33	22,266.67
II	9,426.67	17,240.00	17,880.00	22,480.00
III	9,946.67	16,426.67	19,773.33	24,426.67
Promedio	9,546.67	16,475.56	18,768.89	23,057.78

**Tabla 25**

*Rendimiento de materia verde (kg ha<sup>-1</sup>) de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia a una frecuencia de corte de 75 días*

Bloques	Tratamientos			
	T0	T1	T2	T3
I	9,013.33	12,510.67	16,098.67	20,624.00
II	8,285.33	14,337.33	15,738.67	20,596.00
III	8,613.33	15,405.33	15,561.33	20,720.00
Promedio	8,637.33	14,084.44	15,799.56	20,646.67

**Tabla 26**

*Rendimiento de materia seca (kg ha<sup>-1</sup>) de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia a una frecuencia de corte de 30 días*

Bloques	Tratamientos			
	T0	T1	T2	T3
I	360.00	811.73	904.00	720.00
II	400.00	847.39	924.27	680.00
III	480.00	852.80	992.00	923.73
Promedio	413.33	837.31	940.09	774.58

**Tabla 27**

*Rendimiento de materia seca (kg ha<sup>-1</sup>) de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia a una frecuencia de corte de 45 días*

Bloques	Tratamientos			
	T0	T1	T2	T3
I	1,200.91	2,474.64	2,826.60	2,163.63
II	1,182.44	1,870.68	2,744.84	2,632.56
III	1,355.20	2,481.64	2,350.04	2,424.40
Promedio	1,246.18	2,275.65	2,640.49	2,406.86

**Tabla 28**

*Rendimiento de materia seca (kg ha<sup>-1</sup>) de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia a una frecuencia de corte de 60 días*

Bloques	Tratamientos			
	T0	T1	T2	T3
I	2,131.33	3,624.80	4,290.27	5,121.33
II	2,262.40	3,965.20	4,112.40	5,395.20
III	2,287.73	3,778.13	4,547.87	5,862.40
Promedio	2,227.16	3,789.38	4,316.84	5,459.64

**Tabla 29**

*Rendimiento de materia seca ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) de la asociación rye grass Ecotipo Cajamarquino – trébol blanco Huia a una frecuencia de corte de 75 días*

Bloques	Tratamientos			
	T0	T1	T2	T3
I	2,253.33	3,127.67	4,024.67	5,362.24
II	2,071.33	3,440.96	3,777.28	5,149.00
III	2,239.47	3,851.33	3,890.33	4,972.80
Promedio	2,188.04	3,473.32	3,897.43	5,161.35

## Anexo 2. Análisis de suelos

### Figura 11

#### Resultados e interpretación del análisis físico – químico de suelos del campo experimental.

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología

## ANÁLISIS DE SUELOS

### 1. DATOS

SOLICITANTE:		MUESTREADO POR:	
DEPARTAMENTO:	CAJAMARCA	FECHA DE RECEPCIÓN:	20/07/2023
PROVINCIA:	SAN MIGUEL	FECHA DE INICIO DE ENSAYO:	20/07/2023
DISTRITO:	CALQUIS	FECHA DE REPORTE:	
LUGAR:	-----	RECIBO O FACTURA:	
CULTIVO:		OBSERVACIÓN:	-----

### 2. RESULTADOS DEL ENSAYO SOLICITADO

N°	DATOS			ANÁLISIS MECÁNICO				pH	CE ds/m	M.O.	N	C	P disponible	K	CIC	Ca	Mg	K	Na	Al	H	CICe	Bases Cambiables %	Acidez Cambiable %	Saturación de Aluminio %
	CODIGO DEL LAB.	CASERIO	REFERENCIA	Arena %	Arcilla %	Limo %	Clase Textural																		
1	S1088	Alto Palmito	Edilbrando Bustamante Quispe	53.52	11.76	34.72	Franco Arenoso	5.28	0.158	4.478	0.224	2.597	8.154	171.975	---	2.026	0.268	0.230	0.107	1.125	0.030	3.786	69.493	30.507	29.714

Los Resultados presentados son válidos únicamente para las muestras ensayadas. Queda prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita del LASAE.  
Los Resultados no pueden ser usados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

 UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA  
Tingo María



Dr. HUGO ALFREDO HUAMANI YUPANQUI  
Jefe del Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología

Carretera Central Km 1.21 - Tingo María

GRACIA POR SU PREFERENCIA

analisisdesuelosunas@hotmail.com  
Whatsapp: 944407531

## MÉTODOS ANALÍTICOS

- pH método del potenciómetro, relación suelo - agua 1:1
- C.E: Conductímetro – Extracto Acuoso
- Materia orgánica: Método de Walkley y Black
- Nitrógeno Total: Micro Kjeldahl
- Fósforo disponible: Método de Olsen modificado. Extracto de  $\text{NHCO}_3$  0.5M, pH 8.5
- Potasio Disponible: Método de acetato de amonio 1N, pH 7.0
- Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC): Método de acetato de amonio 1N, pH 7.0  
Ca Mg K Na : Absorción atómica
- C.I.C efectiva: Desplazamiento con KCl 1N (Suelos en pH < 5.5)  
Aluminio más Hidrógeno: Método de Yuan.
- Densidad Aparente, Densidad Real, Porcentaje de Porosidad: Método de la Probeta
- Humedad Relativa, Capacidad de Campo: Método de la Probeta
- Determinación de elementos menores Hierro, Cobre, Zinc y Manganeso: Método Melich III – EAA
- Determinación del Boro: Método de la Azometina – H
- Cadmio y Plomo disponible: Método EDTA – EAA
- Cadmio Total: Extracción USEPA 3050 – EAA
- Cadmio Soluble: Lectura directa de la solución en el espectrofotómetro de Absorción Atómica.
- Determinación colorimétrica de molibdeno

### INTERPRETACIÓN DEL pH

Según Scheffer y Schachtschabel	pH en KCl	UNALM	pH en agua
Extremadamente ácido	< 4.0	Fuertemente ácido	< 5.5
Fuertemente ácido	4.0 - 4.9	Moderadamente ácido	5.5 - 6.0
Medianamente ácido	5.0 - 5.9	Ligeramente ácido	6.1 - 6.5
Ligeramente ácido	6.0 - 6.9	Neutro	7.0
Neutro	7.0	Ligeramente alcalino	7.2 - 7.8
Ligeramente alcalino	7.1 - 8.0	Moderadamente alcalino	7.9 - 8.4
Mediana alcalino	8.1 - 9.0	Fuertemente alcalino	> 8.5
Fuertemente alcalino	9.1 - 10		
Extremadamente alcalino	> 10		

Interpretación de Salinidad	Rango (dS/m)
No salino	0-2
Muy ligeramente salino	2-4
Ligeramente salino	4-8
Moderadamente salino	8-16
Fuertemente salino	> 16

Interpretación de Potasio Disponible	Rango (Kg K <sub>2</sub> O/ha)	Rango (ppm)
Bajo	< 300	< 100
Medio	300-600	100-240
Alto	> 600	> 240



Interpretación de Carbonato de Calcio	Rango (%)
Bajo	< 1
Medio	1-5
Alto	5-15
Muy alto	> 15

Interpretación de Materia Orgánica	Rango (%)
Bajo	< 2
Medio	2-4
Alto	> 4

Interpretación de Nitrógeno Total	Rango (%)
Bajo	< 0.1
Medio	0.1-0.2
Alto	> 0.2

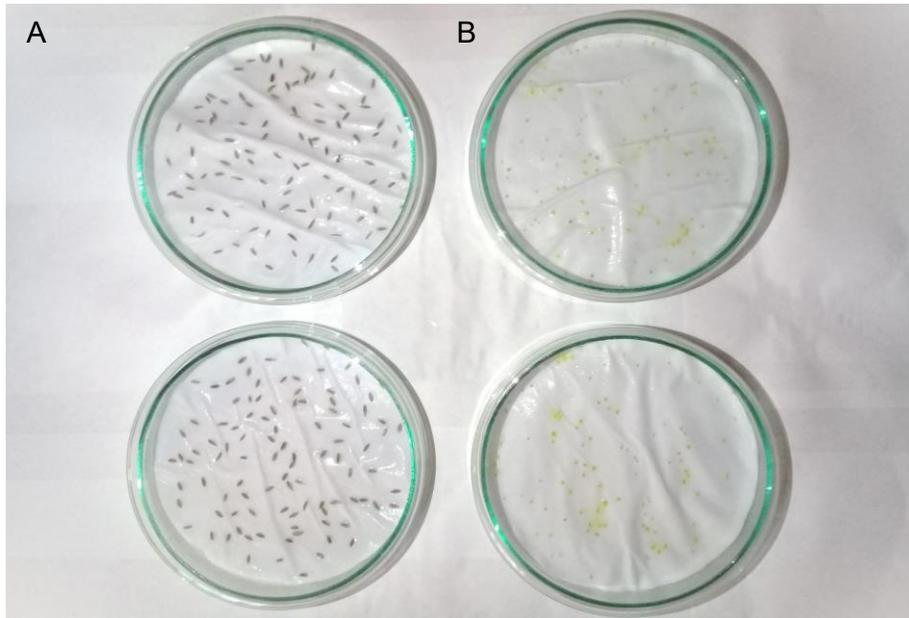
Interpretación de Fósforo Disponible	Rango (ppm)
Bajo	< 7
Medio	7-14
Alto	> 14

GRACIAS POR LA CONFIANZA Y PREFERENCIA

### Anexo 3. Panel fotográfico

#### Figura 12

*Prueba de germinación en placas Petri en dos repeticiones. A: Semilla de rye grass Ecotipo Cajamarquino. B: Semilla de trébol blanco Huia.*



#### Figura 13

*Delimitación y trazado de parcelas en el campo experimental.*



**Figura 14**

*Primer corte o corte de limpieza a los 90 días después de la siembra.*



**Figura 15**

*Evaluación de variables en el campo experimental. A: Altura de planta. B: Pesaje de la muestra de materia verde.*



## Figura 16

*Fase de laboratorio. A: Pesaje de muestras antes de ingresar a la estufa. B: Colocación de las muestras a la estufa.*



## Figura 17

*Fase de laboratorio. A: Pesaje de las muestras después de salir de la estufa. B: Bolsa de papel con la muestra de materia seca.*

