

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA



TESIS:

**Enmienda cálcica, silícica y fuentes fosfóricas en
características químicas y productividad de
suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021**

Para optar el título profesional de:

INGENIERO AGRÓNOMO

PRESENTADO POR:

Bach. Plinio RONDINEL MORA

ASESOR:

Mtro. Rodolfo ALCA MENDOZA

AYACUCHO - PERÚ

2024

*A Dios mediador de todas las bendiciones
recibidas en mi vida.*

*A padres, Remigio y Victoria por su
incondicional apoyo en cada momento de
mi vida, además creyeron en mí sacándome
adelante, dándome ejemplos dignos de
superación y entrega.*

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga y a la Facultad de Ciencias Agrarias.

A la Escuela de Formación Profesional de Agronomía, alma máter de mis estudios profesionales, donde me inculcaron los conocimientos necesarios para alcanzar mis metas.

A los docentes de la Facultad de Ciencias Agrarias, por sus enseñanzas y orientaciones en cada etapa de mi formación. Especial agradecimiento a mi asesor Ing. Rodolfo Alca Mendoza por su asesoramiento y aporte en el desarrollo y conducción del presente trabajo de investigación.

A todos los que de alguna forma me ayudaron en la consecución del presente trabajo, les agradezco mucho.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTO	iii
ÍNDICE GENERAL	iv
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	x
RESUMEN	xiii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I.....	4
MARCO TEÓRICO	4
1.1. Antecedentes	4
1.1.1. Nacionales.....	4
1.1.2. Internacionales.....	6
1.2. Acidez del suelo	8
1.2.1. Origen de la acidez.....	8
1.2.2. Fuentes de la acidez del suelo	8
1.2.3. Hidrólisis del aluminio.....	11
1.2.4. Tipos de acidez del suelo.....	12
1.2.5. Características de los suelos ácidos	13
1.3. Encalado.....	15
1.3.1. Fundamento	15
1.3.2. Materiales encalantes	19
1.3.3. El efecto del silicio en la reacción del suelo.....	20
1.4. Fósforo.....	21
1.4.1. El fósforo en el suelo	21
1.4.2. Fuentes de fósforo y su influencia en el pH del suelo	24
CAPÍTULO II	25
METODOLOGÍA.....	25
2.1. Unidad de muestreo	25
2.1.1. Muestreo de suelos	25
2.1.2. Caracterización de la muestra de suelo	26
2.2. Fuentes fosfóricas	29

2.2.1. Superfosfato triple de calcio (ST) $[Ca (H_2PO_4)_2 H_2O]$	29
2.2.2. Fosfato diamónico (FDA) $[(NH_4)_2HPO_4]$:	29
2.3. Enmiendas.....	29
2.3.1. Dolomita $[CaMg(CO_3)_2]$	29
2.3.2. Silicato de magnesio $(MgSiO_3)$	29
2.4. Factores y tratamientos	30
2.4.1. Factores	30
2.4.2. Tratamientos	30
2.5. Materiales, insumos y equipos.....	31
2.5.1. Materiales	31
2.5.2. Insumos.....	31
2.5.3. Equipos	31
2.6. Métodos y procedimientos	32
2.6.1. Fase de invernadero	32
2.5.2. Evaluaciones fase post invernadero.....	34
2.6. Diseño experimental	36
2.7. Análisis estadístico	36
CAPÍTULO III	37
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37
3.1. Evaluación en las características químicas del suelo	37
3.1.1. pH.....	37
3.1.2. Aluminio intercambiable	40
3.1.3. Calcio intercambiable.....	44
3.1.4. Magnesio intercambiable	47
3.1.5. Fósforo disponible	49
3.2. En el cultivo indicador	51
3.2.1. Longitud de raíces	51
3.2.2. Materia seca radicular.....	54
3.2.3. Materia seca del vástago.....	57
3.2.4. Altura de planta.....	60
CONCLUSIONES.....	63
RECOMENDACIONES	64
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
ANEXOS	70

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1 <i>Materiales comunes de encalado</i>	19
Tabla 2.1 <i>Resultados del análisis de caracterización del suelo de Quisto Valle</i>	28
Tabla 3.1 <i>Análisis de variancia del pH en suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021.....</i>	37
Tabla 3.2 <i>Análisis de variancia para el aluminio intercambiable en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021</i>	41
Tabla 3.3 <i>Análisis de variancia del calcio intercambiable en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021</i>	44
Tabla 3.4 <i>Análisis de variancia del magnesio intercambiable en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021</i>	47
Tabla 3.5 <i>Análisis de variancia para el fósforo disponible en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021</i>	49
Tabla 3.6 <i>Análisis de variancia de la longitud de raíz de maíz en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021</i>	51
Tabla 3.7 <i>Análisis de variancia del peso de la MS de la raíz de maíz en suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021</i>	54
Tabla 3.8 <i>Análisis de variancia de la MS del vástago del maíz en suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021</i>	58
Tabla 3.9 <i>Análisis de variancia de la altura de planta del maíz en suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021</i>	60

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 <i>Proceso de acidificación del suelo.....</i>	9
Figura 1.2 <i>Relación entre el pH, distribución porcentual y carga promedio de especies de aluminio (Al^{3+}) soluble.....</i>	12
Figura 1.3 <i>Relaciones de equilibrio entre la acidez residual, la sal reemplazable (intercambiable) y la solución del suelo (activa) en un suelo con coloides orgánicos y minerales.....</i>	14
Figura 1.4 <i>Relaciones existentes en suelos minerales entre pH y disponibilidad de nutrientes para las plantas</i>	15
Figura 1.5 <i>Representación de las fracciones de fósforo en el suelo para la nutrición de la planta.....</i>	23
Figura 1.6 <i>Efecto relativo del pH del suelo sobre la adsorción y precipitación de fósforo.....</i>	23
Figura 2.1 <i>Vista panorámica del área de muestreo de la comunidad de Quisto Valle del Centro Poblado de Quisto Central, distrito de Pichari, provincia La Convención, región Cusco</i>	26
Figura 2.2 <i>Muestreo de suelo en área de cultivo con plantas de coca (<i>Erythroxylum coca</i>). Vista satelital del lugar de muestreo del suelo (A). Esquema de la forma de recolección de la muestra de suelos en una hectárea (B)</i>	27
Figura 2.3 <i>Fuentes fosfóricas y enmienda: Superfosfato triple de calcio(A), Fosfato diamónico (B), Silicato de magnesio (C) y Dolomita (D).....</i>	29
Figura 2.4 <i>Determinación del pH de las muestras de suelo</i>	31
Figura 2.5 <i>Macetas con muestras suelo seco 3.5 kg</i>	32
Figura 2.6 <i>Croquis de la distribución aleatoria de tratamientos (DCA).....</i>	32
Figura 2.7 <i>Aplicación de tratamientos en las macetas. (A) Enmiendas (Dolomita, silicato de magnesio). (B)Fuentes fosfóricas (ST, FDA)</i>	33
Figura 3.1 <i>Efecto de aplicación de fuentes fosfóricas (ST, FDA) en diferentes dosis de dolomita y silicato de magnesio en el pH de un suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021. Prueba Tukey al 5%.....</i>	39
Figura 3.2 <i>Tendencia lineal del pH por efecto de dolomita y silicato de Mg en las fuentes fosfóricas (ST, FDA) en un suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021.....</i>	40

Figura 3.3	<i>Efecto de aplicación de fuentes fosfóricas (ST, FDA) en las diferentes dosis de dolomita y silicato de magnesio en el aluminio intercambiable de un suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021. Prueba Tukey al 5%</i>	<i>42</i>
Figura 3.4	<i>Tendencia lineal del aluminio intercambiable por efecto de dolomita y silicato de Mg en las fuentes fosfóricas (ST, FDA) de un suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021</i>	<i>43</i>
Figura 3.5	<i>Efecto de la aplicación de fuentes fosfóricas (ST, FDA) en las diferentes dosis de dolomita y silicato de magnesio en el calcio intercambiable de un suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021. Prueba Tukey al 5%</i>	<i>45</i>
Figura.3.6	<i>Tendencia lineal del calcio intercambiable por efecto de dolomita y silicato de Mg en las fuentes fosfóricas (ST, FDA) de un suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021</i>	<i>46</i>
Figura 3.7	<i>Tendencia lineal del magnesio intercambiable por efecto de dolomita y silicato de Mg en un suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021.....</i>	<i>48</i>
Figura 3.8	<i>Efecto de la aplicación de superfosfato triple de calcio (ST), fosfato diamónico (FDA) en la disponibilidad de fósforo de un suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021. Prueba Tukey al 5%.....</i>	<i>50</i>
Figura 3.9	<i>Tendencia lineal para el fósforo disponible por efecto de dolomita y silicato de Mg de un suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021.....</i>	<i>50</i>
Figura 3.10	<i>Efecto de la aplicación de fuentes fosfóricas (ST, FDA) en las diferentes dosis de dolomita y silicato de magnesio en la longitud de la raíz del maíz de un suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021. Prueba Tukey al 5% ...</i>	<i>52</i>
Figura 3.11	<i>Tendencia lineal de la longitud de raíz de maíz por efecto de dolomita y silicato de Mg en las fuentes fosfóricas (ST, FDA) de un suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021.....</i>	<i>53</i>
Figura 3.12	<i>Efecto de la aplicación de fuentes fosfóricas (ST, FDA) en las diferentes dosis de dolomita y silicato de magnesio en el peso de la MS radicular de un suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021. Prueba Tukey al 5%.....</i>	<i>55</i>
Figura 3.13	<i>Tendencia lineal del peso de la MS radicular del maíz por efecto de enmiendas de dolomita y silicato de magnesio en las fuentes fosfóricas (ST, FDA) en un suelo ácido de selva. Pichari, cusco 2021</i>	<i>57</i>
Figura 3.14	<i>Tendencia lineal del peso MS del vástago del maíz por efecto de la dolomita de un suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021</i>	<i>59</i>

Figura 3.15	<i>Efecto de la aplicación de fuentes fosfóricas (ST, FDA) en las diferentes dosis de dolomita y silicato de magnesio en la altura de planta de un suelo ácido de selva. Prueba Tukey al 5%</i>	<i>61</i>
Figura 3.16	<i>Tendencia lineal y cuadrática de la altura de planta del maíz por efecto de la dolomita y silicato de Mg con fuentes fosfóricas (ST, FDA) en un suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021</i>	<i>62</i>

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Ubicación del lugar de muestreo de suelo.	71
Anexo 2. Ubicación del lugar de la ejecución del experimento.	72
Anexo 3. Análisis de caracterización del suelo de Quisto Valle al inicio del experimento.	73
Anexo 4. Análisis de caracterización del suelo de Quisto Valle al finalizar el experimento.	74
Anexo 5. Análisis de variancia del pH en suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021.	78
Anexo 6. Análisis de variancia de efectos simples del pH en suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021.	78
Anexo 7. Prueba de Tukey de efectos simples del pH en suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021.	79
Anexo 8. Análisis de variancia del aluminio intercambiable en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021.	79
Anexo 9. Análisis de variancia de efecto simples del aluminio intercambiable en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021.	80
Anexo 10. Prueba de Tukey de efectos simples de aluminio intercambiable en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021.	80
Anexo 11. Análisis de variancia del calcio intercambiable en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021.	81
Anexo 12. Análisis de variancia de efecto simples del calcio intercambiable en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021.	81
Anexo 13. Prueba de Tukey de efectos simples del calcio intercambiable en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021.	82
Anexo 14. Análisis de variancia del magnesio intercambiable en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021.	82

Anexo 15.	Prueba de Tukey de efectos principales de enmienda para magnesio intercambiable en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021.....	83
Anexo 16.	Análisis de variancia para el fósforo disponible en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021.	83
Anexo 17.	Prueba de Tukey de efectos principales de fuentes de fósforo para fósforo disponible en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021.	84
Anexo 18.	Prueba de Tukey de efectos principales de enmienda para fósforo disponible en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021.	84
Anexo 19.	Análisis de variancia para la longitud de raíces en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021.	84
Anexo 20.	Análisis de variancia de efecto simples de la longitud de raíz del maíz en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021.....	85
Anexo 21.	Prueba de Tukey de efectos simples de longitud de raíz en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021.	85
Anexo 22.	Análisis de variancia de la MS radicular del maíz en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021.	86
Anexo 23.	Análisis de variancia de efecto simples de MS de la raíz del maíz en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021.....	86
Anexo 24.	Prueba de Tukey de efectos simples de la MS radicular del maíz en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021.....	87
Anexo 25.	Análisis de variancia de la MS del vástago del maíz en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021.	87
Anexo 26.	Análisis de variancia de la altura de planta del maíz en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021.	88
Anexo 27.	Análisis de variancia de efecto simples de la altura de planta del maíz en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021.....	88

Anexo 28.	Prueba de Tukey de efectos simples de la altura de planta del maíz en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021.....	89
Anexo 29.	Panel fotográfico	90

RESUMEN

El ensayo se realizó en el invernadero del programa de investigación de pastos y ganadería de la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga, para evaluar la enmienda cálcica, silícica y fuentes fosfóricas en características químicas y productividad de suelo ácido de selva. La aplicación de las enmiendas fue a una dosis de 0, 2, 4 y 6 t. ha⁻¹ en macetas con 3.5 kg de suelo, incubadas por un periodo de 45 días a capacidad de campo para luego sembrar maíz. Se empleó un diseño completo al azar con arreglo factorial 2P x 8E con dos y tres repeticiones para variables químicas del suelo y biométricas del cultivo de maíz, en el que se evaluó el pH, aluminio cambiante, calcio, magnesio y variables biométricas como longitud de raíz, peso de materia seca radicular, vástago y altura de planta. Los resultados en las características químicas indican que a una dosis de 6 t. ha⁻¹ de dolomita en el ST resultó con pH (5.15), aluminio, calcio intercambiable (0.17 y 2.34 cmol₍₊₎.kg⁻¹ respectivamente); el uso de silicato de magnesio en el ST a dosis de 6 t. ha⁻¹ resultó con pH (4.58), aluminio intercambiable (0.59 cmol₍₊₎.kg⁻¹) siendo los mejores resultados significativamente. A dosis de 6 t. ha⁻¹ de dolomita y silicato de magnesio produjo cambios significativos en el magnesio intercambiable (0.95 y 0.81 cmol₍₊₎.kg⁻¹ respectivamente). En las variables biométricas a dosis de 6 t. ha⁻¹ de dolomita en el ST resultó con longitud de raíces (27.60 cm) y peso de materia seca radicular (12.86 g), el uso de silicato de magnesio en el ST a dosis de 6 t. ha⁻¹ resultó con longitud de raíz (21.10 cm) y peso de materia seca radicular (10.30 g) siendo los mejores resultados significativamente.

Palabras clave: pH del suelo, dolomita, silicato de magnesio y suelos ácidos.

INTRODUCCIÓN

Los suelos ácidos ocupan aproximadamente el 30% o 3 950 millones de hectáreas del área terrestre libre de hielo del mundo (Alewell, 2003), estos suelos se han desarrollado donde la precipitación supera a la evapotranspiración pudiendo ser acelerado por ciertas plantas y actividades humanas o siendo retardados por prácticas cuidadosas. En los ecosistemas controlados, la acidificación del suelo se debe sobre todo a la emisión de protones durante los ciclos del carbono, el nitrógeno y el azufre, así como a procesos en los que intervienen fertilizantes nitrogenados. En tales circunstancias, la acidez del suelo tiene un impacto sustancial en la accesibilidad de los nutrientes para su absorción por las plantas e influye en la actividad microbiana. La baja disponibilidad del fósforo es una característica principal en suelos ácidos, debido a la reacción con óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio, resultando minerales de baja solubilidad (Havlin et al., 2017; Manahan, 2017). Además, la presencia de elementos catiónicos como el calcio, el magnesio y el potasio es limitada en estas zonas debido a la desbasificación del suelo causada por los altos niveles de precipitaciones. Los suelos con propiedades ácidas tienen niveles elevados de aluminio, hierro y manganeso, que pueden inducir efectos fitotóxicos, impidiendo así el crecimiento y desarrollo regulares de las plantas.

Los suelos del distrito de Pichari – La Convención – Cusco, se desarrollaron sobre un clima cálido característico de ceja de selva con una temperatura media que varía de 24 a 27 °C y una precipitación acumulada de 3,281 mm/año (Conislla, 2019), las cuales aceleran la velocidad de las reacciones en el suelo (hidrólisis principalmente), produciendo iones de hidrogeno y la desbasificación de los suelos dando resultado suelos ácidos en diferentes grados. La actividad frecuente es la tala, quema de los bosques primarios para la apertura de nuevas áreas agrícolas para cultivos de pan de llevar (maíz, frijol) acelerando de esta manera el proceso de acidificación en el suelo, debido a las actividades antrópicas realizadas (malas prácticas agrícolas como excesiva fertilización nitrogenada, extracción de cationes básicos por los cultivos, acidificación por la rizósfera,

etc.). De esta manera campaña tras campañas los cultivos reducen sus rendimientos y productividad, debido a las condiciones ácidas que presentan estos suelos (Fijación del fósforo por aluminio y hierro, la toxicidad por aluminio, hierro y manganeso).

La agricultura es la actividad económica más importante en el distrito de Pichari y en todo el ámbito del VRAEM, trayendo consigo aumento de nuevas áreas agrícolas conocida como agricultura migratoria, deforestando bosques primarios, acelerando de esta manera la degradación de los suelos, dentro de estas áreas se encuentra principalmente la degradación química como la acidificación de suelos como resultado de prácticas inadecuadas en el proceso productivo en la agricultura, teniendo como resultado la extracción de los diferentes elementos del suelo en la cosecha sin poder restituir elementos extraídos, conllevando a la pérdida de la fertilidad química del suelo y obteniendo bajos rendimientos en la producción y productividad de cultivos de pan de llevar (maíz y frejol). Por ello se pretende aplicar enmiendas cálcicas, silícicas con la finalidad de balancear las bases cambiables del suelo, incrementar el pH, precipitar o neutralizar total o parcialmente elementos tóxicos (aluminio y manganeso) y la liberación de iones fosfatos los cuales pueden ser absorbidos por las plantas incrementando la producción y productividad de los cultivos.

Según los resultados de varios estudios, uno de los métodos más utilizados para reducir la acidez del suelo es el uso de enmiendas inorgánicas. Éstas son capaces de mejorar la fertilidad química, cuando se aplican adecuadamente, dando como resultado importantes cambios químicos en el suelo, lo que, a su vez, tiene efectos ventajosos para el crecimiento y desarrollo óptimo de las plantas. La mayoría de los carbonatos, hidróxidos, óxidos y silicatos de calcio y/o magnesio que se utilizan están incluidos en las enmiendas inorgánicas. El calcio y el magnesio no son directamente responsables del efecto neutralizante de las enmiendas, los aniones relacionados con el calcio y el magnesio son los responsables de este efecto. Estos aniones incluyen CO_3^{2-} , OH^- y SiO_3^{2-} (Espinosa, 2001; Weil & Brady, 2017). Tomando en cuenta estas consideraciones el presente trabajo de investigación busca evaluar la aplicación de enmiendas cálcicas, silícicas (dolomita, silicato de magnesio) y fuentes fosfóricas (superfosfato triple de calcio y fosfato diamónico) en características químicas y productividad de suelo ácido de selva, ubicado en Pichari (Cusco) durante el periodo de diciembre 2021 a julio de 2022.

Objetivo general

Evaluar la enmienda cálcica, silícica y fuentes fosfóricas en características químicas y productividad de suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021.

Objetivos específicos

1. Evaluar la enmienda cálcica, silícica y fuentes fosfóricas en características químicas de suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021.
2. Evaluar la enmienda cálcica, silícica y fuentes fosfóricas en productividad de suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes

1.1.1. Nacionales

Rosas (2021) En su tesis "Efecto de la aplicación de dolomita y magnocal sobre la dinámica del suelo y el crecimiento vegetativo del cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) en Neshuya - Padre Abad - Ucayali", se propuso evaluar el impacto de tres dosis incrementales de dolomita y magnocal sobre la dinámica del suelo ácido degradado y el crecimiento vegetativo del cultivo de cacao en la región de Neshuya. El experimento reveló que la adición de 20 g de dolomita y 40 g de magnocal por planta producía una modificación del pH hasta 6.0. Además, la aplicación de fuentes de encalado provocó un notable aumento del contenido de fósforo disponible. En concreto, las dosis de 40 y 80 g de magnocal por planta demostraron efectos significativos, resultando en niveles de fósforo de 98.9 y 98.2 ppm, respectivamente. De forma similar, se observó una reducción significativa de la saturación de aluminio con la aplicación de 20 g de dolomita y 40 g de magnocal por planta, resultando en disminuciones del 0.0% y 1.3%, respectivamente. Por el contrario, el tratamiento con 80 g de magnocal por planta produjo el aumento más sustancial del contenido de materia orgánica (MO) del suelo. A excepción del calcio (Ca), las bases intercambiables magnesio (Mg) y potasio (K), junto con la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE), no mostraron fluctuaciones notables en sus concentraciones a la conclusión del experimento.

Espinoza (2019) en su tesis "Efecto de cuatro dosis de dolomita en las propiedades físicas y químicas del suelo en una plantación de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* pino chuncho, en CC. PP Antonio Raimondi – La Vegas, en el distrito Daniel Alomía Robes - Huánuco" en el contexto del sistema de plantación de *Schizolobium parahyba* var.-*amazonicum*; el objetivo de esta investigación fue observar cómo afectaba la presencia de dolomita a las características físicas y químicas del suelo ácido en las plantaciones de *Schizolobium parahyba* var.-*amazonicum* "Pino Chuncho", de cuatro

meses, localizado en jurisdicción de Antonio Raimondi - Las Vegas, donde mostró notables mejoras hacia la conclusión del ensayo, como lo demuestran un valor de pH de 4.91, un porcentaje de acidez intercambiable de 26.92% y un porcentaje de bases intercambiables de 73.08%.

Dávila (2019) en su trabajo de investigación “Uso de enmiendas en la reducción del contenido de cadmio en el suelo ácido y en los granos del cacao (*Teobroma cacao* L.) clon CCN – 51” teniendo como objetivo de este estudio evaluar el impacto del compost, la dolomita y el magnocal en las propiedades fisicoquímicas del suelo ácido mencionado. Las propiedades químicas mostraron diferencias estadísticas significativas, con los siguientes valores medios: pH (4.59), materia orgánica (2.98%), fósforo (9.98 ppm), potasio (65.80 ppm), calcio (2.10 meq/100 g), magnesio (1.12 meq/100 g), capacidad de intercambio catiónico (4.93 meq/100 g) y acidez intercambiable (1.36 meq/100 g). Cabe destacar que la acidez intercambiable disminuyó en comparación con el control.

Chung (2019) evaluó la acción de dolomita $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ y silicato de magnesio (MgSiO_3) como encalado, en combinación con fosfato diamónico y superfosfato triple para enmendar un suelo ácido de Tingo María, y mejorar la asimilación del fósforo en maíz (*Zea mays* L.). Esta investigación se basó en un enfoque cuantitativo de nivel experimental; con esquema completamente aleatorizado y organizado por factor de $2 \times 4 \times 2$ con tres repeticiones, donde se aplicó cuatro medidas de $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ y MgSiO_3 (0; 3,1; 6,2 y 12,4 m-equivalente/100 gramos de suelo) sobre el pH, la acidez y aluminio cambiante en suelo ácido; incubado al 80% de su volumen de campo por 45 días, para luego sembrar el maíz. Los parámetros observados fueron el pH (incubado y cosechado); la acidez y aluminio cambiante del suelo, y la captación de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio (foliar y radical). Concluyendo que el MgSiO_3 a razón de 12,4 m-equivalente/100gr de suelo incrementa el pH, disminuye la acidez y aluminio cambiante, favorece el desarrollo de la planta y la adsorción de nutrientes.

Asimismo, Hilario (2019) determinó la efectividad de fuentes y fracciones de silicio (Si) en la producción y presencia de “ojo de gallo” (*Stillbum flavidum* C.) en *Coffea arabica* (Catimor). Por lo cual, su investigación tuvo un enfoque cuantitativo, de nivel experimental, de campo y alcance correlacional; Con un esquema de bloques completamente aleatorizado de once tratamientos y cuatro replicas; utilizando tres tipos

de Si (Ceniza de cáscara de *Oryza sativa* L.; ortosilicato de calcio Ca_2SiO_4 y Silicato potásico $\text{K}_4(\text{SiO}_4)$ en diferentes proporciones (100, 200 y 400 ppm), cuyas variables evaluadas fueron la producción de café pergamino, atributos físicos y organolépticos del cultivo y el porcentaje de ojo de gallo en hojas y frutos. Obteniendo, que el tratamiento cinco Ca_2SiO_4 suministrado a suelo agrícola, en un grado de 200 ppm correspondiente 790 kilos por hectáreas y 237 gramos por planta, genera el mejor resultado en producción, beneficio-costos y baja presencia de la enfermedad.

Ricse (2018) en su investigación “Efecto de enmiendas en un suelo ácido con cultivo de *Phaseolus vulgaris* L., variedad norteña - Satipo” se realizó para investigar el impacto de la dolomita, el magnocal, la cal agrícola y el yeso agrícola sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas de un suelo ácido, así como sobre el rendimiento de *Phaseolus vulgaris* L. variedad norteña. Tras la aplicación de dolomita, los resultados mostraron una disminución del contenido de materia orgánica (de 1.90% a 1.64%), de la acidez intercambiable (de 0.48 a 0.34 meq/100g) y del porcentaje de saturación de aluminio (de 13.12 a 7.93%). Además, la aplicación de dolomita condujo a una mejora de la capacidad de intercambio catiónico (de 4.03 meq/100g a 4.66 meq/100g), de la disponibilidad de calcio (de 10.3 a 11.70 meq/100g), del magnesio intercambiable (de 1.67 meq/100g a 1.97 meq/100g) y de la actividad microbiana (de 3.81 mg CO_2 a 5.65 mg CO_2).

1.1.2. Internacionales

Chong et al. (2022) llevaron a cabo un estudio de incubación de un suelo ácido para determinar la cantidad óptima de silicato cálcico (Ca_2SiO_4) para mejorar el pH, la conductividad eléctrica (CE), el aluminio intercambiable, el fósforo disponible y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) de un suelo de arroz en Sabah, Malasia. Para ello se utilizó un suelo de la serie Kelawat incubado con Ca_2SiO_4 en dosis de 0: T_1 , 1: T_2 , 2: T_3 y 3: T_4 t. ha^{-1} , utilizando un diseño completamente aleatorizado por triplicado durante 30, 60, 90 y 120 días. El Ca_2SiO_4 utilizado, mejoró significativamente el pH del suelo, impidió la hidrólisis del aluminio en 57.4%, produciendo un aumento del fósforo disponible en 31.26% al 50.64%. Obteniendo como resultado, que la aplicación de Ca_2SiO_4 a 3 t. ha^{-1} mejoró la CIC del suelo hasta en un 54.84% en comparación con la de los suelos no tratados (T_1), debido al aumento del pH y del número de sitios cargados

negativamente. Estos resultados sugieren que puede mejorar la productividad del suelo y la eficiencia agronómica en el cultivo del arroz.

Cabrales y Acosta (2020). Estudiaron el efecto del encalado sobre las propiedades químicas del suelo y el desarrollo del cultivo de tomate en suelos de baja oferta nutricional y reacción ácida de la región de Santa Clara en Sucre, Colombia. Para esto, desarrollaron una investigación cuantitativa, de nivel experimental con un diseño aleatorizado de cinco dosis de cal comercial (0, 1, 2, 3 y 4 t. ha⁻¹) con tres repeticiones, procesando dicha información en la información con el software estadístico SAS versión 9.1; asimismo, determinaron su efecto sobre las propiedades químicas del suelo y en plantas de tomate. Dentro de los parámetros evaluaron el efecto sobre el pH, fósforo disponible, calcio intercambiable, magnesio intercambiable y potasio intercambiable en el suelo, mientras que en la planta se evaluaron el peso, dimensiones del fruto y rendimiento. Obteniendo como respuesta, que el encalado mejora el pH del suelo, fósforo disponible, calcio intercambiable, magnesio intercambiable y potasio intercambiable, de igual manera, el desarrollo y rendimiento del cultivo de tomate con dosis de hasta 3 t ha⁻¹ de cal en el suelo.

Machetti et al. (2019) en Argentina realizaron una investigación cuyo propósito fue valorar el efecto de varios rangos de encalados básicos en el pH, carbono orgánico total, fluidez del H₂O (Ib), densidad aparente (Da), resistencia a la penetración (RP), rendimiento (R) de soja y sus componentes. Para ello utilizaron 2 tipos de suelos un Argiudol con pH 5.66 y un Paleudol con pH 5.44; en un diseño de bloques al azar con tres replicas. Donde los rangos de aplicación de dolomita fueron 0 (T₁), 1 (T₂) y 4 (T₃) t. ha⁻¹ de a razón de 200 kg.ha⁻¹ de yeso. Para ello, fue sembrada soja por tres meses y al siguiente mes de sembrado se encaló. Los parámetros medidos fueron pH, COT, Ib, Da, RP, R y componentes. Concluyendo que para los suelos Argiudol y Paleudol, el tratamiento T₃ generó un incremento del pH, la Ib se elevó en ambos suelos, mientras que la Da bajo en el Argiudol y aumento los componentes de la planta en especial el rendimiento en un 45% en el Paleudol.

1.2. Acidez del suelo

1.2.1. Origen de la acidez

La acidificación es un proceso natural en la formación del suelo, encontrándose principalmente en zonas húmedas donde la precipitación es suficiente para lixiviar completamente el perfil del suelo (Weil & Brady, 2017). Siendo la característica principal el reemplazo progresivo de los cationes en superficies minerales expuestas por iones hidrogeno (Chesworth, 1992). En circunstancias naturales, el proceso de formación del suelo suele conducir a un entorno ácido. Esta acidez se atribuye principalmente a la composición del material parental, que carece de cationes no ácidos como el calcio (Ca^{2+}), el magnesio (Mg^{2+}), el potasio (K^{+}) y el sodio (Na^{+}). Además, el grado de acidez del suelo está influido por diversos factores como el clima, los organismos vivos y las actividades humanas que contribuyen al desarrollo del suelo. Durante el proceso de formación del suelo, los ácidos carbónico y orgánico desempeñan un papel crucial a la hora de facilitar la hidrólisis de los minerales del suelo. Este proceso de hidrólisis conduce a la eliminación de los cationes no ácidos de los sitios de intercambio, lo que permite su lixiviación del suelo. Los productos del desarrollo del suelo, como el aluminio y el hierro soluble, sufren reacciones de hidrólisis, lo que da lugar a la liberación de protones. Estas reacciones conducen a la formación de productos de hidrólisis como AlOH^{2+} y $\text{Al}(\text{OH})_2^{+}$, así como minerales accesorios como gibbsita y goethita. Además, el desplazamiento de cationes no ácidos en el complejo de intercambio por Al^{3+} , $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ y $\text{Al}(\text{OH})_2^{+}$, seguido de la lixiviación, contribuyen al desarrollo de la acidez del suelo (Essington, 2015). La materia orgánica del suelo se compone de grupos carboxílicos y fenólicos que presentan propiedades ligeramente ácidas al liberar iones de hidrógeno (Havlin et al., 2017; Weil & Brady, 2017). El uso prolongado de fertilizantes amoniacales es una fuente notable de acidez, que desempeña un papel clave en la absorción de cationes por las plantas y el agotamiento de los cationes no ácidos, lo que provoca un aumento de la acidez del suelo (Fassbender & Bornemisza, 1987; George et al., 2012). En la figura 1.1 Weil & Brady,(2017) nos muestra de manera esquemática el proceso de acidificación del suelo.

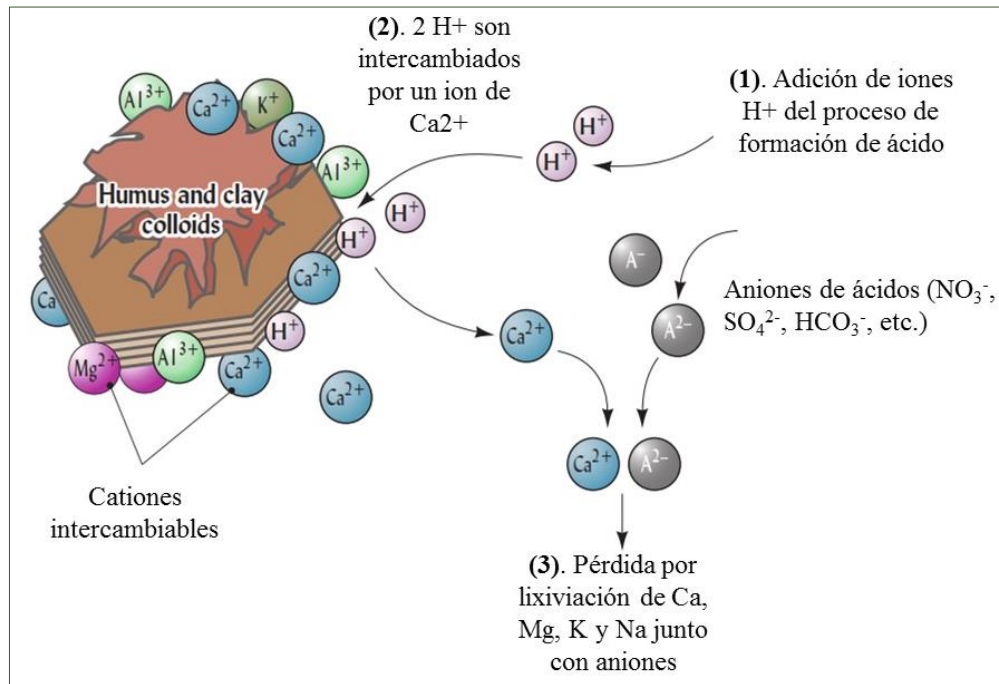
1.2.2. Fuentes de la acidez del suelo

Los procesos que generan acidez en los suelos pueden ser ampliamente agrupados en dos categorías: los que ocurren en ecosistemas naturales a través de las actividades industriales y aquellos que ocurren en ecosistemas manejados debido a actividades agrícolas (Blake, 2004). Estando en los ecosistemas manejados la acidificación del suelo

es principalmente ocasionada por producción y liberación iones hidrogeno durante la transformación y ciclo del carbono, nitrógeno, azufre y reacciones de fertilizantes, pudiendo tener efectos adversos cuando los suelos pierden su poder tampón resultando una mayor disminución del pH (Bolan et al., 2003).

Figura 1.1

Proceso de acidificación del suelo



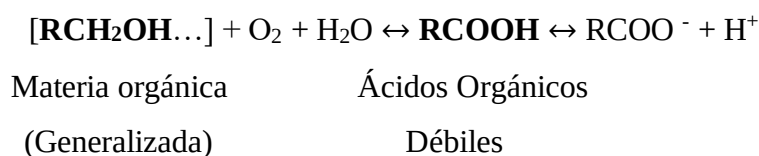
Fuente: Weil & Brady, (2017)

El agua proveniente de la precipitación está en equilibrio con el dióxido de carbono atmosférico siendo su pH de alrededor de 5.6 como resultado de:



Y en consecuencia la adición continua de este proceso contribuye de manera significativa a la acidez del suelo, pero en lugares donde existe contaminantes en la atmosfera como SO_2 , NH_3 , y varios gases NO_x como óxido nítrico (NO), dióxido de nitrógeno (NO_2) y oxido de nitroso (N_2O) hacen que el pH de la lluvia sea aún más bajo contribuyendo a la acidez del suelo; la lixiviación es una de los efectos más grandes en la formación de ácidos en el suelo como consecuencia de altas precipitaciones transportando por debajo de la zona de raíces cationes no ácidos reduciendo la saturación de bases y el pH del suelo (Havlin et al., 2017).

En el proceso de la descomposición de la materia orgánica como consecuencia de la actividad de los microorganismos del suelo aumenta la producción de dióxido de carbono en la atmosfera del suelo que reacciona rápidamente con el agua para producir el ácido carbónico y posterior disociación de iones hidrogeno, además los microorganismos del suelo producen ácidos orgánicos mediante:



El tipo de materia orgánica añadido influye en la cantidad de ácido añadido, siendo un bosque de coníferas los que producen más ácidos que los suelos bajo bosques caducifolios o pastizales, además la materia orgánica posee grupos carboxilos y fenólicos que se comportan como ácidos débiles (Havlin et al., 2017; Weil & Brady, 2017).

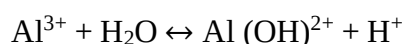
Las raíces de las plantas alteran el pH del suelo a través de desequilibrios en la absorción de cationes/aniones, por cada carga positiva absorbida como catión la raíz puede mantener el equilibrio de carga absorbiendo una carga negativa o exudando una carga positiva y/o ácidos orgánicos. Cuando se absorben mucho más ciertos cationes (NH_4^+ , Ca^{2+} , K^+) que aniones (NO_3^- , SO_4^{2-}), las plantas generalmente exudan iones hidrogeno a la solución del suelo para poder mantener equilibrio de carga (Weil & Brady, 2017). Cuando la absorción de aniones supera a los cationes las raíces exudan aniones como hidroxilo (OH^-) y bicarbonato (HCO_3^-) para mantener la neutralidad eléctrica (Havlin et al., 2017).

Un factor importante en la acidez del suelo es la práctica de aplicar fertilizantes de forma sistemática en ecosistemas que han sido utilizados para la producción agrícola. Las fuentes de los principales nutrientes como nitrógeno, fósforo y azufre poseen efectos sobre la acidificación del suelo por diversos procesos. En caso de los fertilizantes nitrogenados y azufrados, el proceso de acidificación es por la oxidación de los compuestos provenientes del fertilizante y caso de los fertilizantes fosforados es por la producción de ácidos fosfóricos los cuales en ambos casos son fuentes de producción y concentración de iones hidrogeno en el suelo y por lo tanto la disminución del pH del medio (Bolan et al., 2003).

Havlin et al. (2017) menciona que: “La disociación de hidrógenos de los bordes de los minerales arcillosos, los óxidos de aluminio, hierro y las superficies de materia orgánica del suelo contribuye a la acidez del suelo y a la amortiguación del pH. Los bordes de los minerales arcillosos como la caolinita (1:1) y la montmorillonita (2:1) pueden amortiguar el pH del suelo” (p.59).

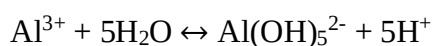
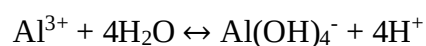
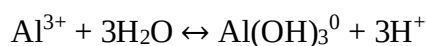
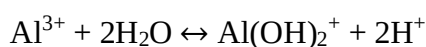
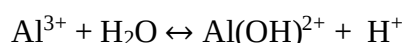
1.2.3. Hidrólisis del aluminio

Essington (2015), hace referencia que la hidrólisis implica la acción del agua y protones dando como resultado un cambio en la forma química de la sustancia, estando en sistemas naturales los iones de hidrógeno derivan del agua como resultado de la hidrólisis de aluminio y hierro producidos durante la meteorización. Por otro lado Fageria & Baligar (2008), se dice que la acidez de los suelos puede atribuirse a varios factores, siendo la causa principal la generación de iones de hidrógeno resultantes de la interacción entre los iones de aluminio y el agua. Esta reacción se describe de la siguiente manera:



El impacto del aluminio en la acidez del suelo surge de su interacción con las partículas de arcilla, principalmente a través del desplazamiento y liberación del aluminio estructural por los iones de hidrógeno. Este aluminio liberado es posteriormente adsorbido por el complejo de arcilla, dando lugar a la rápida formación de un complejo H-Al-arcilla. Además, el aluminio puede sufrir hidrólisis, dando lugar a la producción de iones de hidrógeno, lo que contribuye aún más a la concentración de iones de hidrógeno en los suelos (Tan, 2011). El aumento de la acidez del suelo genera la solubilización del aluminio siendo esta la fuente principal de toxicidad para las plantas a un pH menor a 5.5 (Bohn et al., 2001).

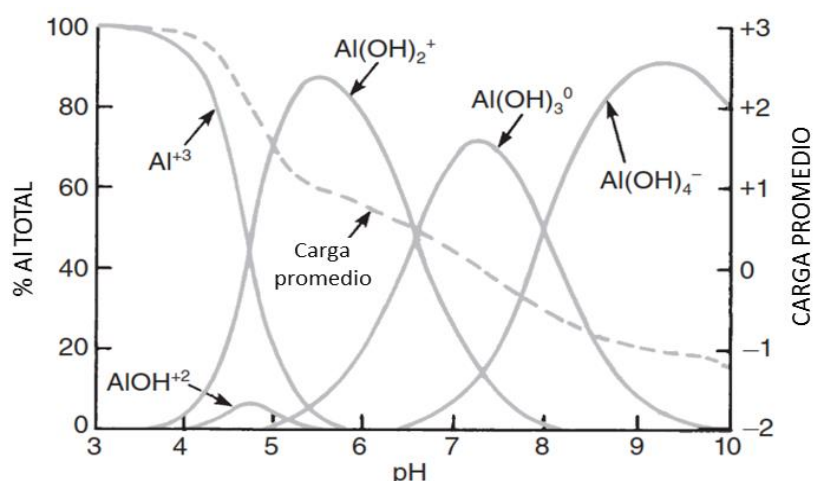
Fageria & Baligar, (2008) cita a Lindsay (1979), hace mención que las especies de iones de aluminio generan iones de hidrógeno a través de una serie de reacciones de hidrólisis que se muestran a continuación:



El aluminio intercambiable precipita como especie de hidroxilo de aluminio insoluble a medida que aumenta el pH y disminuye 1000 veces por cada unidad de aumento en el pH, como consecuencia de las reacciones sucesivas que se dan en solución como se observa en la figura 1.2. La especie $\text{Al}(\text{OH})_2^{2+}$ tiene poca importancia y sólo está presente en un intervalo restringido de valores de pH. El ion Al^{3+} es la especie dominante a niveles de pH inferiores a 4.7. Entre pH 4.7 y 6.5, prevalece la especie $\text{Al}(\text{OH})_2^+$. En el intervalo de pH de 6.5 a 8, se observa la especie $\text{Al}(\text{OH})_3^0$. Por encima de pH 8, la especie $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ se vuelve prominente. Cabe señalar que las especies $\text{Al}(\text{OH})_5^{2-}$ se detectan a niveles de pH superiores a los que suelen encontrarse en los suelos (Bohn et al., 2001). En la figura 1.2, se recoge la distribución porcentual y la carga promedio de las especies de aluminio soluble en función del pH.

Figura 1.2

Relación entre el pH, distribución porcentual y carga promedio de especies de aluminio (Al^{3+}) soluble



Fuente: Havlin et al. (2017)

Por lo tanto, la disminución del pH depende de la concentración de aluminio en solución, estando por debajo de 4.7 y por encima de 7.5 de pH, la concentración de aluminio en solución aumenta rápidamente, mientras en un rango de 4.7 a 7.5 la solubilidad del aluminio es baja estando precipitado como $\text{Al}(\text{OH})_3^0$ (Sparks, 2003).

1.2.4. Tipos de acidez del suelo

Según Porta et al. (2014) y Weil & Brady, (2017), existe tres tipos de acidez: la acidez activa, acidez cambiante o intercambiable y la acidez residual.

La acidez de un suelo se determina a partir de los iones hidrogeno en la solución del suelo; debido a que existe un amplio rango de iones hidrogeno en la solución del suelo, se utiliza una escala logarítmica para cuantificar la acidez (Bolan et al., 2003).

Por su parte Porta et al. (2014), define que el pH del suelo se determina tomando el logaritmo negativo de la actividad protónica en la fase líquida. Un valor de pH más bajo indica una mayor acidez o actividad de protones.

La acidez activa se refiere a la concentración de iones hidrogeno libre en la fase líquida del suelo, que refleja fielmente las condiciones experimentadas por las raíces de las plantas en la rizosfera. Es importante señalar que la acidez activa del suelo representa sólo una pequeña parte de la acidez intercambiable global (Weil & Brady, 2017).

La acidez cambiabile o intercambiable es una magnitud que expresa la proporción de la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) ocupada por iones hidrogeno y cationes ácidos principalmente el aluminio fácilmente intercambiables, que pueden ser desplazados por soluciones salinas neutras no tamponada como cloruro de potasio (KCl)(Porta et al., 2014).

La acidez residual esta asociado con iones de hidrogeno y aluminio incluido hidroxil aluminio que están unidos en formas no intercambiables por la materia orgánica y arcillas. La acidez residual es mucho mayor que la acidez activa o intercambiable, se dice que es 1000 veces mayor que la acidez activa en suelos arenosos y 50 000 o incluso 100 000 veces en suelo arcilloso alto en materia orgánica, (Weil & Brady, 2017).

1.2.5. Características de los suelos ácidos

Sánchez y Salinas (1981) citado por Chung (2019), señala que, “dentro de los factores ambientales del suelo, los ligados a la acidez, como el pH, la saturación de bases, la acidez potencial y la disponibilidad de nutrientes, son los que más interfieren en la productividad, especialmente en las regiones tropicales” (p. 9).

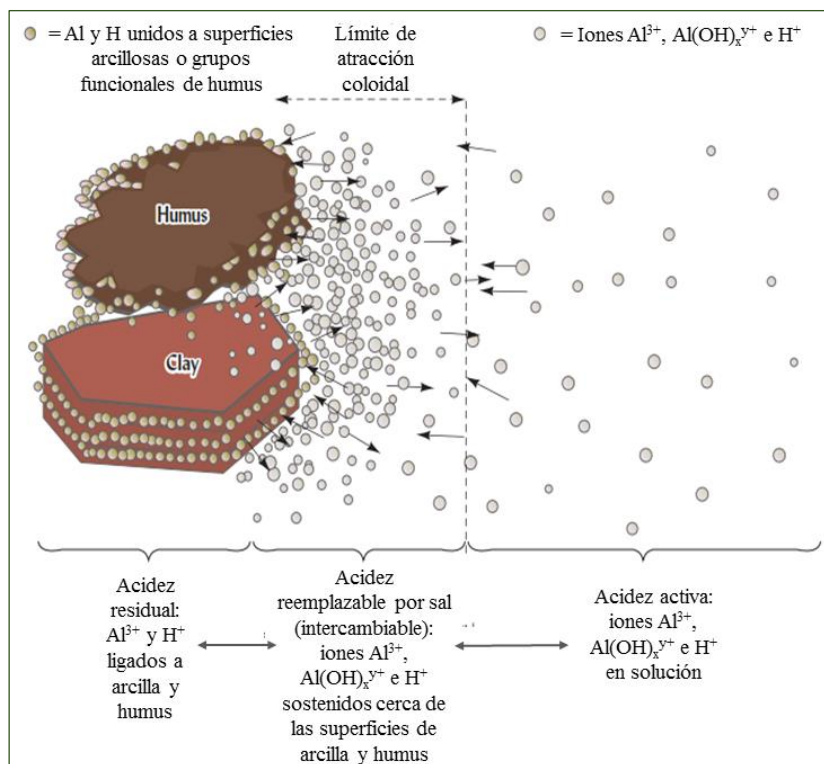
George et al. (2012) cita a Sánchez y Salinas (1981) haciendo referencia que más del 70% de los suelos de américa tropical poseen problemas de toxicidad por aluminio, deficiencias de calcio y magnesio y casi todos estos suelos son escasos en fósforo o tienen

problemas de fijación. De la misma manera George et al. (2012), los suelos minerales ácidos, las principales restricciones para el crecimiento y la producción agrícola son la toxicidad causada por iones de hidrogeno, aluminio y manganeso y la escasez de calcio, magnesio, fósforo y molibdeno; siendo de importancia relativa a estas restricciones la especie y el genotipo de la planta, el tipo de suelo y el horizonte, el material original, pH del suelo, concentración y especies de aluminio, estructura y aireación del suelo y clima.

El problema más común y grave se acostumbra relacionar con suelos ácidos es la toxicidad causada por el aluminio, en donde no solo las plantas son afectados, sino también muchas bacterias que realizan transformaciones de la materia orgánica en el suelo, (Chen et al., 2013; Weil & Brady, 2017). La toxicidad del aluminio depende de la especiación del mismo en solución, donde el aluminio liberado de minerales del suelo a la solución con pH menor de 4 es principalmente $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ (referido como Al^{3+}), a medida que aumenta el pH la concentración de aluminio disminuye, pero productos de hidrólisis como $\text{Al}(\text{OH})_2^{2+}$ y $\text{Al}(\text{OH})_3^0$ se forman como productos intermedios en la precipitación de $\text{Al}(\text{OH})_3^0$ (George et al., 2012).

Figura 1.3

Relaciones de equilibrio entre la acidez residual, la sal reemplazable (intercambiable) y la solución del suelo (activa) en un suelo con coloides orgánicos y minerales

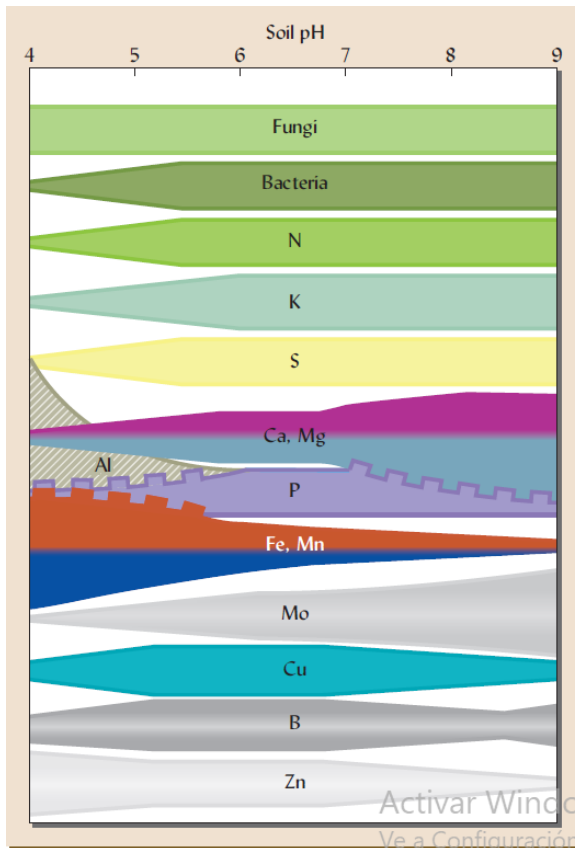


Fuente: Weil & Brady, (2017).

Tener en cuenta que los suelos con pH muy bajos, la disponibilidad de macronutrientes como Ca, Mg, K, P, N y S, como también los micronutrientes como el B y Mo es restringida, por otro lado los cationes metálicos como Fe, Zn, Mn, Cu y Co aumenta conforme disminuye el pH del suelo hasta niveles donde pueden llegar a ser tóxicos para las plantas (Weil & Brady, 2017).

Figura 1.4

Relaciones existentes en suelos minerales entre pH y disponibilidad de nutrientes para las plantas



Fuente: Weil & Brady, (2017).

1.3. Encalado

1.3.1. Fundamento

La producción agrícola moderna requiere la implementación de prácticas de gestión eficientes, sostenibles y ambientalmente racionales, en este contexto, el encalado es una práctica importante para lograr los rendimientos óptimos en suelos ácidos, siendo el encalado el método a largo plazo más utilizado para mejorar la acidez del suelo y su éxito en los resultados están bien documentados (Fageria & Nascente, 2014; Pagani & Mallarino, 2012).

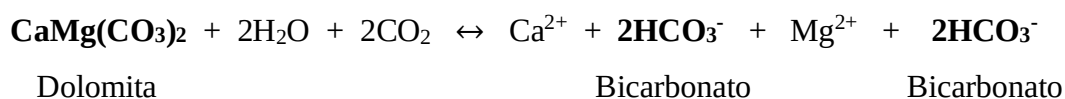
Olego et al. (2016), informa que:

El encalado es el método más utilizado por los agricultores para mejorar la fertilidad de suelos ácidos porque: (i) disminuye el contenido de aluminio intercambiable al reemplazarlo con calcio y magnesio; (ii) disminuye los contenidos de aluminio soluble por precipitación con los aniones hidroxilo generados por hidrólisis de carbonato en la solución del suelo y (iii) aumenta el pH característico de los suelos ácidos debido a dicha hidrólisis (p. 2).

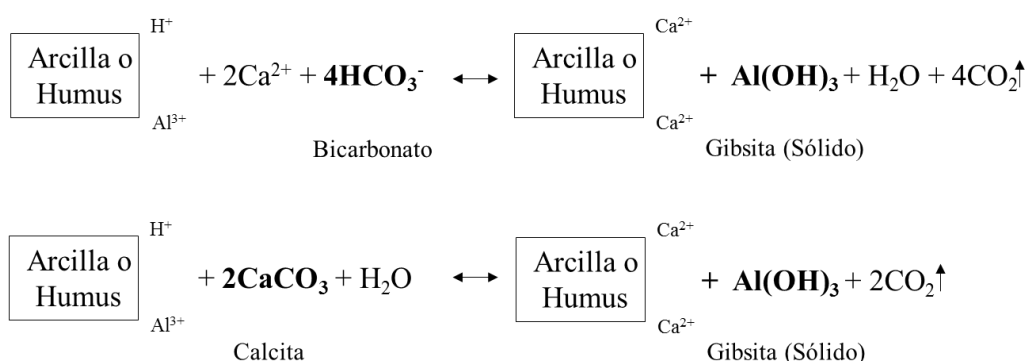
La mejora química del suelo a través del encalado tiene como propósito principal disminuir los problemas relacionados con la acidez del suelo como altas concentraciones de iones ácidos (Al^{3+} y H^+) y elementos tóxicos (Mn^{2+}) y bajas concentraciones de cationes básicos (Ca^{2+} y Mg^{2+}). La hidrólisis de los cationes proporciona aniones como carbonato (CO_3^{2-}), hidróxido (OH^-) y silicato (SiO_3^{2-}), los cuales pueden consumir iones hidrogeno en la solución del suelo para formar ácidos débiles como el agua y dióxido de carbono (Bolan et al., 2003; Weil & Brady, 2017). El aluminio intercambiable se desprende del complejo de cambio a medida que aumenta cationes básicos (Ca^{2+} y Mg^{2+}) a partir de las fuentes de cal que se disuelve, estando en solución el aluminio se hidroliza para formar más hidrógenos que será neutralizado por carbonato (CO_3^{2-}), hidróxido (OH^-) y silicato (SiO_3^{2-}), donde la remoción constante del hidrogeno de la solución del suelo finalmente resultara en la precipitación del aluminio como $\text{Al}(\text{OH})_3^0$ (Havlin et al., 2017).

Fageria & Baligar (2008), menciona que la humedad del suelo, temperatura del suelo, cantidad y calidad del material calcáreo determina la velocidad de reacción de la cal, por lo tanto, para obtener el máximo beneficio y mejorar los rendimientos de los cultivos los materiales deben aplicarse en avance de la siembra de cultivos y mezclados completamente en el suelo para su mejorar su reacción con el intercambio de la acidez del suelo. Un adecuado encalado elimina la acidez del suelo y la toxicidad de Al, Mn y H; mejora el pH y la disponibilidad de Ca, Mg, P, Mo y la fijación del nitrógeno; de otro lado disminuye la disponibilidad de Mn, Zn, Cu, Fe y la pérdida por lixiviación de cationes, además de mejorar la estructura del suelo también mejora la aireación (Bolan et al., 2003). Sin embargo, un encalado excesivo puede disminuir drásticamente el contenido en el suelo de micronutrientes como el Fe, Mn, Zn y B provocando deficiencias en los cultivos (Fageria & Baligar, 2008).

Tener en cuenta que la presión parcial de dióxido de carbono en el suelo, por lo general es mucho mayor que la del aire atmosférico, dando como resultado la siguiente reacción:



Los bicarbonatos formados son mucho más solubles que el carbonato, siendo bastante reactivo con la acidez intercambiable y residual del suelo, además el Ca^{2+} y Mg^{2+} reemplaza al Al^{3+} y H^{+} en el complejo coloidal como sigue:



La insolubilidad del $\text{Al}(\text{OH})_3^0$, la débil disociación del agua y la liberación de CO_2 a la atmósfera resulta como producto de las reacciones anteriores, paralelamente la adsorción del Ca^{2+} y Mg^{2+} reduce la saturación de iones ácidos (Al^{3+} y H^+) del complejo coloidal, aumentando el pH de la solución del suelo.

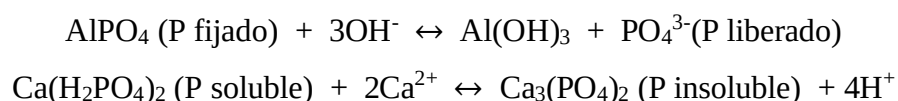


Los silicatos se pueden utilizar como material de encalado que no contienen carbono por lo tanto no liberan CO₂ a la atmosfera cuando reaccionan con suelos ácidos, siendo los silicatos de calcio y magnesio los más utilizados, éstos al ser utilizados reaccionan aumentando el pH al consumir iones H⁺ y reemplazan cationes ácidos por Ca²⁺ y Mg²⁺ en el complejo de cambio (Weil & Brady, 2017).

Clark (1984) y Marschner (1995), citado por Fageria & Baligar en (2008), la utilización de piedra caliza y cal dolomítica aumenta la presencia de calcio y de calcio y magnesio intercambiable en el suelo, respectivamente. En consecuencia, esto se traduce

en una mejora del crecimiento de las plantas en suelos ácidos. Esta mejora no se debe únicamente a la introducción de cationes básicos (Ca^{2+} y Mg^{2+}), sino que tiene su origen en la elevación de los niveles de pH. El aumento del pH mitiga eficazmente la toxicidad del aluminio y el manganeso en concentraciones fitotóxicas.

Estudios previos evidencian la liberación del fósforo fijado cuando se encalan en suelos ácidos. Edmeades & Perrott, (2004), comenta una investigación realizada en Nueva Zelanda sobre suelos ácidos, en la que se destaca la principal ventaja del encalado para aumentar la disponibilidad de fósforo. Esto se consigue mediante la reducción de la adsorción de fosfato y la promoción de la mineralización del fósforo orgánico. Fageria (1984) citado por Fageria & Baligar (2008) en donde discute la relación entre la disponibilidad de fósforo y los niveles de pH dentro del rango de 5 a 6.5. Este aumento de la disponibilidad se atribuye a la presencia de iones de fósforo libres resultantes de la fijación de óxidos de hierro y aluminio a niveles bajos de pH. De la misma forma Naidu et al, (1990) citado también por Fageria & Baligar (2008), se observó que cuando el nivel de pH supera 6,5, se produce una disminución de la cantidad de fósforo extraíble. Esta disminución puede atribuirse a la formación de precipitados de fosfato de calcio. Del mismo modo, el aumento del fósforo extraíble en el intervalo de pH de 5 a 6.5, así como la liberación de este elemento, pueden explicarse por un mecanismo diferente. La reducción de los niveles de pH por encima de 6.5 puede dilucidarse mediante la siguiente expresión:



Una mejora inducida por el encalado en el crecimiento de las plantas en suelos ácidos fue aumentar la disponibilidad de fósforo, asimismo en estos suelos, el alto contenido de aluminio cambiante y soluble la aplicación de cal puede aumentar la absorción de fósforo por las plantas al disminuir el aluminio en lugar de propiciar su disponibilidad del fósforo (Bolan et al., 2003). Estos resultados pueden deberse a un mejor crecimiento de las raíces en donde se disminuye la toxicidad por aluminio las raíces se desarrollan y exploran un mayor volumen de suelo, de Friesen et al. (1980) citado por Bolan et al. (2003).

1.3.2. *Materiales encalantes*

Existe una variedad disponible de materiales de encalado agrícola, siendo unas más eficientes que otras en la neutralización de la acidez del suelo, que con el adicionamiento de estos materiales alcalinos proporcionan bases conjugadas de ácidos débiles como carbonato (CO_3^{2-}), hidróxido (OH^-) y silicatos (SiO_3^{2-}), estas bases conjugadas pueden reaccionar con iones hidrogeno para la formación de ácidos débiles como el agua. En el tabla 1.1 se puede observar materiales de encalado comunes su uso y composición (Weil & Brady, 2017).

Tabla 1.1

Materiales comunes de encalado

Nombre común del material de encalado	Fórmula química (de materiales puros)	% CaCO_3 equivalente *	Comentarios sobre la fabricación y el uso
Caliza calcítica	CaCO_3	100	Roca natural molida hasta obtener un polvo fino. Baja solubilidad; se puede almacenar al aire libre sin tapar. No cáustico de reacción lenta.
Caliza dolomítica	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	95 – 108	Roca natural molida hasta obtener un polvo fino; de reacción algo más lenta que la caliza calcítica. Suministra Ca y Mg a las plantas.
Cal quemada (Oxido de cal)	CaO (+ MgO si está hecho de piedra caliza dolomítica).	178	Cáustico, difícil de manejar, de acción rápida, puede quemar el follaje, costoso. Realizado calentando piedra caliza. Proteger de la humedad.
Cal hidratada (hidróxido de cal)	$\text{Ca}(\text{OH})_2$ [+ $\text{Mg}(\text{OH})_2$] si está hecho de piedra caliza dolomítica.]	134	Cáustico y difícil de manejar. De acción rápida, puede quemar el follaje, caro. Se obtiene apagando CaO caliente con agua. Proteger de la humedad.
Escoria básica	CaSiO_3	40 – 90	Subproducto de la industria del arrabio (fundición del hierro). Debe estar finamente molido. También contiene 1–7% de P.
Marga	CaCO_3	40 – 70	Por lo general, se extrae de lechos costeros poco profundos, se seca y se muele antes de su uso. Se puede mezclar con tierra o turba.
Cenizas de madera	CaO , MgO , K_2O , $\text{K}(\text{OH})$, etc.	40 – 80	Cáustico, de acción rápida, soluble en agua, por lo que debe mantenerse seco durante el almacenamiento.
Varios subproductos que contienen de cal	Generalmente CaCO_3 con varias impurezas	20 - 100	Composición variable; prueba de impurezas tóxicas.

* Expresado como porcentaje en peso de CaCO_3 . Fuente: Extraído de Weil & Brady (2017)

La capacidad de neutralizar la acidez del suelo a través de materiales encalantes está expresado en términos de carbonato de calcio equivalente (CCE), expresada como el porcentaje en peso de CaCO_3 puro, siendo 100 una mayor eficiencia del material en relación con el CaCO_3 puro, además tener en cuenta la cantidad de material calcáreo para la corrección de la acidez del suelo, depende del valor de neutralización del material calcáreo y de la capacidad amortiguadora del pH del suelo (Bolan et al., 2003).

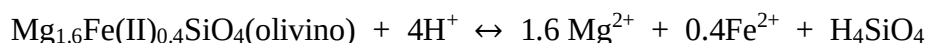
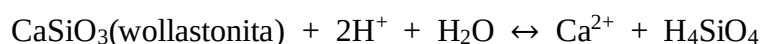
Los subproductos de las industrias de acero conocidas como escoria compuestas por silicatos de calcio y magnesio, llegando a ser una excelente alternativa para mejorar las características químicas, un suelo ácido por efecto del encalado en la superficie del suelo debido a una mayor solubilidad y de alcalinidad con respecto a las demás fuentes encalantes (Peregrina et al., 2008; Yi et al., 2012).

La piedra caliza dolomítica contiene carbonato doble de calcio y magnesio con al menos 15% de carbonato de magnesio obteniendo así carbonato de calcio equivalente (CCE) de hasta 108 (Weil & Brady, 2017) y 109 (Havlin et al., 2017), además posee una solubilidad 100 veces más bajo que la calcita (Loeppert & Sparks, 1996).

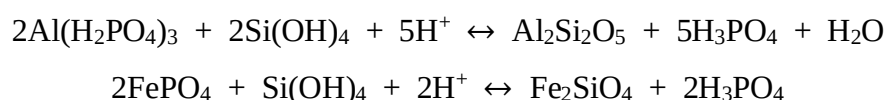
1.3.3. El efecto del silicio en la reacción del suelo

Las diversas interacciones que muestran los silicatos tienen el potencial de mejorar las propiedades químicas de los suelos agrícolas. Esto se atribuye a su capacidad para consumir protones dentro de la solución del suelo, elevando así los niveles de pH. En consecuencia, esta elevación del pH tiene un impacto beneficioso sobre la disponibilidad de nutrientes, lo que se traduce en una mejora del rendimiento de los cultivos. Basándose en lo anterior, varias investigaciones abogan por el uso de silicatos como enmienda para mejorar la productividad agrícola (Álvarez & Osorio, 2014; Camargo et al., 2007; Matichenkov, 2008; Peregrina et al., 2008).

Lindsay (1979) citado por Álvarez & Osorio, (2014), presenta las siguientes reacciones y cómo actúa los silicatos en la corrección de la acidez de los suelos.



El principal efecto de la utilización de enmiendas de silicato es la mejora de la disponibilidad de fósforo en el suelo. Esto se atribuye a la interacción competitiva entre el ion fosfato (H_2PO_4^-) y el ácido monosilícico (H_4SiO_4) por los sitios de adsorción en las superficies arcillosas, así como en los óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio. En consecuencia, el ion fosfato puede ser desplazado por el ácido silícico (Álvarez & Osorio, 2014; Bolan et al., 2003). Tras la liberación del anión fosfato en la solución del suelo, las plantas tienen la capacidad de absorberlo, Matichenkov (2008) lo que puede representarse mediante un conjunto de ecuaciones:



El ácido monosilícico (H_4SiO_4) posee una alta actividad química (Matichenkov, 2008), teniendo la capacidad de reaccionar con aluminio, hierro y manganeso libres que se hallan en la solución del suelo formando silicatos de baja solubilidad, de la misma forma reacciona con los metales pesados presentes en la solución del suelo (Snyder et al., 2007).

La presencia de una correlación positiva entre la utilización de enmiendas silícicas y la accesibilidad del fósforo en la solución del suelo sugiere la importancia de las enmiendas silícicas en condiciones de suelos ácidos. Esto subraya la importancia de utilizar escorias básicas como el silicato cálcico (CaSiO_3) y el silicato magnésico (MgSiO_3) en las prácticas agrícolas, ya que contribuyen a mejorar el pH del suelo y la asimilación del fósforo (Navarro & Navarro, 2013).

1.4. Fósforo

1.4.1. El fósforo en el suelo

El fósforo total en los suelos superficiales varía de 0.005 a 0.15% y disminuye con el aumento de la intensidad de la meteorización, en tal sentido el fósforo total del suelo es mucho menor en los suelos de zonas tropicales y húmedas en comparación con los suelos de regiones semiáridas y áridas, pero desafortunadamente el fósforo total del suelo tiene poca importancia con la disponibilidad de fósforo para las plantas (Havlin et al., 2017).

Existe tres fracciones de fósforo en el suelo, siendo estas: el fósforo en la solución, fósforo lábil y no lábil u ocluido (Figura 1.5), estando el fósforo en solución una cantidad mínima (Mengel et al., 2001), la concentración del fósforo en la solución del suelo varía ampliamente entre suelos desde 10^{-7} (muy bajo) a 10^{-4} M (muy alto) o 0.003 – 3 ppm P (promedio 0.05 ppm) (Havlin et al., 2017), donde se encuentra bajo la forma de ortofosfato primario (H_2PO_4^-) y secundario (HPO_4^{2-}) las cuales pueden ser absorbidas por las plantas, la predominancia del tipo de ion fosfato depende del pH, siendo el ortofosfato primario con mayor predominancia en suelos ácido y de manera contraria el ortofosfato secundario predomina en suelos básicos, los dos tipos de fosfatos están en equilibrio a un pH neutro (Navarro & Navarro, 2013). El descenso del pH del suelo se asocia a un aumento de la concentración de hierro y aluminio en la solución del suelo, lo que puede dar lugar a la adsorción o precipitación de fosfato. El proceso de adsorción del fosforo en suelos ácidos se asocia a menudo con la presencia de óxidos hidratados de hierro y aluminio, así como con la capa 1:1 de arcillas. Este fenómeno es especialmente frecuente en suelos tropicales caracterizados por bajos niveles de pH (Sanyal & De Datta, 1991). Bajo estas situaciones de elevada acidez, los oxihidróxidos de hierro y aluminio supera de forma notable al fosfato y reaccionan quedando solo cantidades ínfimas (Navarro & Navarro, 2013).

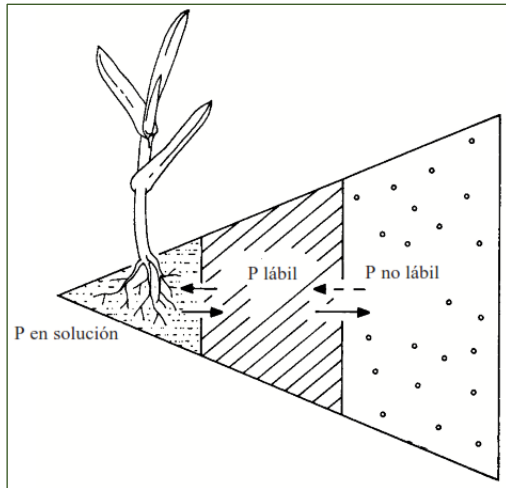
La fijación del fósforo se refiere al proceso mediante el cual las formas solubles de fósforo experimentan una reacción química con el suelo, dando lugar a su conversión en formas menos solubles (Braga, 2006), en el contexto de los suelos ácidos muy desgastados, se han postulado dos procesos para la retención del fósforo, a saber, la adsorción y la precipitación (Hsu, 1965). La fijación es el mecanismo de adsorción a través de atracciones electrostáticas o enlaces covalentes, mientras que la precipitación es la formación de compuestos insolubles, los cuales no pueden ser absorbidos por las planta (Navarro & Navarro, 2013).

La precipitación es la reacción entre iones en la solución del suelo con la formación de compuestos definidos, siendo las reacciones de aniones de fósforo y cationes de aluminio y hierro en suelos ácidos o calcio en suelo básicos (Hsu, 1965). Los minerales de óxido e hidróxidos de hierro y aluminio en suelos ácidos están directamente relacionados en la adsorción de fósforo inorgánico, en las mismas condiciones de un suelo ácido los minerales desarrollan carga neta positiva al cual se adsorbe el fósforo (Havlin

et al., 2017). La toxicidad de aluminio inhibe la absorción del fósforo y la translocación por la planta, siendo el encalado el que aumenta la absorción de fósforo por las plantas al disminuir la toxicidad del aluminio que por la disponibilidad de fósforo (Haynes, 1982).

Figura 1.5

Representación de las fracciones de fósforo en el suelo para la nutrición de la planta

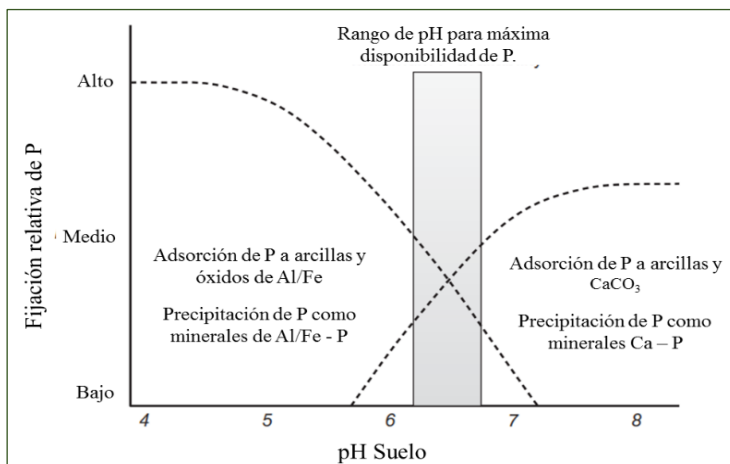


Fuente: Mengel & Kirkby (2001)

La máxima precipitación del fósforo con hidróxidos de hierro y aluminio se dan a pH entre 3 y 5, pero al aumentar el pH a 5.5 esta precipitación se debilita y se anula, a partir del cual empieza la precipitación con el calcio llegando a alcanzar un máximo a pH de 8 y 9, siendo estas dos precipitaciones químicas extremas, por lo tanto a un pH de 6.5 la precipitación con el fosfato de calcio existe, pero es mínima por lo tanto este valor de pH puede considerarse como punto máximo disponibilidad de fósforo para los cultivos (Figura 1.6) (Navarro & Navarro, 2013).

Figura 1.6

Efecto relativo del pH del suelo sobre la adsorción y precipitación de fósforo



Fuente: (Havlin et al., 2017).

1.4.2. Fuentes de fósforo y su influencia en el pH del suelo

El fósforo existe como parte de la estructura de una variedad de minerales del suelo, como fluorapatita ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$) o hidroxiapatita ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$). Las formas minerales inorgánicas en el suelo no se encuentran en proporciones típicas, pero si tienden a ser combinaciones de fósforo adsorbido/precipitado en óxidos amorfos de hierro, aluminio, óxidos hidratados y carbonatos de calcio (Hopking, 2015).

La fracción orgánica es también una reserva importante de fósforo sólido en los suelos, estando predominantemente como fosfolípidos (~1%), ácidos nucleicos (5-10%) fácilmente degradables junto con los polifosfatos de inositol más estables (hasta 60%), que forman parte de la fracción humus de los suelos, también existe otros muchos compuestos orgánicos de fósforo que forman parte de organismos vivos y sus productos degradación, siendo muchos de ellos compuestos no identificados (Hopking, 2015).

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

2.1. Unidad de muestreo

La unidad de muestreo de la presente tesis es un suelo agrícola que pertenece a la comunidad de Quisto Valle del Centro Poblado de Quisto Central, distrito de Pichari, provincia La Convención, región Cusco. Las coordenadas en UTM corresponden a 619611 m E y 8632454 m N zona 18 sur, con una altitud de 548 m s.n.m (Anexo 1).

Este suelo se encuentra degradado, es decir, el suelo fue utilizado de manera intensiva en la producción de la hoja de coca (*Erythroxylum coca*); posterior a ello, este suelo no fue utilizado para ningún tipo de cultivo en los últimos cinco años, encontrándose actualmente con bosque secundario (Figura 2.1). Asimismo, esta unidad de suelo se encuentra ubicado a nivel de sub paisaje en una ladera de montaña, de clima cálido característico de ceja de selva con una temperatura media anual que varía de 24 a 27 °C y una precipitación acumulada de 3281 mm/año (Conislla, 2019).

2.1.1. Muestreo de suelos

La muestra de suelo utilizada en el presente experimento fue un suelo ácido colectado de 0 a 20 cm de profundidad. Dentro de una hectárea de suelo indicado anteriormente, se colectaron 50 sub-muestras de suelo de 3.5kg c/u, cada punto de muestreo estuvo separado aproximadamente 12 m (Figura 2.2).

Para el muestreo del suelo se utilizó cinco costales de polipropileno (50 kg de capacidad). Cada costal sirvió para colectar diez puntos de sub muestras de suelo, por tanto, cada costal contenía 35 kg de suelo. Luego de obtener todas las sub-muestras en los cinco costales, dichas sub-muestras fueron mezclado a campo abierto, previamente colocado una bolsa de plástico (a fin de evitar mezclar con otro suelo) y nuevamente vertido en los cinco costales.

Figura 2.1

Vista panorámica del área de muestreo de la comunidad de Quisto Valle del Centro Poblado de Quisto Central, distrito de Pichari, provincia La Convención, región Cusco



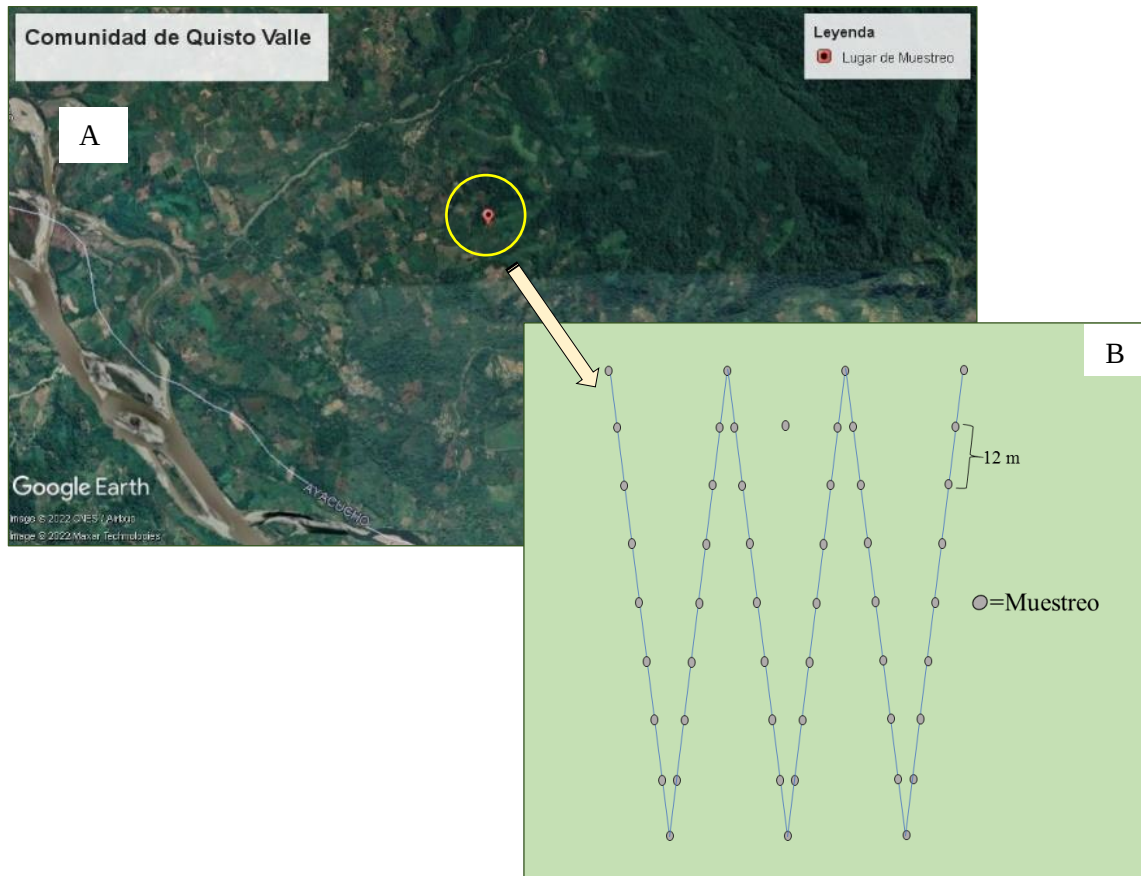
Finalmente, los cinco costales, previamente empacados y rotulados, fueron trasladados por vía terrestre dentro de 24 h hacia el invernadero del área de Suelos del Programa de Investigación en Pastos y Ganadería de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, ubicado en el distrito de Ayacucho, provincia de Huamanga, región de Ayacucho. Las coordenadas en UTM corresponden a 584508 m E y 8545567 m N zona 18 sur, con una altitud de 2758 m s.n.m. (Anexo 2).

2.1.2. Caracterización de la muestra de suelo

Las diversas propiedades físicas y químicas se determinaron de acuerdo a los métodos empleados por el laboratorio de Análisis de Suelo y Análisis Foliar Nicolás Roulet, del Programa de Investigación en Pastos y Ganadería, de la Facultad de Ciencias Agrarias, de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.

Figura 2.2

Muestreo de suelo en área de cultivo con plantas de coca (*Erythroxylum coca*). Vista satelital del lugar de muestreo del suelo (A). Esquema de la forma de recolección de la muestra de suelos en una hectárea (B)



- La determinación del pH fue por el método potenciómetro de la suspensión suelo: agua de una relación 1:2.5 (suelo: agua).
- La conductividad eléctrica (CE) fue medida del extracto acuoso en la relación suelo: agua 1:1.
- La textura fue determinada por el hidrómetro de Bouyoucos.
- La materia orgánica del suelo fue determinada por el método de Walkley y Black por oxidación del carbono con dicromato de potasio ($\%MO = \%C \times 1.724$).
- El fósforo disponible fue determinado el método de Olsen modificado, extracción con bicarbonato de sodio ($NaHCO_3$ 0.5 N, pH = 8.5).
- El potasio disponible fue determinado mediante la extracción con acetato de amonio (CH_3COONH_4 1N).

- La capacidad de intercambio catiónico (CIC) fue determinada por la saturación de acetato de amonio ($\text{NH}_4 \text{OAc}$, 1 N, pH = 7), titulado con formaldehído.
- Los cationes de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+ cambiabiles fueron determinados por el desplazamiento con acetato de amonio ($\text{NH}_4 \text{OAc}$ 1 N, pH = 7), cuantificado por complexometría EDTA.
- La acidez cambiabie (Al^{3+} y H^+) determinado por el método de Yuan extraídos con KCl 1 N.

Los resultados del análisis se resumen en la tabla 2.1.

El suelo corresponde a una clase textural franco arenosa, con un contenido de arcilla de 12.9%, el pH es muy fuertemente ácido (4.86), bajo contenido de materia orgánica (1.36%), contenido medio de P disponible (12.4 ppm), contenido medio de potasio (147.2 ppm), el contenido de la CIC es moderado ($10.8 \text{ cmol}_{(+)}.\text{kg}^{-1}$), el porcentaje de acidez cambiabie es de 43.61% y el porcentaje de saturación de bases es de 56.39%.

Tabla 2.1

Resultados del análisis de caracterización del suelo de Quisto Valle

Características		Valor	Interpretación
Arena		76.2	Clase textural
Limo		10.9	Franco
Arcilla		12.9	Arenoso
pH (H_2O , 1:2.5)	(---)	4.86	Muy fuertemente ácido
C.E. (1:1)	($\text{dS}.\text{m}^{-1}$)	0.14	No salino
CaCO_3	(%)	0.0	No calcáreo
M.O.	(%)	1.36	Bajo
Fósforo disponible	ppm	12.4	Medio
Potasio disponible	ppm	147.2	Medio
CIC	($\text{cmol}_{(+)}.\text{kg}^{-1}$)	10.8	Moderado
Ca^{2+}	”	0.48	
Mg^{2+}	”	0.40	
K^+	”	0.75	
Na^+	”	0.18	
Al^{3+}	”	1.30	
H^+	”	0.10	
$\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$	”	1.40	
PSB	%	56.39	
PAC	%	43.61	

Fuente: Laboratorio de suelos y análisis foliar – UNSCH (acondicionado).

2.2. Fuentes fosfóricas

2.2.1. Superfosfato triple de calcio (ST) [$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$]

También conocido como fosfato monocálcico, posee un contenido alto de fósforo (46% P_2O_5 , 13% Ca), con una solubilidad mayor a 90%. La presentación viene en sacos de polipropileno de 50 kg. En adelante se considera súper fosfato triple como ST.

2.2.2. Fosfato diamónico (FDA) [$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$]:

Posee un contenido alto de fósforo (18%N, 46% P_2O_5), con una solubilidad mayor a 50%. La presentación viene en sacos de polipropileno de 50 kg. En adelante fosfato diamónico se considera como FDA (Figura 2.3).

2.3. Enmiendas

2.3.1. Dolomita [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$]

Utilizado como enmienda de calcio y magnesio “Dolomita nube” llamado comercialmente (CaO: 33.05%, MgO: 19.37%), el cual se adquirió de la empresa INSUMEX S. A. La presentación es sólida, los cuales fueron tamizados a través de una malla de 400 Mesh (Figura 2.3).

2.3.2. Silicato de magnesio (MgSiO_3)

Utilizado como enmienda silícica “Insumag Act – 400” llamado comercialmente (SiO_2 : 33.10%, MgO: 35.9%), el cual se adquirió de la empresa INSUMEX S. A. La presentación es sólida, los cuales fueron tamizados a través de una malla de 400 Mesh.

Figura 2.3

Fuentes fosfóricas y enmienda: Superfosfato triple de calcio(A), Fosfato diamónico (B), Silicato de magnesio (C) y Dolomita (D)



2.4. Factores y tratamientos

2.4.1. Factores

Se aplicaron factores cualitativos de fósforo (ST y FDA) y factores de enmiendas cuantitativos a cuatro dosis de dolomita y silicato de magnesio (0, 2, 4 y 6 t. ha⁻¹).

Tabla 2.2

Fuentes y dosis del diseño experimental

Fuentes fosfóricas	Enmienda cálcica y silícica
- Superfosfato triple de calcio (ST).	- Dolomita a 0, 2, 4 y 6 t. ha ⁻¹ .
- Fosfato diamónico (FDA)	- Silicato de magnesio 0, 2, 4 y 6 t. ha ⁻¹ .

2.4.2. Tratamientos

Los tratamientos aplicados en bases a fuentes de fósforo y enmienda cálcica y silícica fueron 16 tratamientos (Tabla 2.3). Cada tratamiento fue realizado por triplicado, haciendo un total de 48 macetas.

Tabla 2.3

Descripción de los tratamientos del diseño experimental

Tratamientos	Fuente de fósforo	Enmienda
T ₀₁	Superfosfato triple de calcio	Dolomita 0 t. ha ⁻¹
T ₀₂	Superfosfato triple de calcio	Dolomita 2 t. ha ⁻¹
T ₀₃	Superfosfato triple de calcio	Dolomita 4 t. ha ⁻¹
T ₀₄	Superfosfato triple de calcio	Dolomita 6 t. ha ⁻¹
T ₀₅	Superfosfato triple de calcio	Silicato de magnesio 0 t. ha ⁻¹
T ₀₆	Superfosfato triple de calcio	Silicato de magnesio 2 t. ha ⁻¹
T ₀₇	Superfosfato triple de calcio	Silicato de magnesio 4 t. ha ⁻¹
T ₀₈	Superfosfato triple de calcio	Silicato de magnesio 6 t. ha ⁻¹
T ₀₉	Fosfato diamónico	Dolomita 0 t. ha ⁻¹
T ₁₀	Fosfato diamónico	Dolomita 2 t. ha ⁻¹
T ₁₁	Fosfato diamónico	Dolomita 4 t. ha ⁻¹
T ₁₂	Fosfato diamónico	Dolomita 6 t. ha ⁻¹
T ₁₃	Fosfato diamónico	Silicato de magnesio 0 t. ha ⁻¹
T ₁₄	Fosfato diamónico	Silicato de magnesio 2 t. ha ⁻¹
T ₁₅	Fosfato diamónico	Silicato de magnesio 4 t. ha ⁻¹
T ₁₆	Fosfato diamónico	Silicato de magnesio 6 t. ha ⁻¹

(*) Cada tratamiento fue realizado por triplicado, es decir, se utilizaron tres macetas por tratamiento, cada maceta tuvo 3.5 kg de suelo.

2.5. Materiales, insumos y equipos

2.5.1. Materiales

- Suelo ácido (Procedente de Quisto Valle – Pichari – La Convención - Cusco).
- Maceta Plástica Teku Vcg12.
- Balde – capacidad 18 l.
- Flexómetro o Wincha de 5 m.
- Pala recta, rastrillo y tamiz de 2 mm.
- Libreta de campo.
- Lápices y marcadores.

2.5.2. Insumos

- Urea (46%N).
- Cloruro de potasio (60%K₂O).
- Superfosfato triple de calcio (ST) (46%P₂O₅; 13% Ca)
- Fosfato diamónico (FDA) (18%N; 46% P₂O₅).
- Dolomita (CaCO₃.MgCO₃): “Dolomita nube”.
- Silicato de magnesio (MgSiO₃): “Insumag Act – 400”.
- Semilla de maíz híbrido (*Zea mays* L) DEKALB – 399.

2.5.3. Equipos

- pH - metro de sobremesa HI 3220 marca Hanna.
- Balanza analítica de 2 decimales, marca Ohaus, modelo Pionner.
- Estufa.

Figura 2.4

Determinación del pH de las muestras de suelo



2.6. Métodos y procedimientos

2.6.1. Fase de invernadero

Una vez en el invernadero del área de Suelos del Programa de Investigación en Pastos y Ganadería de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, el suelo colectado fue vertido sobre un toldo de plástico de 12 m² y secado durante dos semanas, cuya temperatura estuvo entre 20 a 25 °C, alrededor de cada cuatro días, el suelo fue removido con ayuda de un rastrillo y una pala recta. Posteriormente, el suelo seco fue tamizado a través de una malla de 2 mm de apertura, las partículas de agregados que no lograron pasar por la malla fueron desmenuzadas. Después, el suelo fue homogeneizado y vertido en costales de polipropileno. Luego, 3.5 kg de suelo seco fue vertido en una maceta circular. Se utilizaron un total 48 macetas.

Figura 2.5

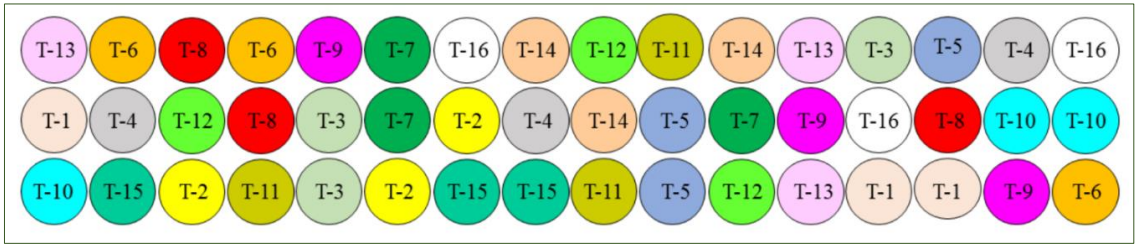
Macetas con muestras suelo seco 3.5 kg



En cada maceta o unidad experimental se aplicó las enmiendas (en estado sólido) a distintos niveles, según tabla 2.3. La distribución y aplicación de los diferentes tratamientos fue de manera aleatoria (Figura 2.6).

Figura 2.6

Croquis de la distribución aleatoria de tratamientos (DCA)



Luego de la aplicación según la tabla 2.3 se mezcló con todo el suelo seco, luego se agregó agua a fin de mantener una humedad a capacidad de campo por un periodo de 45 días. Después de ello se realizó la fertilización fosfórica con 0.543 g/maceta de superfosfato triple de calcio y fosfato diamónico (Figura 2.7) junto con la siembra del maíz híbrido DEKALB 399 (proveído por INÍA Ayacucho).

Como se realiza normalmente en la agricultura, luego de 15 días después de la siembra (DDS) se realizó la primera fertilización nitrogenada correspondiente al 40% de la dosis, aplicando 0.271 g/maceta de una fuente como urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) y también la primera fertilización potásica correspondiente al 50% de la dosis, aplicando 0.208 g/maceta de una fuente como cloruro de potasio (KCl). Después de transcurridos 35 DDS se realizó la segunda fertilización nitrogenada correspondiente al 40% de la dosis, aplicando 0.271 g/maceta con urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) y también la segunda y última fertilización potásica correspondiente al 50% de la dosis, aplicando 0.208 g/maceta con cloruro de potasio (KCl). Finalmente, una fertilización nitrogenada correspondiente al 20% restante de la dosis con 0.136 g/maceta con urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) después de 50 DDS. Siendo la dosis de fertilización de 250 – 200 – 200 (tener en cuenta $m_{\text{HA}} = 2,800 \text{ t}$, $d_a = 1.4 \text{ g/cm}^3$ y una Prof = 20 cm). La cosecha se realizó a los 90 DDS.

Figura 2.7

Aplicación de tratamientos en las macetas. (A) Enmiendas (Dolomita, silicato de magnesio).
(B) Fuentes fosfóricas (ST, FDA)



2.5.2. *Evaluaciones fase post invernadero*

En el suelo

- El pH del suelo: Para medir el pH se combinaron 20 ml de suelo y 20 ml de agua destilada dentro de un recipiente de 100 ml, agitándose de manera intermitente durante 30 minutos y luego se insertó el electrodo del pH – metro en el sobrenadante de la solución. Esta variable se midió al inicio y al final del ensayo.
- Acidez cambiabile: En un recipiente se colocó 10 g de suelo y se añadió 50 ml de KCl 1N, siendo agitado durante 30 minutos. Se filtró la solución a un balón volumétrico de 100 ml, el residuo solido fue lavado con fracciones aproximadas de 10 ml de KCl 1N, completando de esta manera a 100 ml, se extrajo una alícuota de 25 ml de la solución resultante y se añadió 3 gotas del indicador fenolftaleína. Se procedió a titular con NaOH 0.05 N hasta que la solución se torne de un color rosado pálido. Se anotó el gasto para los respectivos cálculos.

$$\text{Acidez cambiabile (Al + H)} \frac{\text{meq}}{100 \text{ g}} = \frac{100(X - Y) * N * \text{Vol extrac}}{\text{Alícuota} * \text{peso suelo}}$$

Donde:

X: ml de NaOH usado.

Y: ml de NaOH usado para el blanco.

N: Normalidad de NaOH.

- Aluminio cambiabile: A la solución usada para medir la acidez cambiabile adicionar una micro gota de 0.05 N de HCl. La solución retornará al punto anterior a la titulación final, es decir nuevamente el color será claro. Adicionar 10 ml de NaF 1N para acomplejar al aluminio cambiabile, si el aluminio se encuentra presente en la solución, ésta se tornará al color rosado por efecto de la alcalinización, si la solución no retorna al color rosado no es necesario continuar por que el aluminio cambiabile no está presente. Se procedió a titular la solución con 0.05 N de HCl hasta que la decoloración fue permanente, la cantidad de ácido adicionado corresponde a la cantidad de aluminio cambiabile. Se usó un blanco y se trató como si fuese una muestra.

$$\text{Aluminio cambiabile (Al)} \frac{\text{meq}}{100 \text{ g}} = \frac{100(X - Y) * N * \text{Vol extrac}}{\text{Alícuota} * \text{peso suelo}}$$

Donde:

X: ml de HCl usado

Y: ml de HCl usado para el blanco

N: Normalidad de HCl.

- Determinación de los cationes cambiabiles (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+): El acetato de amonio desplaza los cationes cambiabiles durante la saturación del suelo, obteniendo un extracto el cual se utiliza para realizar las determinaciones de Ca^{2+} y Mg^{2+} , determinados por absorción atómica, mientras que el K^+ y Na^+ se puede determinar absorción atómica o por fotometría de llamas.

Los métodos de análisis de suelos utilizados en este estudio se describen en un manual de procedimientos de los análisis de suelos y agua con fines de riego por INIA (2017).

En el cultivo evaluado

- Longitud de raíces: Para la medición de la longitud de la raíz se tomó como referencia el cuello de la raíz hasta alcanzar la máxima medida con la ayuda de una regla graduada.
- El peso de la materia seca se evaluó por separado: Primero, el vástago (parte aérea) se cortó a nivel del suelo (cuello de la raíz), luego fue lavada con agua destilada y cortado en pequeños trozos. Segundo, las raíces fueron extraídas con cuidado de las macetas, luego serán lavados con agua destilada y secadas al aire. En ambos casos fueron empaquetados, rotulados en bolsas de papel Kraft y posteriormente puestos en una estufa a 70 ° C para la eliminar el agua de los tejidos hasta alcanzar peso constante (durante 24 a 72 horas). Se tomó el peso seco luego transcurridos las 24 horas dentro de la estufa.
- Altura de planta: Para evaluar la variable altura de planta en el maíz, se procedió a medir desde la base del suelo hasta el último nudo del tallo de la planta.

2.6. Diseño experimental

Se utilizó el diseño completamente al azar (DCA) con un arreglo factorial 2P x 8E con 3 repeticiones. Los tratamientos resultaron de las combinaciones de dos fuentes de fósforo por ocho niveles de enmiendas que dieron como resultado 16 tratamientos. (Tabla 2.2). El modelo aditivo lineal es el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + P_i + E_j + (PE)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

Y_{ijk}	Es una observación del <i>i-ésimo</i> nivel de P, <i>j-ésimo</i> nivel de enmienda y <i>k-ésima</i> repetición
μ	Promedio de las unidades experimentales
P_i	Efecto del <i>i-ésimo</i> nivel de P
E_j	Efecto del <i>j-ésimo</i> nivel de enmienda
$(PE)_{ij}$	Efecto de la interacción P x enmienda
ε_{ijk}	Error experimental

2.7. Análisis estadístico

El estudio se evaluó mediante análisis de variancia de acuerdo al diseño experimental y considerando cada una de las variables respuesta. Cuando se encontró diferencia estadística significativa en las fuentes de variación se procedió al contraste de promedios de Tukey o regresiones. Para rechazar las pruebas de hipótesis en todos los casos se consideró una significación de 0.05 ($p < 0.05$).

Durante el desarrollo del experimento se consideró dos repeticiones para las características químicas del suelo y tres repeticiones para evaluar las variables biométricas del cultivo de indicador (maíz).

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Evaluación en las características químicas del suelo

3.1.1. pH

En el análisis de variancia (ANVA) para el pH del suelo se observa en la tabla 3.1 y detallado en el anexo 5, resultaron que existe diferencia estadística altamente significativa entre las interacciones de fuentes fosfóricas (P) y enmiendas (E), como resultado del análisis de caracterización del suelo, realizado una vez concluida el experimento. Como producto de diferencia estadística en la interacción, se analizaron los efectos mediante el análisis de variancia de efectos simple (Anexo 6) para conocer el comportamiento del pH del suelo debido a las fuentes fosfóricas en las diferentes dosis de la enmienda y viceversa.

Tabla 3.1

Análisis de variancia del pH en suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021

FV	GL	SC	CM	Fc	p-valor	Sig
Tratamientos (T)	15	3.425	0.228	208.19	<.0001	**
F. fosfórica (P)	1	0.107	0.107	97.51	<.0001	**
Enmienda (E)	7	3.280	0.469	427.17	<.0001	**
P x E	7	0.039	0.006	5.03	0.0036	**
Error	16	0.018	0.001			
Total	31	3.443				

Promedio : 4.41

CV : 0.75 %

En el análisis de variancia de efectos simples (Anexo 6), se observa que las fuentes de fósforo (ST, FDA) evaluadas en las diferentes dosis de dolomita resultaron con diferencia estadística altamente significativa en los promedios del pH del suelo, siendo

mayor ST en comparación al FDA, cuando se aplicaron dosis de 2, 4 y 6 t. ha⁻¹ de dolomita con promedios de 4.46, 4.70 y 5.20 respectivamente (Figura 3.1); del mismo modo las fuentes de fósforo (ST, FDA) evaluadas en las diferentes dosis de silicato de magnesio resultaron con diferencia estadística altamente significativa en los promedios del pH del suelo, siendo mayor ST en comparación al FDA, cuando se aplicaron 4 y 6 t. ha⁻¹ de silicato de magnesio con promedio de 4.45 y 4.57 respectivamente (Figura 3.1).

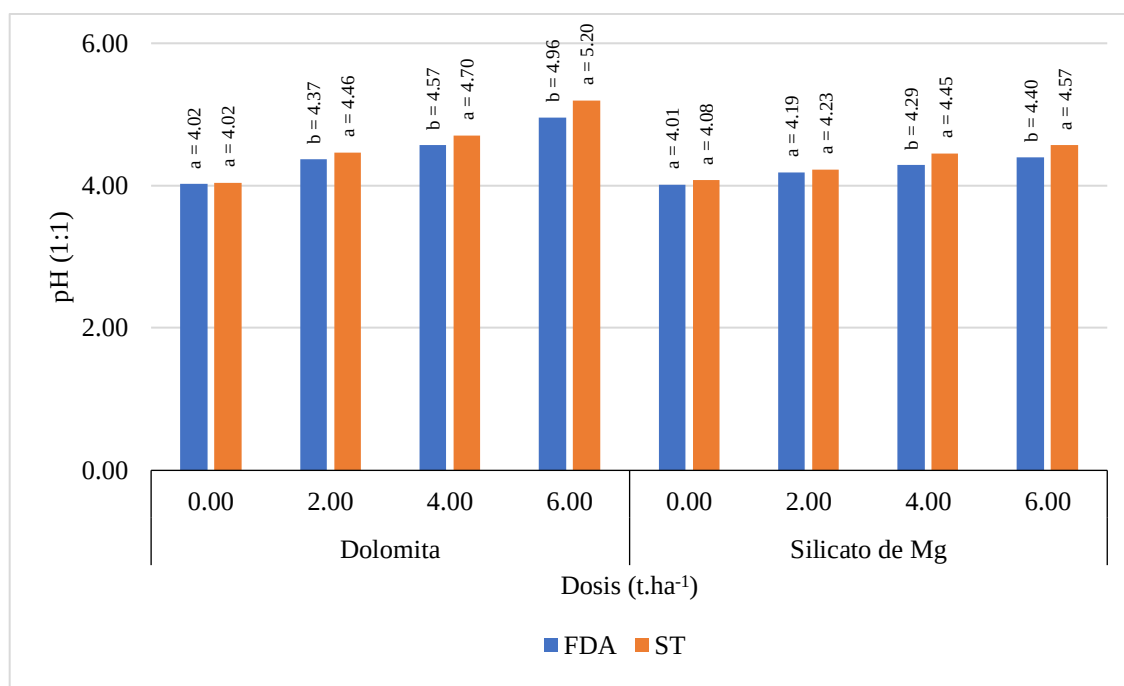
Los resultados, concuerdan con los obtenidos por Chung (2019), al obtener un pH mayor, cuando aplicó el ST en comparación que el FDA después de la cosecha, esto podría deberse a la acidez que genera los fertilizantes fosforados, de manera que el FDA genera mayor acidez en comparación del ST, siendo así la acidez equivalente de 74 y 15 kgCaCO₃.100kg⁻¹ de fertilizante respectivamente (Bolan et al., 2003), este efecto se debe a la oxidación del amonio que posee el FDA produciendo iones hidrogeno que disminuye el pH al concentrar estos iones ácidos (Havlin et al., 2017; Strawn et al., 2020; Weil & Brady, 2017).

De acuerdo al análisis caracterización del suelo inicial (Anexo 3), el valor del pH fue de 4.86, en comparación con los tratamientos T₁, T₅, T₉ y T₁₃ con pH promedios de 4.04, 4.08, 4.02 y 4.01 respectivamente, donde existe una disminución en el pH, siendo éstas medidos después de la cosecha, esto podría estar siendo influenciado por el sistema radicular de la planta. El sistema radicular de la planta toma de la solución del suelo los diferentes iones en forma de cationes (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ y NH₄⁺) y aniones (H₂PO₄⁻, HPO₄⁼, SO₄⁻, NO₃⁻, etc.), la absorción de estos iones va acompañada de un balance de H⁺, OH⁻ y HCO₃⁻ difundiendo de la raíz hacia el suelo, mediante este proceso mantiene su electronegatividad y balance de cargas en el citoplasma en consecuencia, los ecosistemas que aumentan en biomasa acidifican el suelo (Zapata, 2004).

El efecto de las diferentes dosis de dolomita evaluadas en las fuentes fosfóricas (ST, FDA) resultaron con tendencias lineales positivas con diferencia estadística altamente significativa (Anexo 6), de manera que a 6 t. ha⁻¹ resultaron con pH promedios de 5.15 y 4.93 respectivamente (Figura 3.2), mientras el efecto de las diferentes dosis de silicato de magnesio evaluadas en las fuentes fosfóricas (ST, FDA), también resultaron con tendencias lineales positivas con diferencia estadística significativa (Anexo 6), de manera que a 6 t. ha⁻¹ resultó con pH con promedios de 4.58 y 4.41. (Figura 3.2).

Figura 3.1

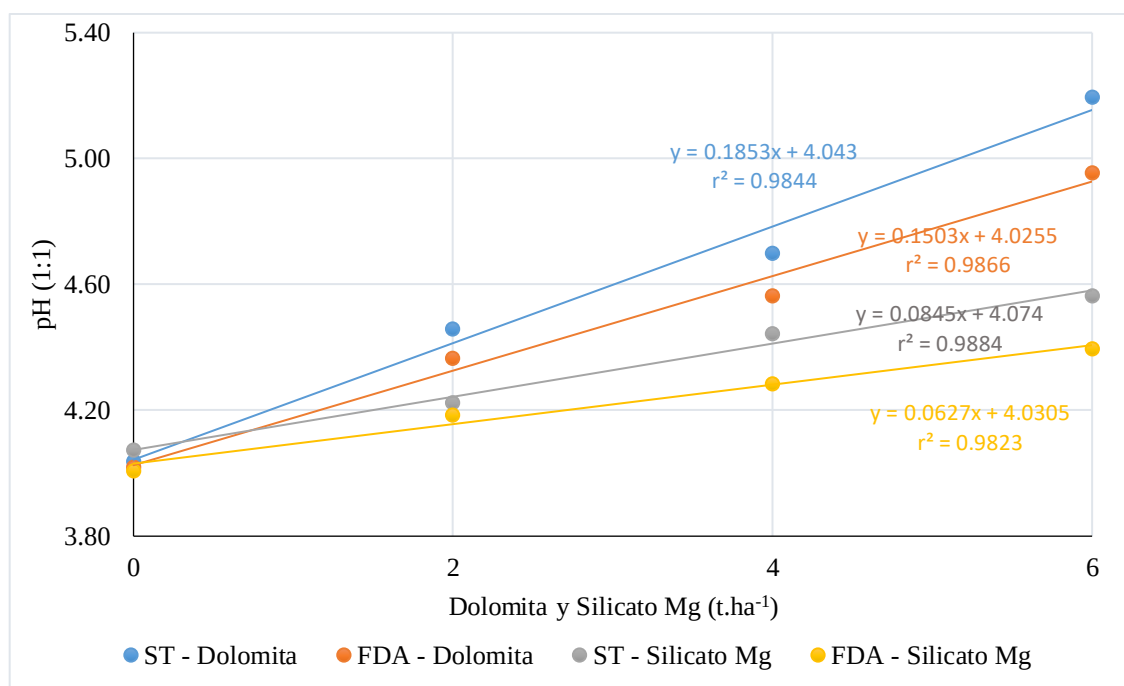
Efecto de aplicación de fuentes fosfóricas (ST, FDA) en diferentes dosis de dolomita y silicato de magnesio en el pH de un suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021. Prueba Tukey al 5%



Resultados similares se reportaron con la aplicaciones crecientes de dolomita en suelos ácidos donde existe la tendencia de elevar el pH (Bolan et al., 2003; Fageria & Baligar, 2008; Fageria & Nascente, 2014), quienes afirman que el anión acompañante es el carbonato (CO_3^{2-}) quien reacciona con el ion hidrógeno para formar dióxido de carbono (CO_2) y agua (H_2O), siendo éstas moléculas estables, aumentando de esta manera el pH del suelo. La aplicación de 1.57 g de dolomita por kg de suelo mejoró el pH hasta 5.5 en suelos del Brasil (Fageria et al., 2014), 12 t. ha⁻¹ dolomita también mejoró el pH hasta 6.4 durante tres campañas consecutivas en suelos del Brasil (Fageria, 2006), de igual manera para el caso de silicato de magnesio, el anión acompañante es silicato (SiO_3^{2-}) que reacciona con iones hidrógeno para formar el ácido monosilícico (H_4SiO_4) (Álvarez & Osorio, 2014; Matichenkov, 2008; Weil & Brady, 2017), del mismo modo la aplicación de silicato de magnesio a una dosis de 12 meq.100g⁻¹ fue la que tuvo mejores resultados en un suelo se selva (Chung, 2019) y 3 meq.100g⁻¹ suelo (Encina, 2017), en el presente trabajo de investigación el uso de silicato de magnesio tuvo influencia en el pH del suelo de selva evaluado, muchos investigaron concluyeron de la misma manera, que la fuentes silicatadas son una buena opción para mejorar el pH de los suelos de la selva (Cabral et al., 2008; Camargo et al., 2007; Peregrina et al., 2008).

Figura 3.2

Tendencia lineal del pH por efecto de dolomita y silicato de Mg en las fuentes fosfóricas (ST, FDA) en un suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021



De la figura 3.2, se observa que cuando se incrementan la dosis de dolomita para las fuentes fosfóricas (ST; FDA), el pH del suelo se incrementó de manera lineal y positiva, así por cada t. ha⁻¹ adicional de dolomita el pH se incrementó en 0.19 y 0.15 unidades en promedio respectivamente, mientras que cuando se incrementó la dosis de silicato de magnesio para las fuentes fosfóricas (ST; FDA), el pH del suelo se incrementó de manera lineal y positiva, así por cada t. ha⁻¹ adicional de silicato de magnesio el pH del suelo se incrementó en 0.08 y 0.06 en promedio respectivamente.

3.1.2. Aluminio intercambiable

En el análisis de variancia (ANVA) para el aluminio intercambiable del suelo se observa en la tabla 3.2 y detallado en el anexo 8, resultaron que existe una diferencia estadística altamente significativa entre las interacciones de fuentes fosfóricas (P) y enmiendas (E), como resultado del análisis caracterización del suelo, realizado una vez concluida el experimento. Como producto de la diferencia estadística en la interacción, se analizó los efectos mediante el análisis de variancia de efectos simples para conocer el comportamiento del aluminio intercambiable del suelo debido a las fuentes fosfóricas en las diferentes dosis de la enmienda y viceversa.

Tabla 3.2

Análisis de variancia para el aluminio intercambiable en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021

FV	GL	SC	CM	Fc	p-valor	Sig
Tratamientos (T)	15	10.727	0.715	204.5	<.0001	**
F. fosfórica (P)	1	0.194	0.194	55.41	<.0001	**
Enmienda (E)	7	10.414	1.488	425.45	<.0001	**
P x E	7	0.119	0.017	4.85	0.0043	**
Error	16	0.056	0.004			
Total	31	10.783				

Promedio: 1.24 cmol₍₊₎.kg⁻¹

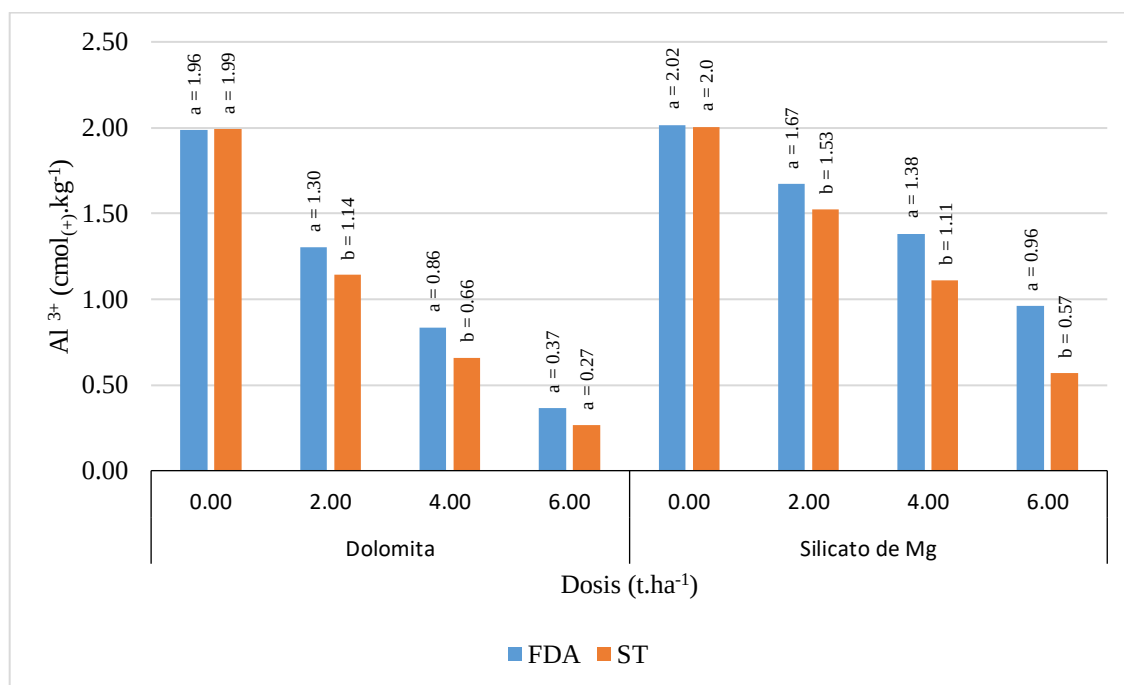
CV : 4.78 %

En el análisis de variancia de efectos simples (Anexo 9), se observa que las fuentes de fósforo (ST, FDA) evaluadas en las diferentes dosis de dolomita resultaron con diferencia estadística altamente significativa en los promedios del aluminio intercambiable del suelo, siendo menor el ST en comparación al FDA, cuando se aplicó dosis de 2 y 4, t. ha⁻¹ de dolomita con promedios de 1.14 y 0.66 cmol₍₊₎.kg⁻¹ respectivamente (Figura 3.3); del mismo modo las fuentes de fósforo evaluadas en las diferentes dosis de silicato de magnesio resultaron con diferencia estadística altamente significativa en los promedios del aluminio intercambiable de suelo, siendo menor el ST en comparación al FDA, cuando se aplicó dosis de 2, 4 y 6 t. ha⁻¹ de silicato de magnesio con promedio de 1.53, 1.11 y 0.57 cmol₍₊₎.kg⁻¹ respectivamente (Figura 3.3), siendo estos los mejores resultados al poseer valores bajos de aluminio intercambiable en el suelo estudiado.

La cantidad de aluminio es condicionada o está relacionado de manera inversamente proporcional con los valores de pH de un suelo, es decir a mayor valor pH la cantidad de aluminio intercambiable será menor es así que cuando se utiliza el FDA producirá mayor acidez en el suelo y como consecuencia la cantidad de aluminio intercambiable será mayor, es así que el ST trae consigo un mejor resultado o efecto sobre pH del suelo y como producto una menor cantidad de aluminio intercambiable en el suelo (Bolan et al., 2003).

Figura 3.3

Efecto de aplicación de fuentes fosfóricas (ST, FDA) en las diferentes dosis de dolomita y silicato de magnesio en el aluminio intercambiable de un suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021. Prueba Tukey al 5%



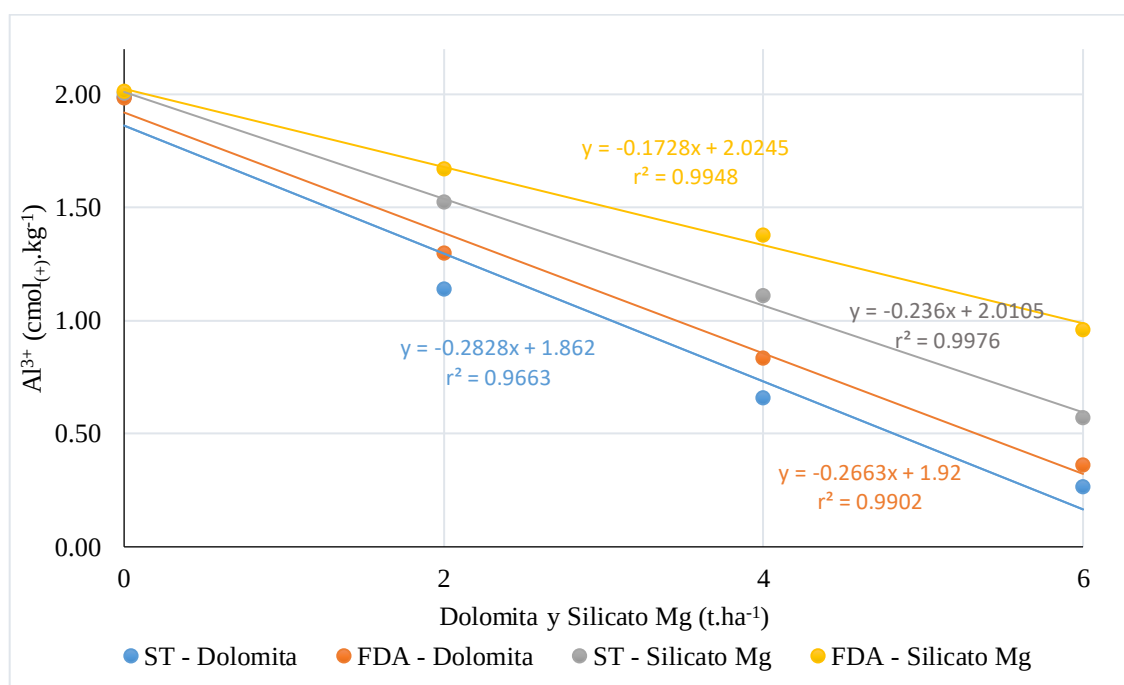
El efecto de las diferentes dosis de dolomita en las fuentes fosfóricas (ST, FDA) resultaron con tendencias lineales de pendiente negativa con diferencia estadística altamente significativa (Anexo 9), logrando una disminución proporcional de aluminio intercambiable del suelo que a 6 t. ha⁻¹ resultaron con promedios de 0.17 y 0.32 cmol(+)·kg⁻¹ respectivamente (Figura 3.4); mientras el efecto de las diferentes dosis de silicato de magnesio en las fuentes fosfóricas (ST, FDA), resultaron con tendencia lineal de pendiente negativa con diferencia estadística altamente significativa (Anexo 9), logrando una disminución proporcional de aluminio intercambiable que a 6 t. ha⁻¹ resultaron con promedio de 0.59 y 0.98 cmol(+)·kg⁻¹ para ST y FDA respectivamente (Figura 3.4).

Estos resultados eran de esperarse de manera que el aluminio intercambiable está relacionado con los valores de pH; por lo tanto, donde se obtuvieron valores altos de pH, los valores de aluminio intercambiable fueron los más bajos. Varios autores reportaron resultados similares, en donde a dosis crecientes de dolomita independientemente de la fuente de fósforo, existe la disminución promedio de aluminio intercambiable (Bolan et al., 2003; Fageria & Nascente, 2014; Havlin et al., 2017; Weil & Brady, 2017), debido

que el hidróxido producido por la hidrólisis del agua a causa del carbonato proveniente de la dolomita incrementa el pH y precipita el aluminio en forma de gibsita ($\text{Al}(\text{OH})_3^0$) disminuyendo así su efecto fitotóxico para las raíces de la mayoría de las plantas (Fageria & Baligar, 2008; George et al., 2012). De igual manera, el mecanismo principal del efecto del silicato en la disminución de la fitotoxicidad del aluminio esta probablemente relacionados con la formación de complejos silicatos hidro-aluminosos no tóxicos (Matichenkov, 2008).

Figura 3.4

Tendencia lineal del aluminio intercambiable por efecto de dolomita y silicato de Mg en las fuentes fosfóricas (ST, FDA) de un suelo ácido se selva. Pichari, Cusco 2021



Lindsay (1979) citado por Fageria et al. (2014), menciona que el aluminio intercambiable precipita como especies de hidróxido de aluminio insolubles, disminuyendo 1000 veces por cada unidad de aumento del pH. De acuerdo a los resultados que se tuvieron existe una correlación negativa entre pH y aluminio intercambiable, esto nos quiere decir que mientras aumenta el pH, disminuye el contenido de aluminio intercambiable en el suelo.

De la figura 3.4 cuando incrementó la dosis de dolomita para fuentes fosfóricas (ST, FDA), el aluminio intercambiable disminuyó proporcionalmente, así por cada t. ha⁻¹

¹ adicional de dolomita disminuyó 0.28 y 0.27 cmol₍₊₎.kg⁻¹ el aluminio intercambiable en promedio cuando se empleó ST y FDA respectivamente, del mismo modo la aplicación silicato de magnesio para fuentes fosfóricas (ST, FDA), el aluminio intercambiable disminuyó proporcionalmente, así por cada t. ha⁻¹ adicional de silicato de magnesio disminuyó 0.24 y 0.17 cmol₍₊₎.kg⁻¹ de aluminio intercambiable en promedio cuando se empleó ST y FDA respectivamente.

3.1.3. Calcio intercambiable

En el análisis de variancia (ANVA) para el calcio intercambiable del suelo se observa en la tabla 3.3 y detallado en el anexo 11, resultaron que existe una diferencia estadística significativa entre las interacciones de fuentes fosfóricas (P) y enmiendas (E), como resultado del análisis de caracterización del suelo realizado una vez concluida el experimento. Como resultado de la diferencia estadística significativa en la interacción, se analizaron los efectos mediante el análisis de variancia de efectos simples para conocer el comportamiento del calcio intercambiable del suelo debido a las fuentes fosfóricas en las diferentes dosis de la enmienda y viceversa.

Tabla 3.3

Análisis de variancia del calcio intercambiable en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021

FV	GL	SC	CM	Fc	p-valor	Sig
Tratamientos (T)	15	6.031	0.402	82.40	<0.0001	**
F. fosfórica (P)	1	0.001	0.001	0.14	0.7092	n.s.
Enmienda (E)	7	5.921	0.846	173.40	<0.0001	**
P x E	7	0.108	0.015	3.15	0.0270	*
Error	16	0.078	0.005			
Total	31	6.108				

Promedio: 1.57 cmol₍₊₎.kg⁻¹

CV : 4.46 %

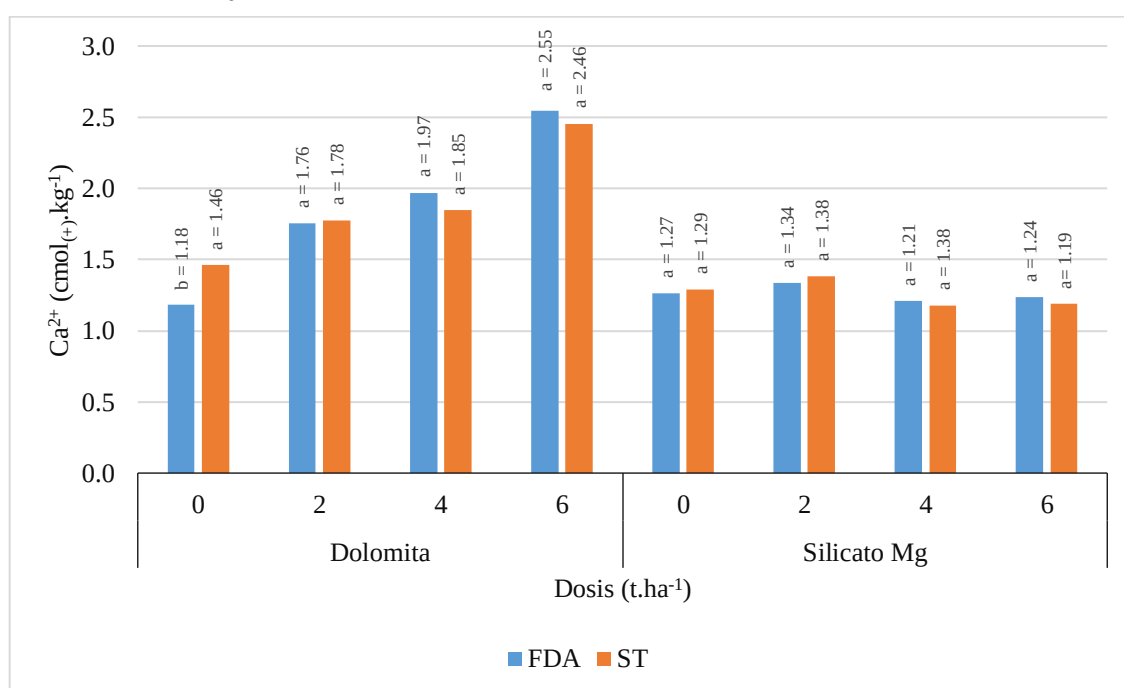
En el análisis de variancia de efectos simples (Anexo 12), se observa que la fuente de fósforo (ST, FDA) evaluados en las diferentes dosis de dolomita sólo resultaron con diferencia estadística significativa, cuando no se aplicó dolomita siendo este un resultado atípico a lo obtenido (Figura 3.5), del mismo modo para el uso de las fuentes fosfóricas

(ST, FDA) evaluados en las diferentes dosis de silicato de magnesio no tuvieron diferencia estadística alguno (Figura 3.5).

El efecto de las diferentes dosis de dolomita evaluadas en las fuentes fosfóricas (ST, FDA) resultaron con tendencias lineales positivas con diferencia estadística significativa (Anexo 12), de manera que el aporte de la dolomita provocó un aumento proporcional, dado que cuando se aplicaron una dosis 6 t. ha⁻¹ resultaron con 2.34 y 2.51 cmol₍₊₎.kg⁻¹ calcio intercambiable en el suelo en promedio para ST y FDA respectivamente (Figura 3.6).

Figura 3.5

Efecto de la aplicación de fuentes fosfóricas (ST, FDA) en las diferentes dosis de dolomita y silicato de magnesio en el calcio intercambiable de un suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021. Prueba Tukey al 5%

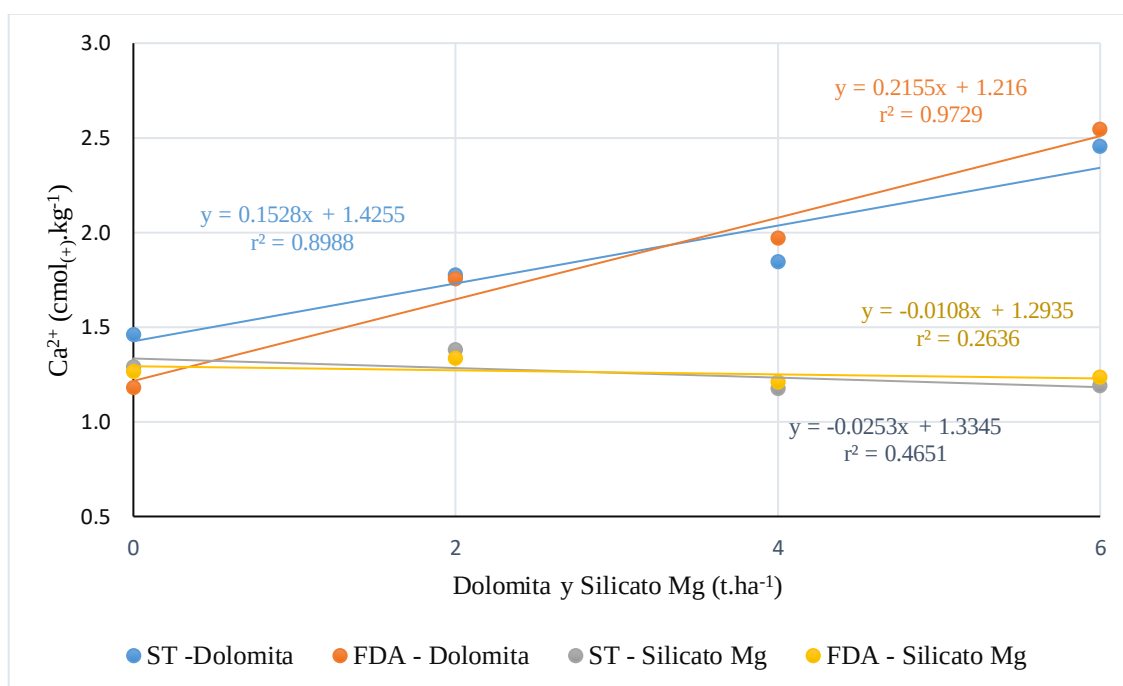


Valores de 4.2 cmol.kg⁻¹ calcio intercambiable (Fageria, 2006), 2.1 cmol.kg⁻¹ calcio intercambiable (Fageria et al., 2007) y 3.7 cmol.kg⁻¹ calcio intercambiable (Fageria et al., 2014) resultaron óptimo para la producción de frejol seco, frejol común y soya respectivamente como producto de la utilización de la dolomita (33.% de óxido de calcio, 14 % de óxido de magnesio y con un 85% poder neutralizador).

Por otro lado, el efecto del silicato de magnesio para las fuentes fosfóricas (ST, FDA) no tuvo diferencias estadística significativas en el calcio intercambiable del suelo, sin embargo, otros autores utilizaron fertilizantes como wollastonita (CaSiO_3) dando buenos resultados en el aumento del calcio intercambiable para poder incrementar la producción de arroz (Camargo et al., 2007), también otros autores utilizaron escorias básicas que es un sub producto de la industria siderúrgica del hierro los cuales proporcionan calcio intercambiable en el suelo de manera significativa (Carvalho-Pupatto et al., 2004; Peregrina et al., 2008; Prado & Fernandes, 2003).

Figura.3.6

Tendencia lineal del calcio intercambiable por efecto de dolomita y silicato de Mg en las fuentes fosfóricas (ST, FDA) de un suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021



De la figura 3.6 cuando incrementa la dosis de dolomita y se usó fuentes fosfóricas (ST, FDA), el calcio intercambiable aumenta proporcionalmente, así por cada $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$ adicional de dolomita aumenta 0.153 y 0.216 $\text{cmol}_{(+)} \cdot \text{kg}^{-1}$ en promedio cuando se emplea ST y FDA respectivamente, es así que la aplicación de silicato de magnesio al no resultar con diferencia significativa, no presenta incrementos significativos de calcio intercambiable (Anexo 12).

3.1.4. Magnesio intercambiable

En el análisis de variancia (ANVA) para el magnesio intercambiable del suelo se observa en la tabla 3.4, resultaron que existe diferencia estadística altamente significativa entre los tratamientos empleados (T) y las enmiendas (E), como resultado del análisis de caracterización del suelo realizadas una vez concluida el experimento, al no tener diferencia estadística significativa en la interacción, nuestro análisis se centró en la utilización de las enmiendas.

Tabla 3.4

Análisis de variancia del magnesio intercambiable en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021

FV	GL	SC	CM	Fc	p-valor	Sig
Tratamientos (T)	15	1.4451	0.0963	51.9	<.0001	**
F. fosfórica (P)	1	0.0050	0.0050	2.69	0.1203	n.s.
Enmienda (E)	7	1.4303	0.2043	110.07	<.0001	**
Dol lineal	1	0.7605	0.7605	409.70	<.0001	**
Dol cuadrática	1	0.0049	0.0049	2.64	0.1238	n.s.
Dol cúbica	1	0.0031	0.0031	1.68	0.2129	n.s.
Si Mg lineal	1	0.5678	0.5678	305.91	<.0001	**
Si Mg cuadrática	1	0.0156	0.0156	8.42	0.0104	*
Si Mg cúbica	1	0.0022	0.0022	1.19	0.2919	n.s.
Dol vs Si Mg	1	0.0761	0.0761	40.97	<.0001	**
P x E	7	0.0099	0.0014	0.76	0.6292	n.s.
Error	16	0.0297	0.0019			
Total	31	1.4748				

Promedio: $0.61 \text{ cmol}_{(+)}. \text{kg}^{-1}$

CV : 7.12%

El efecto de la dolomita y el silicato de magnesio en el contenido de magnesio intercambiable del suelo resultaron con tendencia lineal positiva con diferencia estadística significativa de manera que a 6 t. ha^{-1} resultaron con promedios 0.95 y $0.81 \text{ cmol}_{(+)}. \text{kg}^{-1}$ de magnesio intercambiable respectivamente (Figura 3.7).

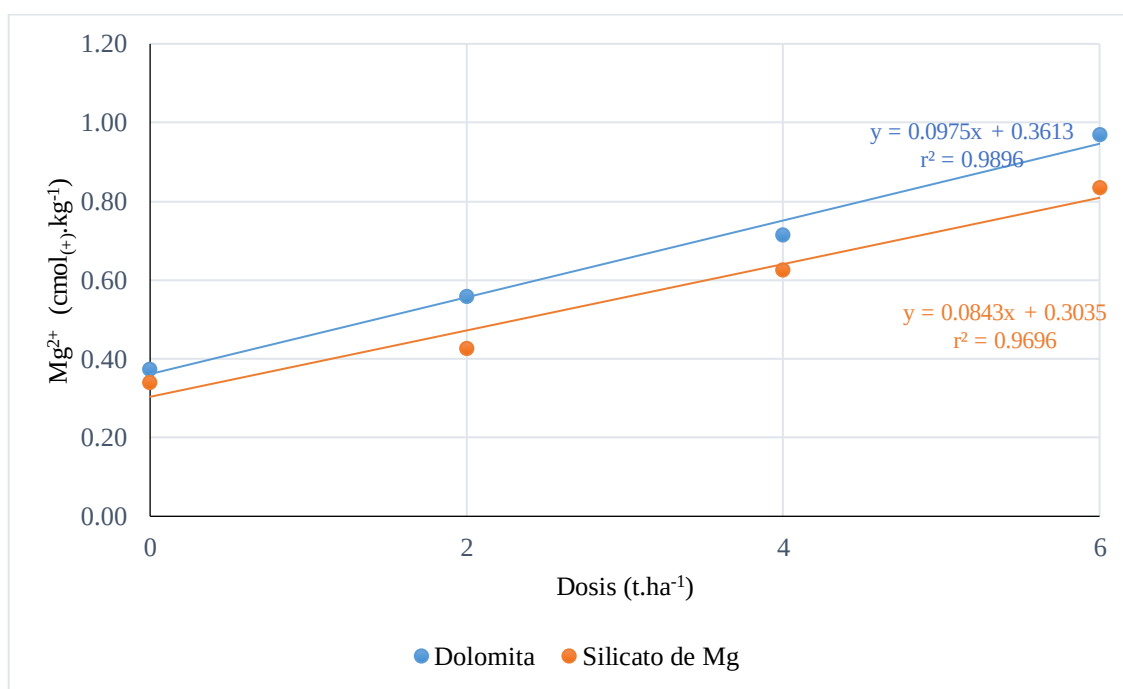
Experimentos realizados en la región del Cerrado en el Brasil en oxisoles con la utilización de cal dolomítica (33 % de óxido de calcio, 14 % de óxido de magnesio y 85

% de poder neutralizante), el cual tuvo efectos positivos en el cambio de las propiedades químicas de los suelos, siendo así a una dosis de 12 t. ha⁻¹, donde el contenido de magnesio intercambiable aumento significativamente a 10 cm de profundidad (Fageria, 2006), de igual manera la aplicación de 4.63 t. ha⁻¹ de cal dolomítica (33 % de óxido de calcio, 14 % de óxido de magnesio y 85 % de poder neutralizante), tuvo una variación de 95% de magnesio intercambiable en oxisoles del Brasil (Fageria et al., 2014).

Del mismo modo el efecto de utilizar escorias de la industria siderúrgicas, el cual contiene en su composición química silicato de magnesio (MgSiO₃) el cual contribuyen a incrementar el pH, disminuir la acidez intercambiable y aportar magnesio en suelos ácidos que son deficientes de bases cambiables propiciandno incrementar la producción de caña de azúcar (Brassioli et al., 2009; Prado & Fernandes, 2003), arroz (Carvalho-Pupatto et al., 2004).

Figura 3.7

Tendencia lineal del magnesio intercambiable por efecto de dolomita y silicato de Mg en un suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021



Cuando se incrementa la dosis de dolomita o silicato de magnesio, el magnesio intercambiable del suelo incrementa linealmente, así por cada t. ha⁻¹ adicional de dolomita o silicato de magnesio incrementa 0.098 y 0.084 cmol(+)·kg⁻¹ en promedio de magnesio intercambiable respectivamente (Figura 3.7).

3.1.5. Fósforo disponible

En el análisis de variancia (ANVA) para el fósforo disponible se observa en la tabla 3.5 y detallado en el anexo 18, resultaron que existe diferencia estadística significativa entre las fuentes fosfóricas (P) y enmiendas (E), como resultado del análisis de caracterización del suelo realizada una vez concluida el experimento.

Tabla 3.5

Análisis de variancia para el fósforo disponible en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021

FV	GL	SC	CM	Fc	p-valor	Sig
Tratamientos (T)	15	45.4385	3.0292	3.91	0.0051	**
F. fosfórica (P)	1	4.2778	4.2778	5.52	0.032	*
Enmienda (E)	7	36.8402	5.2629	6.79	0.0008	**
Dol lineal	1	13.3743	13.3743	17.25	0.0007	**
Dol cuadrática	1	0.4456	0.4456	0.57	0.4595	n.s.
Dol cúbica	1	1.6046	1.6046	2.07	0.1696	n.s.
Si Mg lineal	1	11.6053	11.6053	14.96	0.0014	**
Si Mg cuadrática	1	1.0455	1.0455	1.35	0.2626	n.s.
Si Mg cúbica	1	0.9440	0.9440	1.22	0.2862	n.s.
Dol vs Si Mg	1	7.8210	7.8210	10.09	0.0059	**
P X E	7	4.3205	0.6172	0.80	0.601	n.s.
Error	16	12.4081	0.7755			
Total	31	57.8466				

Promedio: 7.03 ppm

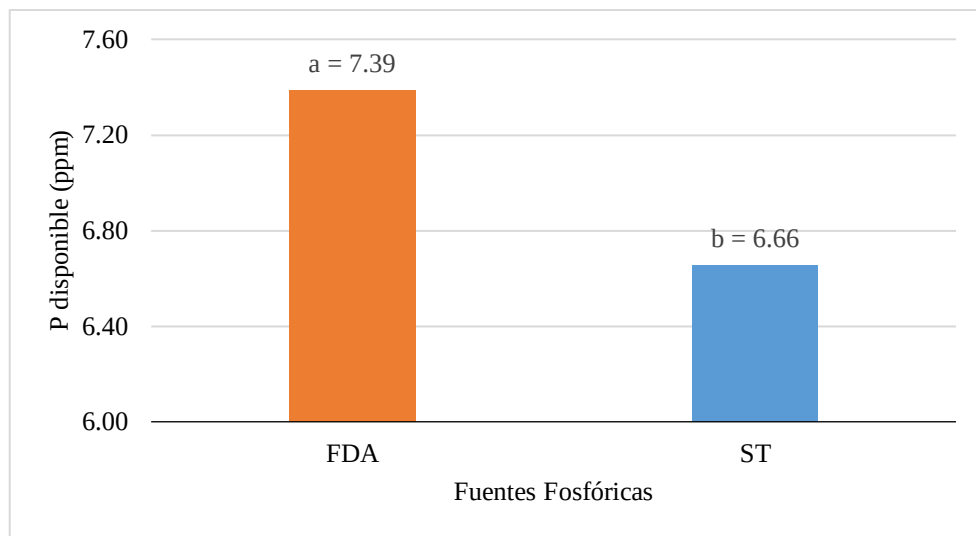
CV : 12.54 %

En el análisis de variancia de efectos principales para la fuente fosfórica (Anexo 18, Figura 3.8), se observa que el FDA se diferenció significativamente en comparación al ST con promedios de 7.39 y 6.66 ppm de fósforo disponible del suelo.

El efecto principal del silicato de magnesio, resultaron con tendencia lineal positiva con diferencia estadística significativa, de modo que a 6 t. ha⁻¹ resulto de 8.60 ppm de fósforo disponible promedio, por otro lado el efecto principal de la dolomita resultó con una tendencia lineal positiva con diferencia estadística significativa, de modo a 6 t. ha⁻¹ resulto con 6.61 ppm de fósforo disponible del suelo.

Figura 3.8

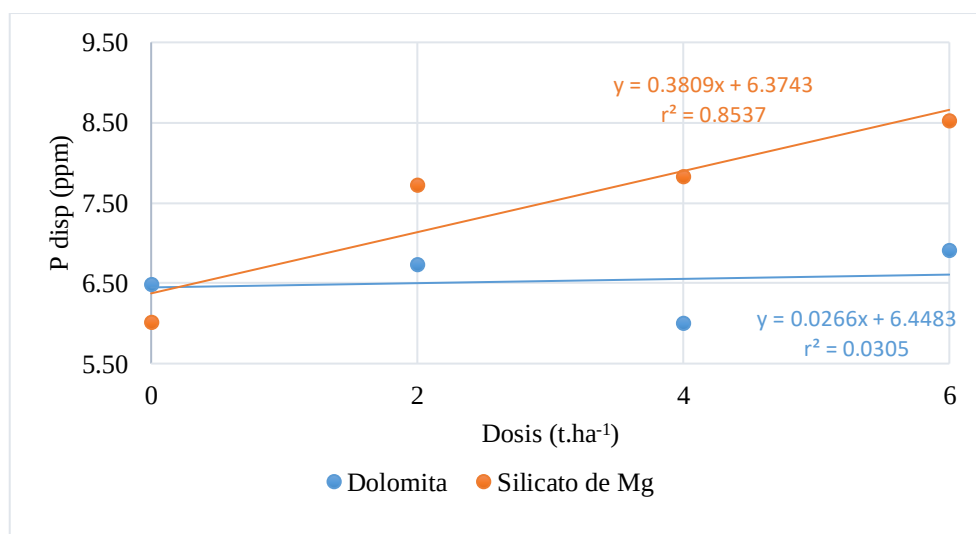
Efecto de la aplicación de superfosfato triple de calcio (ST), fosfato diamónico (FDA) en la disponibilidad de fósforo de un suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021. Prueba Tukey al 5%



De la figura 3.9, se observa que cuando se incrementan la dosis de silicato de magnesio, el fósforo disponible del suelo se incrementa de manera lineal y positiva, así por cada t. ha⁻¹ adicional de incrementa en 0.38 ppm de fósforo disponible, mientras que cuando se incrementa la dosis de dolomita el fósforo disponible del suelo se incrementa de manera lineal y positiva, así por cada t. ha⁻¹ adicional de 0.03 ppm de fosforo disponible del suelo.

Figura 3.9

Tendencia lineal para el fósforo disponible por efecto de dolomita y silicato de Mg de un suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021



3.2. En el cultivo indicador

3.2.1. Longitud de raíces

En el análisis de variancia (ANVA) para la longitud de raíz, se observa en la tabla 3.6 y detallado en el anexo 21, resultaron que existe diferencia estadística altamente significativa entre las interacciones de fuentes fosfóricas (P) y enmiendas (E), como resultado de la evaluación biométrica realizada una vez concluida el experimento. Como resultado de la significancia estadística en la interacción, se analizaron los efectos mediante el análisis de variancia de efectos simple para conocer el comportamiento la longitud de raíz debido a las fuentes fosfóricas en las diferentes dosis de la enmienda y viceversa.

Tabla 3.6

Análisis de variancia de la longitud de raíz de maíz en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021

FV	GL	SC	CM	Fc	p-valor	Sig
Tratamientos (T)	15	1730.245	115.350	106.99	<.0001	**
F. fosfórica (P)	1	66.505	66.505	61.69	<.0001	**
Enmienda (E)	7	1453.370	207.624	192.58	<.0001	**
P x E	7	210.370	30.053	27.88	<.0001	**
Error	32	34.500	1.078			
Total	47	1764.745				

Promedio: 16.82 cm

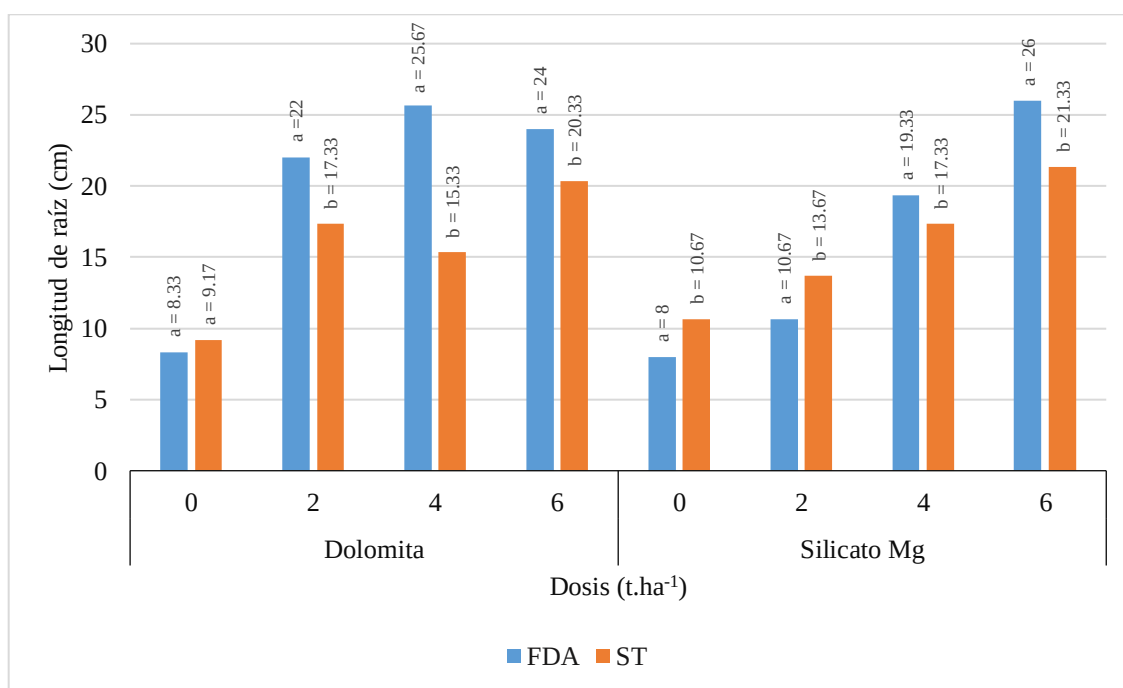
CV : 6.17 %

En el análisis de variancia de efectos simples (Anexo 22), se observa que las fuentes de fósforo (ST, FDA) evaluadas en las diferentes dosis de dolomita resultaron con diferencia estadística significativa en los promedios de longitud de raíces del maíz, siendo mayor FDA en comparación del ST, cuando se aplicaron dosis de 2, 4 y 6 t. ha⁻¹ de dolomita con promedios de 22, 25.67 y 24 cm respectivamente (Figura 3.10), del mismo modo las fuentes de fósforo evaluadas en las diferentes dosis de silicato de magnesio resultó con diferencia estadística significativa en los promedios de longitud de raíces del maíz, siendo mayor FDA en comparación de ST a una dosis de 4 y 6 t. ha⁻¹ de silicato de magnesio con promedios de 19.33 y 26.00 cm respectivamente (Figura 3.10).

Siguiendo el patrón de los resultados, la diferencia significativa podría deberse a la solubilidad de cada fuente fosfórica siendo así el ST (mayor a 900 g.L⁻¹) más soluble que el FDA (558 g.L⁻¹), la liberación de iones fosfatos (H₂PO₄⁻, HPO₄²⁻), en el caso del ST al solubilizarse por completo reaccionará rápidamente con las diferentes formas de aluminio del suelo, las cuales se encuentran a pH bajos formando rápidamente compuestos de baja solubilidad, reduciendo la disponibilidad de fósforo. De otro lado el FDA es menos soluble y por tanto tiene una liberación lenta de iones fosfatos y así no todo el fósforo reaccionará de manera inmediata con las diferentes formas de aluminio del suelo; el fósforo posee funciones importantes debido a su participación en la formación estructural (ácidos nucleicos), formando parte de las membranas celulares y su rol en la transferencia de energía celular (Hawkesford et al., 2012). A mayor absorción de fósforo por las plantas logrará un mayor desarrollo del sistema radicular.

Figura 3.10

Efecto de la aplicación de fuentes fosfóricas (ST, FDA) en las diferentes dosis de dolomita y silicato de magnesio en la longitud de la raíz del maíz de un suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021. Prueba Tukey al 5%

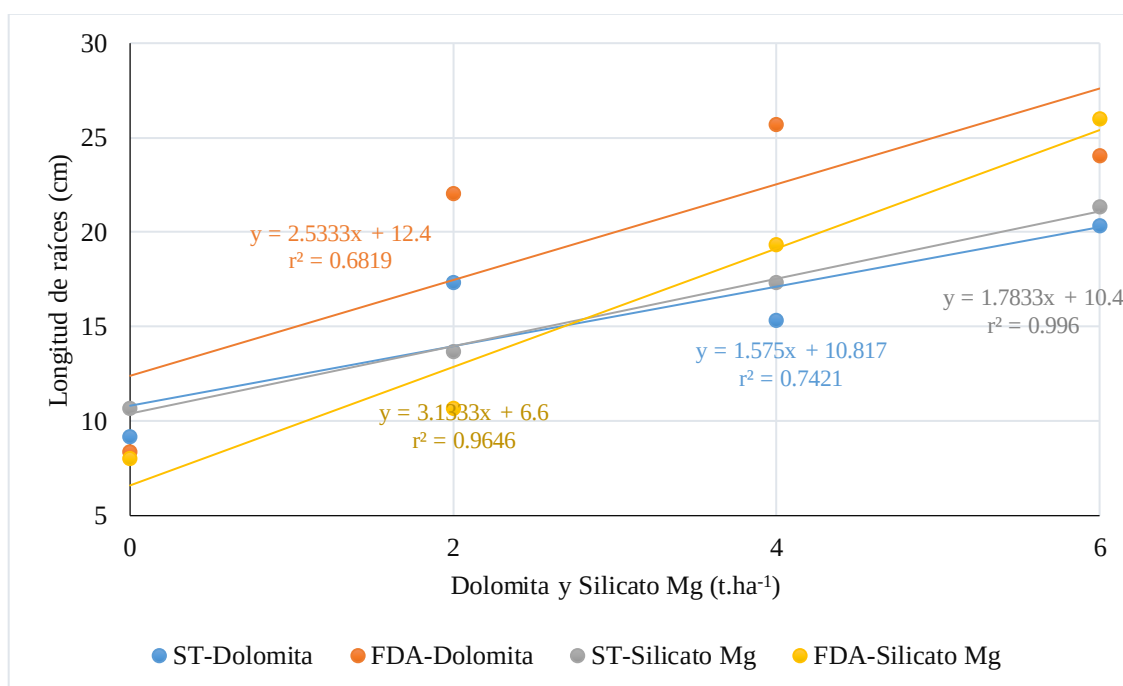


El efecto de las diferentes dosis de dolomita evaluadas en las fuentes fosfóricas (ST, FDA) resultaron con tendencias lineales positivas con diferencia estadística significativa (Anexo 22), de manera que el uso de dolomita a 6 t. ha⁻¹ resultaron con

longitudes de raíces promedio de 27.60 y 20.27 cm respectivamente (Figura 3.11), mientras el efecto de las diferentes dosis de silicato de magnesio evaluadas en las fuentes fosfóricas (ST, FDA), también resultó con tendencias lineales positivas con diferencia estadística significativa (Anexo 22), de manera que a 6 t. ha⁻¹ resultó con longitudes de raíces en promedio de 21.10 y 25.40 cm respectivamente (Figura 3.11), en ambos casos se puede ver tanto la dolomita como el silicato de magnesio tuvieron tendencias lineales positivos los cuales a dosis crecientes de enmiendas (E) hubo mayor desarrollo radicular del maíz.

Figura 3.11

Tendencia lineal de la longitud de raíz de maíz por efecto de dolomita y silicato de Mg en las fuentes fosfóricas (ST, FDA) de un suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021



El pH como una característica química muy importante nos ayuda a inferir otras características relacionadas de manera que el incremento del pH a consecuencia de la aplicación de dolomita (Fageria et al., 2014; Fageria & Baligar, 2008) y silicato de magnesio (Cabral et al., 2008; Carvalho-Pupatto et al., 2004; Peregrina et al., 2008), reduce significativamente la concentración de aluminio soluble e intercambiable el cual resulta un elemento fitotóxico (George et al., 2012; Havlin et al., 2017), inhibiendo la elongación de las raíces a causa de la alta concentración del aluminio, el principal efecto tóxico del aluminio es la inhibición de la división celular, lo que resulta en una reducción

o cese del crecimiento de las raíces principales y laterales, llevándolo así al deterioro de las células de la raíz, disminuyendo la permeabilidad al agua y los nutrientes dando como resultado una reducción en el crecimiento de las raíces y la parte aérea (George et al., 2012). Al reducir el crecimiento de las raíces, la absorción del fósforo es limitado porque se reduce el volumen del suelo explorado por las raíces (Havlin et al., 2017).

De la figura 3.11 se observa que cuando incrementa la dosis de dolomita para las fuentes fosfóricas (ST, FDA), la longitud de raíces aumenta proporcionalmente, así por cada t. ha⁻¹ adicional de dolomita aumenta 1.58 y 2.53 cm en promedio para ST y FDA respectivamente, de igual manera que cuando se incrementa la dosis de silicato de magnesio para las fuentes fosfóricas (ST, FDA), la longitud de raíces aumenta proporcionalmente, así por cada t. ha⁻¹ adicional de silicato de magnesio aumenta 1.78 y 3.13 cm en promedio respectivamente.

3.2.2. *Materia seca radicular*

En el análisis de variancia (ANVA) para el peso de la MS radicular se observa en la tabla 3.7 y detallado en el anexo 24, resultaron que existe diferencia estadística significativa entre las interacciones de fuentes de fósforo (P) y enmiendas (E), producto de la evaluación biométrica realizada una vez concluida el experimento. Como resultado de la significancia en la interacción, se analizaron los efectos mediante el análisis de variancia de efectos simple para conocer el comportamiento la peso de la MS radicular debido a las fuentes fosfóricas en las diferentes dosis de la enmienda y viceversa.

Tabla 3.7

Análisis de variancia del peso de la MS de la raíz de maíz en suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021

FV	GL	SC	CM	Fc	p-valor	Sig
Tratamientos (T)	15	168.775	11.252	12.4	< 0.0001	**
F. fosfórica (P)	1	73.384	73.384	80.9	< 0.0001	**
Enmienda (E)	7	80.152	11.450	12.62	< 0.0001	**
P x E	7	15.239	2.177	2.40	0.043	*
Error	32	29.026	0.907			
Total	47	197.801				

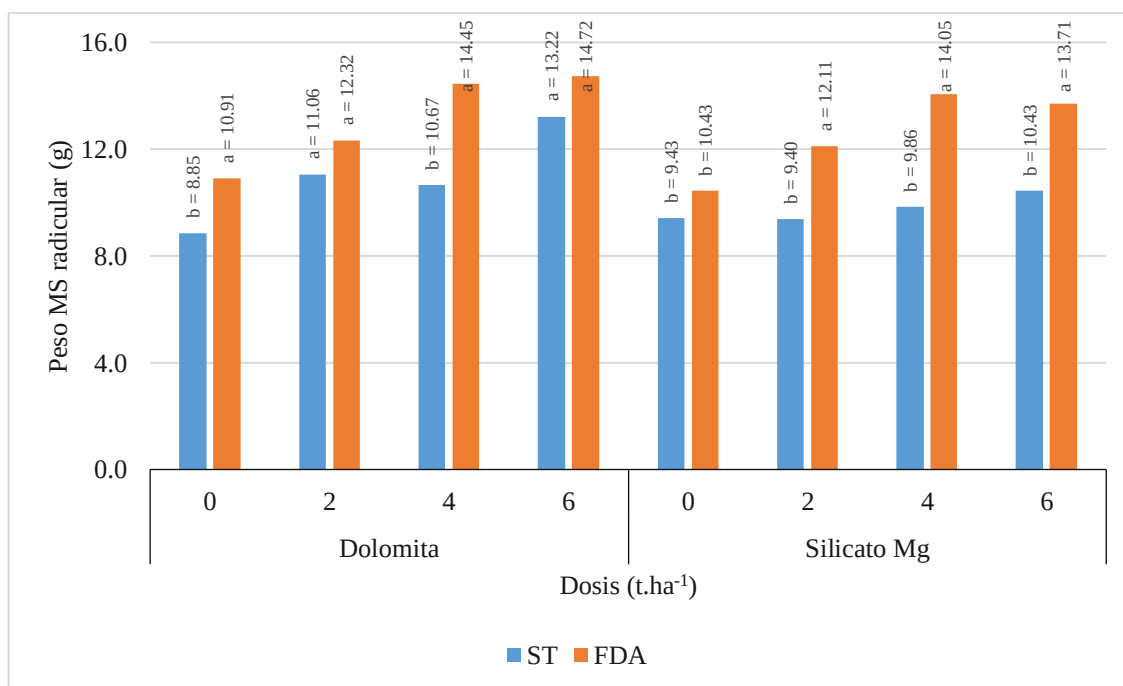
Promedio: 11.61 g

CV : 8.21 %

En el análisis de variancia de los efectos simples (Anexo 25), se observó que las fuentes de fósforo (ST, FDA) evaluadas a diferentes dosis de dolomita resultaron con diferencia significativa en los promedios de MS radicular, siendo mayor el FDA en comparación de ST, cuando se aplicó 0 y 4 t. ha⁻¹ de dolomita con promedios de 10.91 y 14.45 g de MS radicular respectivamente y sin diferencia estadística a dosis de 2 y 6 t. ha⁻¹ de dolomita (Figura 3.12); del mismo modo las fuentes de fósforo (ST, FDA) evaluadas en las diferentes dosis de silicato de magnesio resultaron con diferencia estadística significativa en los promedios de MS radicular, siendo mayor el FDA en comparación de ST, cuando se aplicó dosis de 2, 4 y 6 t. ha⁻¹ de silicato de magnesio con promedios de 12.11, 14.05 y 13.71 g de MS radicular respectivamente excepto cuando no se aplicó silicato de magnesio donde no hubo diferencia significativa (Figura 3.12).

Figura 3.12

Efecto de la aplicación de fuentes fosfóricas (ST, FDA) en las diferentes dosis de dolomita y silicato de magnesio en el peso de la MS radicular de un suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021. Prueba Tukey al 5%



La diferencia estadística significativa en el peso de la MS radicular podría verse influenciado por el desarrollo radicular al igual que la evaluación anterior mostraron diferencias significativas a causa de la solubilidad de las fuentes fosfóricas siendo de esta manera menos eficiente el ST por su elevada solubilidad (mayor a 900 g.L⁻¹), de esta

manera reaccionando rápidamente con las diferentes formas de aluminio del suelo que se encuentran en un pH bajo (menor a 5.5), en caso del FDA posee poca solubilidad (558 g.L^{-1}), siendo una fuente de fósforo de liberación lenta para ser aprovechados por las raíces de las plantas teniendo mayor desarrollo las raíces y consecuentemente un mayor peso seco del sistema radicular.

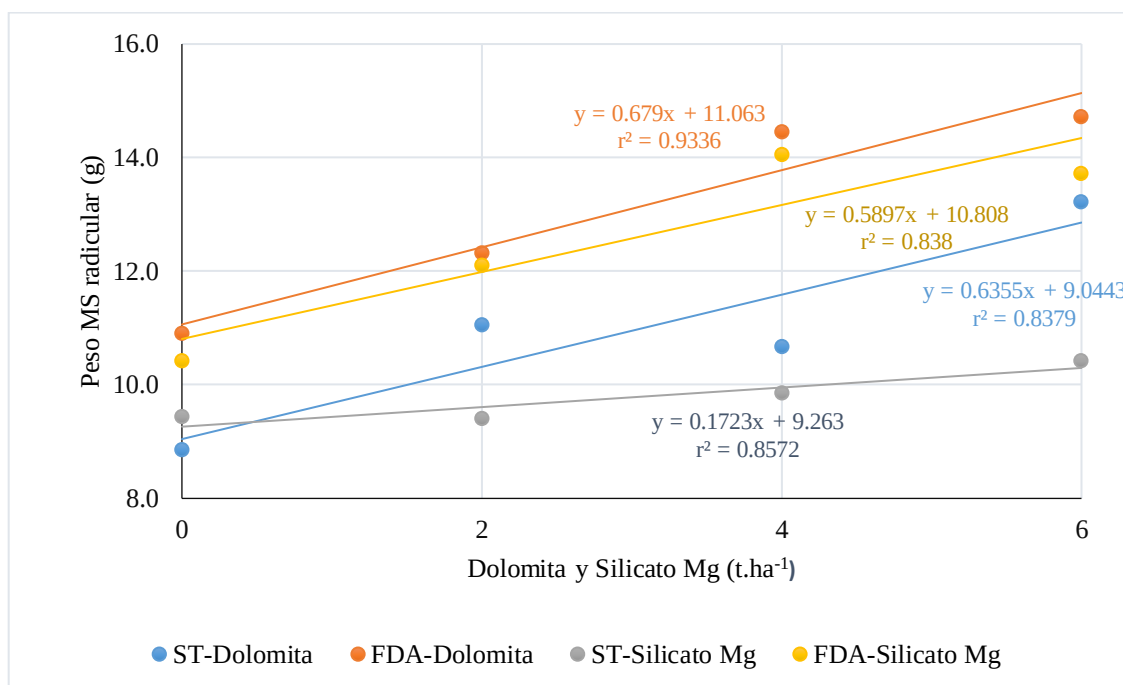
El efecto de las diferentes dosis de dolomita evaluadas en las fuentes fosfóricas (ST, FDA) resultaron con tendencias lineales positivas con diferencia estadística significativa (Anexo 25), de manera que a 6 t. ha^{-1} resultaron con pesos de MS radicular en promedio de 12.86 y 15.14 g respectivamente (Figura 3.13), del mismo modo el efecto de las diferentes dosis de silicato de magnesio evaluadas en las fuentes fosfóricas (ST, FDA), también resultaron con tendencias lineales positivas con diferencia estadística significativa (Anexo 25), de manera que a 6 t. ha^{-1} resultó con peso de MS radicular en promedio de 10.30 y 14.35 g respectivamente (Figura 3.13), en ambos casos se puede ver tanto la dolomita como el silicato de magnesio tuvieron tendencias lineales positivas los cuales a dosis crecientes de enmiendas hubo mayor desarrollo de las raíces del maíz.

El desarrollo radicular está influenciado por la concentración de elementos tóxicos en suelos ácidos como el aluminio y el manganeso (Havlin et al., 2017), siendo la dolomita una enmienda que minimiza el problema (Fageria et al., 2014; Fageria & Baligar, 2008) y silicato de magnesio (Cabral et al., 2008; Carvalho-Pupatto et al., 2004; Peregrina et al., 2008), las dos fuentes actúan de la misma manera elevando el pH y precipitando los elementos tóxicos como el aluminio y manganeso, permitiendo de esta manera el desarrollo radicular y por ende mayor producción de MS radicular.

En la figura 3.13 se observa que cuando incrementa la dosis de dolomita para las fuentes fosfóricas (ST, FDA), el peso de la MS radicular aumenta proporcionalmente, así por cada t. ha^{-1} adicional de dolomita aumenta 0.64 y 0.68 g en promedio, cuando se emplea ST y FDA respectivamente; de igual manera cuando se incrementa las dosis de silicato de magnesio para las fuentes fosfóricas (ST, FDA), el peso de MS radicular aumenta proporcionalmente, así por cada t. ha^{-1} adicional de silicato de magnesio aumenta 0.17 y 0.59 g en promedio cuando se emplea ST y FDA respectivamente.

Figura 3.13

Tendencia lineal del peso de la MS radicular del maíz por efecto de enmiendas de dolomita y silicato de magnesio en las fuentes fosfóricas (ST, FDA) en un suelo ácido de selva. Pichari, cusco 2021



3.2.3. *Materia seca del vástago*

En el análisis de variancia (ANVA) para el peso de la MS del vástago se observa en la tabla 3.8 y detallado en el anexo 27, resultaron que existe diferencia estadística significativa entre las enmiendas empleadas, producto de la evaluación biométrica realizada una vez concluida el experimento.

Tabla 3.8

Análisis de variancia de la MS del vástago del maíz en suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021

FV	GL	SC	CM	Fc	p-valor	Sig
Tratamientos (T)	15	180.678	12.0452	2.24	0.027	*
F. fosfórica (P)	1	1.841	1.8408	0.34	0.563	n.s.
Enmienda (E)	7	105.069	15.010	2.79	0.022	*
Dolomita lineal	1	25.798	25.798	4.80	0.036	*
Dolomita cuadrático	1	11.344	11.344	2.11	0.1561	n.s.
Dolomita cúbica	1	35.730	35.730	6.64	0.016	*
Silicato de Mg lineal	1	18.487	18.487	3.44	0.073	n.s.
Silicato de Mg cuadrático	1	5.060	5.060	0.94	0.339	n.s.
Silicato de Mg cúbica	1	8.640	8.640	1.61	0.214	n.s.
Dol vs Silicato de Mg	1	0.009	0.009	0.00	0.968	n.s.
P x E	7	73.768	10.5383	1.96	0.092	n.s.
Error	32	172.092	5.3779			
Total	47	352.770				

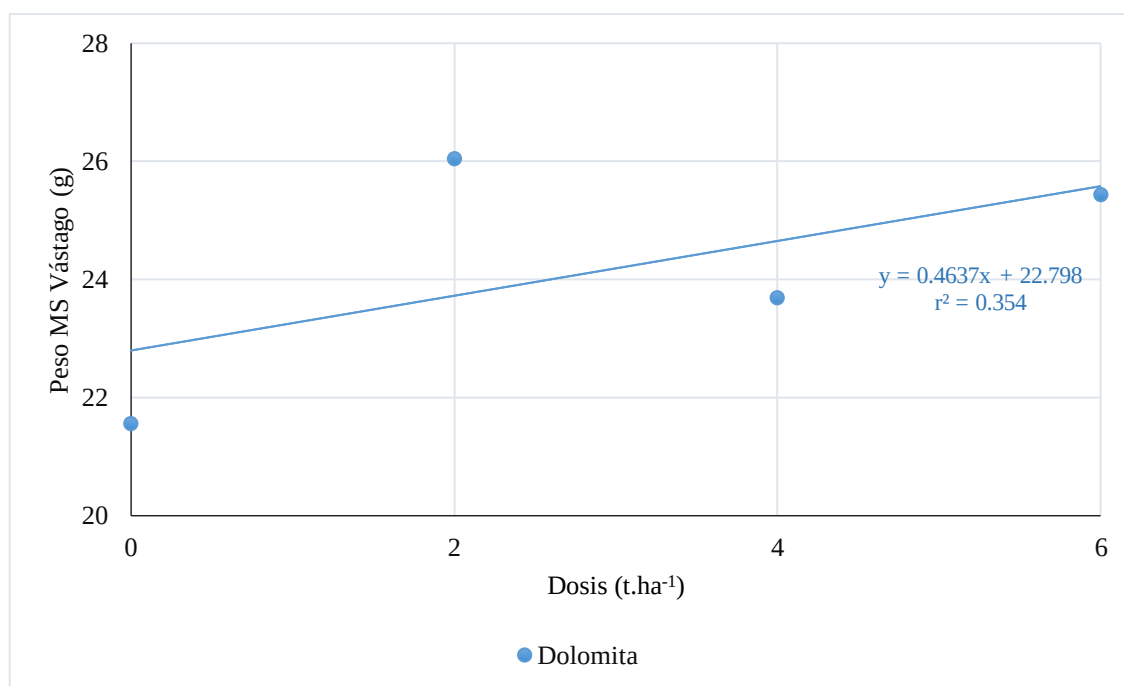
Promedio: 24.20 g

CV : 9.58 %

De acuerdo al análisis de varianza del cuadro anterior el efecto de la dolomita resultó con una diferencia estadística significativa y una tendencia lineal positiva de manera que a 6 t. ha⁻¹ resultó 25.57 g de MS del vástago en promedio (Figura 3.14), sin embargo, la aplicación del silicato de magnesio no tuvo diferencia estadística en la producción de MS del vástago del maíz en el presente experimento, además se puede observar que el coeficiente de variación es 9.58% que es considerado bajo (Pimentel, 1990), por lo tanto las observaciones son válidos para la variable de peso de MS del vástago.

Figura 3.14

Tendencia lineal del peso MS del vástago del maíz por efecto de la dolomita de un suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021



De acuerdo a los resultados con dolomita en el presente trabajo, resultados similares se han encontrado por Fageria & Baligar (2008), donde informaron que la mejora de los rendimientos de los cultivos debido al uso de cal dolomítica en los suelos ácidos están asociados a los cambios favorables en las características físicas, químicas y biológicas del suelo, de la misma manera Fageria et al. (2014), la aplicación de dolomita de 1.15 g.kg⁻¹ suelo tuvo una variación de 49% en el rendimiento de MS del vástago de soya con respecto al testigo. La aplicación de silicato de magnesio no tuvo diferencia significativa en el presente experimento, no obstante en diversos trabajos en condiciones de suelos ácidos tuvieron resultados con diferencia significativa con la aplicación de ésta fuente, es así que Cabral et al. (2008), menciona que a dosis crecientes de silicato de magnesio aplicados en surco y en área total tuvieron diferencias significativas con respecto al testigo, también la aplicación de escorias producto de la industria metálica contienen cantidades significativas de silicato de magnesio que contribuyeron a la producción de la biomasa aérea diferenciándose significativamente del testigo (Camargo et al., 2007; Carvalho-Pupatto et al., 2004; Peregrina et al., 2008).

3.2.4. *Altura de planta*

En el análisis de variancia (ANVA) para la altura de planta se observa en la tabla 3.9 y detallado en el anexo 28, resultaron que existe una diferencia estadística altamente significativa entre las interacciones de fuentes fosfóricas (P) y enmiendas (E), como resultado de la evaluación biométrica realizada una vez concluida el experimento. Como producto de la diferencia estadística en la interacción, se analizaron los efectos mediante el análisis de variancia de efectos simples (Anexo 29) para conocer el comportamiento de la altura de planta del maíz debido a la aplicación de fuentes fosfóricas en las diferentes dosis de la enmienda y viceversa.

Tabla 3.9

Análisis de variancia de la altura de planta del maíz en suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021

FV	GL	SC	CM	Fc	p-valor	Sig
Tratamientos (T)	15	371.313	24.754	6.680	<.0001	**
F. fosfórica (P)	1	22.687	22.688	6.120	0.02	*
Enmienda (E)	7	147.479	21.068	5.680	0.00	**
P x E	7	201.146	28.735	7.750	<.0001	**
Error	32	118.667	3.708			
Total	47	489.979				

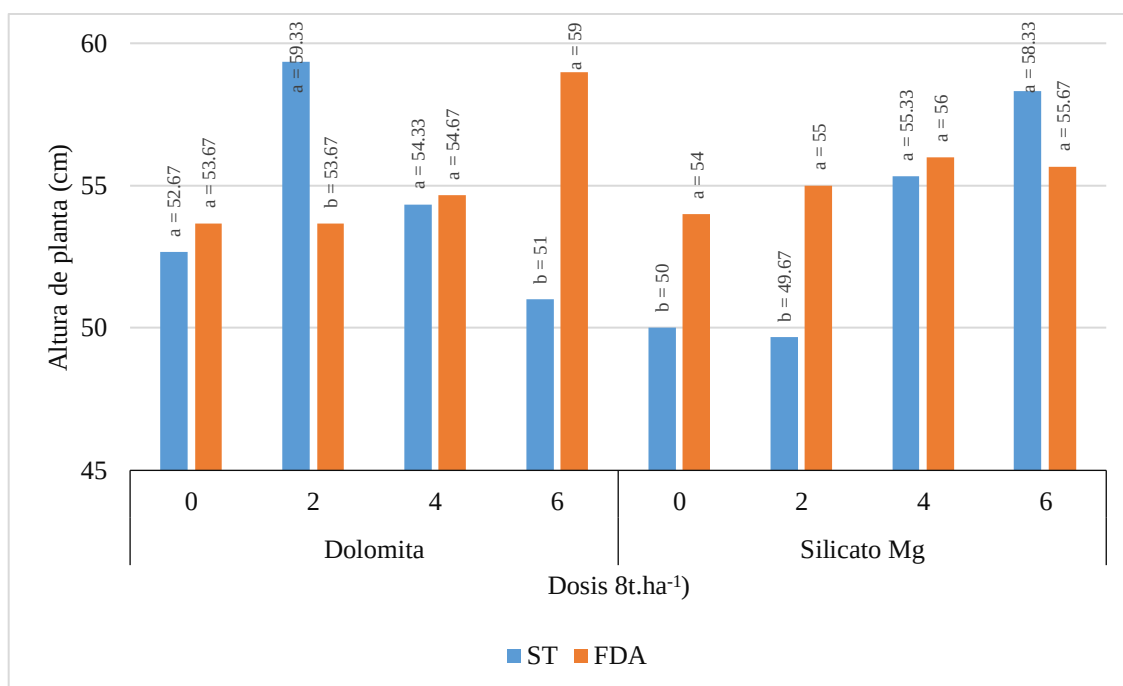
Promedio: 54.53 cm

CV : 3.53 %

En el análisis de variancia de efectos simples (Anexo 29), se observa que las fuentes de fósforo (ST, FDA) evaluadas en las diferentes dosis de dolomita y silicato de magnesio resultó de manera indistinta, este efecto se podría explicar por la influencia de la luz difusa en las cuales estuvieron sometidas las unidades experimentales por un periodo de 90 días, influyendo así la luz difusa en el en la variable altura del maíz en los diferentes tratamientos (Figura 3.15).

Figura 3.15

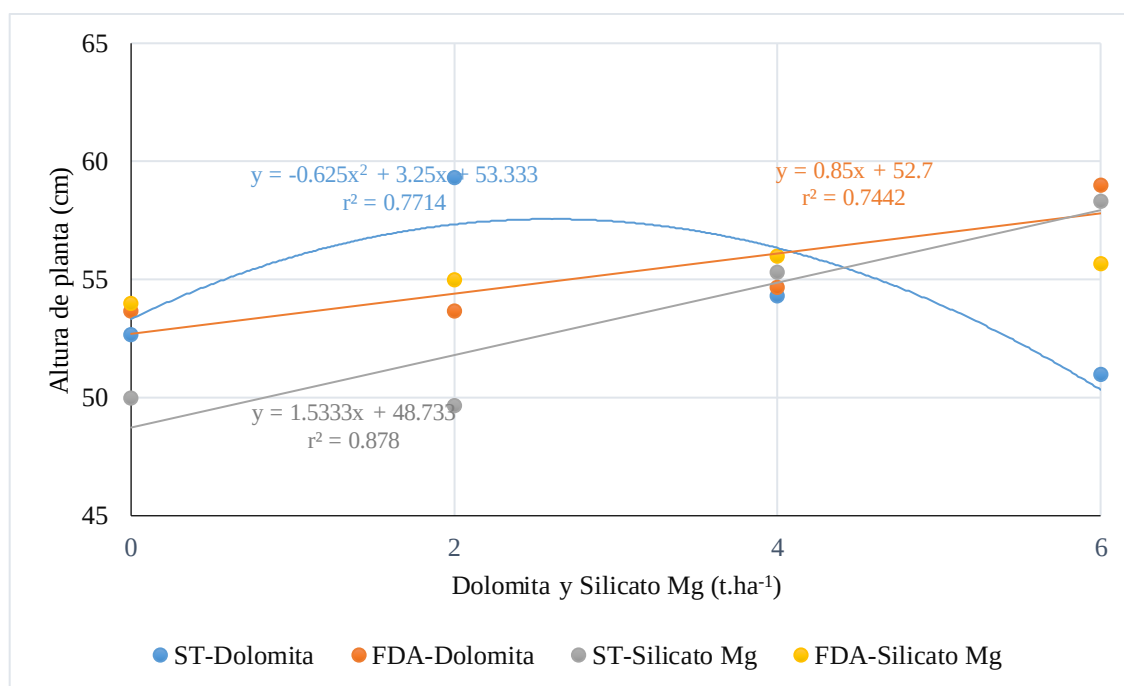
Efecto de la aplicación de fuentes fosfóricas (ST, FDA) en las diferentes dosis de dolomita y silicato de magnesio en la altura de planta de un suelo ácido de selva. Prueba Tukey al 5%



El efecto de las diferentes dosis dolomita evaluadas en el ST resultaron con una regresión cuadrática con diferencia estadística altamente significativa (Anexo 29, Figura 16), de manera que a 2.6 t. ha⁻¹ se tuvo la máxima altura de planta promedio con 54.96 cm de igual manera efecto de las diferentes dosis de dolomita evaluadas para el FDA, resultó con una tendencia lineal positiva con diferencia estadística altamente significativa (Anexo 29, Figura 16), de manera que a 6 t. ha⁻¹ resultó con 57.8 cm de altura planta en promedio, por último el efecto de las diferentes dosis de silicato de magnesio evaluadas en el ST, resultó con una regresión lineal y positiva con diferencia estadística significativa (Anexo 29, Figura 16), de manera que a 6 t. ha⁻¹ resultó con 57.93 cm de altura de planta en promedio y sin encontrar una interacción estadística significativa entre silicato de magnesio y FDA.

Figura 3.16

Tendencia lineal y cuadrática de la altura de planta del maíz por efecto de la dolomita y silicato de Mg con fuentes fosfóricas (ST, FDA) en un suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021



Fageria et al.(2014), afirma que la cal dolomítica mejoró significativamente el pH del suelo, los contenidos intercambiables de calcio y magnesio, saturación de bases y capacidad de intercambio efectiva, no obstante también disminuyó significativamente la acidez total, aluminio intercambiable, zinc y hierro del suelo dando buenos resultados en la producción de soya (Fageria et al., 2014), producción de frejol seco (Fageria, 2006); de igual manera la aplicación de silicato de magnesio aplicados como tal o como escorias básicas producto de la industria siderúrgica que contiene buenos contenidos de silicato de calcio y silicatos de magnesio, mejoraron significativamente el pH del suelo, contenidos de calcio, magnesio del mismo modo disminuyó la acidez total, aluminio intercambiable (Camargo et al., 2007; Carvalho-Pupatto et al., 2004; Peregrina et al., 2008).

CONCLUSIONES

1. En las características químicas del suelo la aplicación de 6 t. ha⁻¹ de dolomita incrementó significativamente a 5.15 y 4.93 para valores de pH; 2.34 y 2.51 cmol₍₊₎.kg⁻¹ calcio intercambiable con el ST y FDA respectivamente, también redujo significativamente el contenido de aluminio intercambiable a 0.17 y 0.32 cmol₍₊₎.kg⁻¹ con el ST y FDA respectivamente; el uso de silicato de magnesio a una dosis de 6 t. ha⁻¹ de incrementó a 4.58 y 4.41 para de valores de pH con el ST y FDA respectivamente no hubo diferencia significativa para el calcio intercambiable, pero redujo significativamente el contenido de aluminio intercambiable a 0.59 y 0.98 cmol₍₊₎.kg⁻¹ con ST y FDA respectivamente. A dosis creciente de dolomita y silicato de magnesio aumentó significativamente el magnesio intercambiable de modo que al aplicar 6 t. ha⁻¹ resultó con promedios de 0.95 y 0.81 cmol₍₊₎.kg⁻¹ respectivamente.
2. En las variables biométricas a una dosis de 6 t. ha⁻¹ de dolomita aumentó significativamente la longitud de raíz y el peso de MS radicular, siendo 27.60 y 20.27 cm para longitud de raíz, 12.86 y 15.14 g de materia seca radicular con el ST y FDA respectivamente; asimismo, la aplicación de 6 t. ha⁻¹ de silicato de magnesio aumentó significativamente la longitud de raíz y el peso de materia seca radicular siendo 21.10 y 25.40 cm para la longitud de raíz, 10.30 y 14.35 g para la materia seca radicular cel ST y FDA respectivamente y sólo la aplicación de dolomita a una dosis de 6 t. ha⁻¹ aumentó significativamente a 25.57 g de materia seca del vástago. La aplicación de 6 t. ha⁻¹ dolomita alcanzó la máxima altura de maíz de 54.96 cm con el ST, 57.8 cm con el FDA y de 57.93 cm con el ST.

RECOMENDACIONES

1. Tener en cuenta la textura y el contenido de materia orgánica ya que estos influyen en el cambio de pH de los suelos, al poseer un poder de amortiguamiento al cambio de pH de suelo.
2. Al momento de la aplicación de la enmienda cálcica y silícica para que reaccione completamente con el suelo y proporcione resultados adecuados y más aún si se trabaja en condiciones de invernadero donde la única fuente de variación viene a ser el tratamiento empleado.
3. Tener en cuenta el tamaño de las partículas de las enmienda cálcica y silícica ya que esta característica determinará la velocidad de reacción en el suelo. Ya que a medida que la partícula cada vez es más fina, presenta mayor superficie específica entonces tendrá mayor reactividad en el suelo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alewell, C. (2003). Acid Inputs into the Soils from Acid Rain. In Z. Rengel (Ed.), *Handbook of Soil Acidity* (p. 496). Marcel Dekker.
<https://doi.org/10.1201/9780203912317.ch3>
- Álvarez, C., & Osorio, W. (2014). *Silicio Agronomicamente Esencial*. Universidad Nacional de Colombia.
- Blake, L. (2004). Acid Rain and Soil Acidification. In D. Hillel (Ed.), *Encyclopedia of Soils in the Environment* (p. 2200). Academic Press.
- Bohn, H., McNeal, B., & O'Connor, G. (2001). *Soil Chemistry* (3rd ed.). Wiley.
- Bolan, N. S., Adriano, D. C., & Curtin, D. (2003). Soil acidification and liming interactions with nutrient and heavy metal transformation and bioavailability. *Advances in Agronomy*, 78, 215–272. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(02\)78006-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(02)78006-1)
- Braga, G. (2006). Eficiência de fosfatos com solubilidade variável em água em solos com capacidade de fixação de fósforo induzida. *Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz*.
- Brassioli, F., Prado, R., & Fernandes, F. (2009). Avaliação agronômica da escória de siderurgia na cana-de-açúcar durante cinco ciclos de produção. *Bragantia*, 68(2), 381–387. <https://doi.org/10.1590/s0006-87052009000200012>
- Cabral, N., Venancio, R., Silva, M., Brito, J., Carbone, M., & Seron, H. (2008). Formas de aplicação de silicato de cálcio e magnésio na cultura do sorgo em neossolo quartzarênico de cerrado. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 38.
- Camargo, M., Seron, H., Korndorfer, G., Araujo, A., & Borges, C. (2007). Soil reaction and absorption of silicon by rice. *Scientia Agricola*, 64(2), 176–180. <https://doi.org/10.1590/s0103-90162007000200011>
- Carvalho-Pupatto, J., Büll, L., & Costa, C. (2004). Soil chemical attributes, root growth and rice yield according to slag application. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 39(12), 1213–1218. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2004001200008>
- Chen, D., Lan, Z., Bai, X., Grace, J. B., & Bai, Y. (2013). Evidence that acidification-induced declines in plant diversity and productivity are mediated by changes in below-ground communities and soil properties in a semi-arid steppe. *Journal of Ecology*, 101(5), 1322–1334. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12119>
- Chesworth, W. (1992). Weathering systems. In I. Martini & W. Chesworth (Eds.),

- Developments in Earth Surface Processes (Vol. 2, Issue C, pp. 19–40). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-89198-3.50007-6>
- Chung, F. (2019). Fuentes enclantes y fosfatadas en la recuperación de un suelo ácido de Tingo María, en maíz (*Zea mays* L.) en invernadero. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Conislla, A. (2019). Clima del distrito de Pichari. Municipalidad distrital de Pichari, Cusco. Pichari: Mejoramiento de capacidades para el ordenamiento territorial y el mejor uso de los suelos de Pichari, distrito de Pichari -La Convención -Cusco.
- Dávila, E. (2019). Uso de enmiendas en la reducción del contenido de cadmio en el suelo y en los granos de cacao (*Theobroma cacao* L.) clon ccn-51. Universidad Agraria La Selva.
- Edmeades, D. C., & Perrott, K. W. (2004). The calcium requirements of pastures in New Zealand: A review. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 47(1), 11–21. <https://doi.org/10.1080/00288233.2004.9513566>
- Encina, K. (2017). Escoria Básica y Carbonato de Calcio en la Recuperación de un Suelo Ácido de Tingo María, en Maíz (*Zea mays*) PM 213 en Invernadero. Universidad Nacional Agraria la Molina ULALM.
- Espinosa, J. (2001). Acidez y enclado de los Suelos (F. Silva (ed.); 2nd ed.). Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo.
- Espinoza, N. (2019). Efecto de cuatro dosis de dolomita en las propiedades físicas y químicas del suelo en una plantación de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* “Pino Chuncho”, en Antonio Raimondi - Las vegas - Daniel Alomía Robles. Universidad Nacional Agraria De La Selva.
- Essington, M. (2015). Soil and water chemistry. An integrative approach (2nd ed.). CPC Pres.
- Fageria, N. (2006). Liming and copper fertilization in dry bean production on an oxisol in no-tillage system. *Journal of Plant Nutrition*, 29(7), 1219–1228. <https://doi.org/10.1080/01904160600767435>
- Fageria, N., & Baligar, V. (2008). Ameliorating Soil Acidity of Tropical Oxisols by Liming For Sustainable Crop Production. In Elsevier Inc (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 99, Issue 08, pp. 345–399). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)00407-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)00407-0)
- Fageria, N., Baligar, V., & Zobel, R. (2007). Yield, nutrient uptake, and soil chemical properties as influenced by liming and boron application in common bean in a no-

- tillage system. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 38(11–12), 1637–1653. <https://doi.org/10.1080/00103620701380413>
- Fageria, N., Moreira, A., Moraes, L., & Moraes, M. (2014). Influence of Lime and Gypsum on Yield and Yield Components of Soybean and Changes in Soil Chemical Properties. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 45(3), 271–283. <https://doi.org/10.1080/00103624.2013.861906>
- Fageria, N., & Nascente, A. (2014). Management of soil acidity of South American soils for sustainable crop production. In D. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 128, pp. 221–275). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802139-2.00006-8>
- Fassbender, H., & Bornemisza, E. (1987). *Química de suelos: Con énfasis en suelos de América Latina* (2nd ed.). IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura).
- George, E., Horst, W. J., & Neumann, E. (2012). Adaptation of Plants to Adverse Chemical Soil Conditions. In Marschner's *Mineral Nutrition of Higher Plants* (3rd ed., pp. 409–472). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00017-0>
- Havlin, J., Tisdale, S., Nelson, W., & Beaton, J. (2017). *Soil Fertility and Fertilizers An Introduction to Nutrient Management* (8th ed.). Pearson.
- Hawkesford, M., Horst, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring, J., Møller, I. S., & White, P. (2012). Functions of Macronutrients. In Marschner's *Mineral Nutrition of Higher Plants: Third Edition* (3rd ed.). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00006-6>
- Haynes, R. (1982). Effects of liming on phosphate availability in acid soils - A critical review. *Plant and Soil*, 68(3), 289–308. <https://doi.org/10.1007/BF02197935>
- Hopking, B. G. (2015). Phosphorus. In A. V. Barker & D. J. Pilbeam (Eds.), *Handbook of Plant Nutrition* (2nd ed., pp. 65–126). CRC Press.
- Hsu, P. (1965). Fixation of Phosphate by Aluminum and Iron in Acidic Soils. *Soils Science*, 99(6), 398–402.
- INIA. (2017). Manual de procedimientos de los análisis de suelos y agua con fines de riego. In Ministerio de Agricultura de Riego (pp. 1–92).
- Loeppert, R., & Sparks, D. (1996). Carbonate and Gypsum. In D. Sparks, A. Page, P. Helmke, & R. Loeppert (Eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 3: Chemical Methods* (pp. 437–474). Soil Science Society of America and American Society

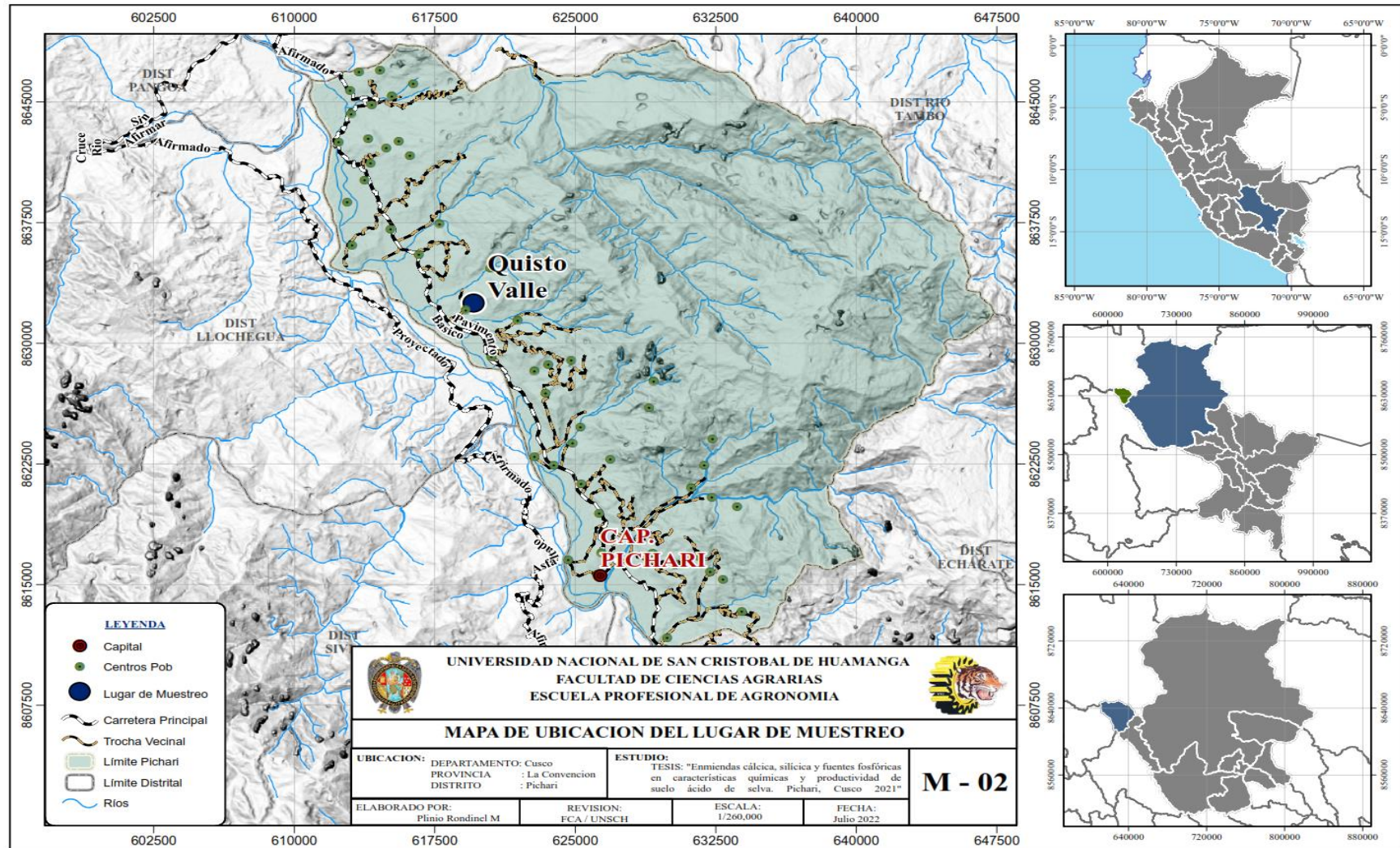
of Agronomy.

- Manahan, S. (2017). *Environmental Chemistry* (G. Taylor & Francis (ed.); 10th ed.) [CRC Press]. <https://doi.org/10.1021/ed078p1169>
- Matichenkov, V. . (2008). Deficiencia y funcionalidad del sílice en suelos, cosechas y alimentos. 431–438.
- Mengel, K., & Kirkby, E. (2001). Principles of plant nutrition. In H. Kosegarten & T. Appel (Eds.), *Nature*. <https://doi.org/10.1038/278101a0>
- Mengel, K., Kirkby, E., Kosegarten, H., & Appel, T. (2001). *Principles of Plant Nutrition* (Springer Science (ed.); 5th ed.). Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/DOI 10.1007/978-94-010-1009-2>
- Navarro, G., & Navarro, S. (2013). *Química Agrícola* (3rd ed.). Mundi Prensa.
- Olego, M. A., Visconti, F., Quiroga, M. J., de Paz, J. M., & Garzón-Jimeno, E. (2016). Assessing the effects of soil liming with dolomitic limestone and sugar foam on soil acidity, leaf nutrient contents, grape yield and must quality in a mediterranean vineyard. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 14(2), 1–13. <https://doi.org/10.5424/sjar/2016142-8406>
- Pagani, A., & Mallarino, A. P. (2012). Soil pH and Crop Grain Yield as Affected by the Source and Rate of Lime. *Soil Science Society of America Journal*, 76(5), 1877–1886. <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0119>
- Peregrina, F., Mariscal, I., Ordóñez, R., González, P., Terefe, T., & Espejo, R. (2008). Agronomic Implications of Converter Basic Slag as a Magnesium Source on Acid Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 72(2), 402–411. <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0197>
- Pimentel, F. (1990). *Curso de estadística experimental* (Livraria Nobel S.A. (ed.)).
- Porta, J., Lopez - Acevedo M., & Poch, M. (2014). *Edafología uso y Protección del Suelo* (3rd ed.). Mundi Prensa.
- Prado, R., & Fernandes, F. (2003). Efeito residual da escória de siderurgia como corretivo de acidez do solo na soqueira de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 25(1), 199–207. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832001000100021>
- Ricse, E. (2018). Efecto de enmiendas en un suelo ácido con cultivo de *Phaseolus vulgaris* L ., variedad norteño - Satipo. Universidad Nacional del Centro del Perú.
- Rosas, J. (2021). Efectos de la aplicación de dolomita y magnocal en la dinámica del suelo y crecimiento vegetativo del cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) en Neshuya - Padre Abad. Universidad nacional de Ucayali.

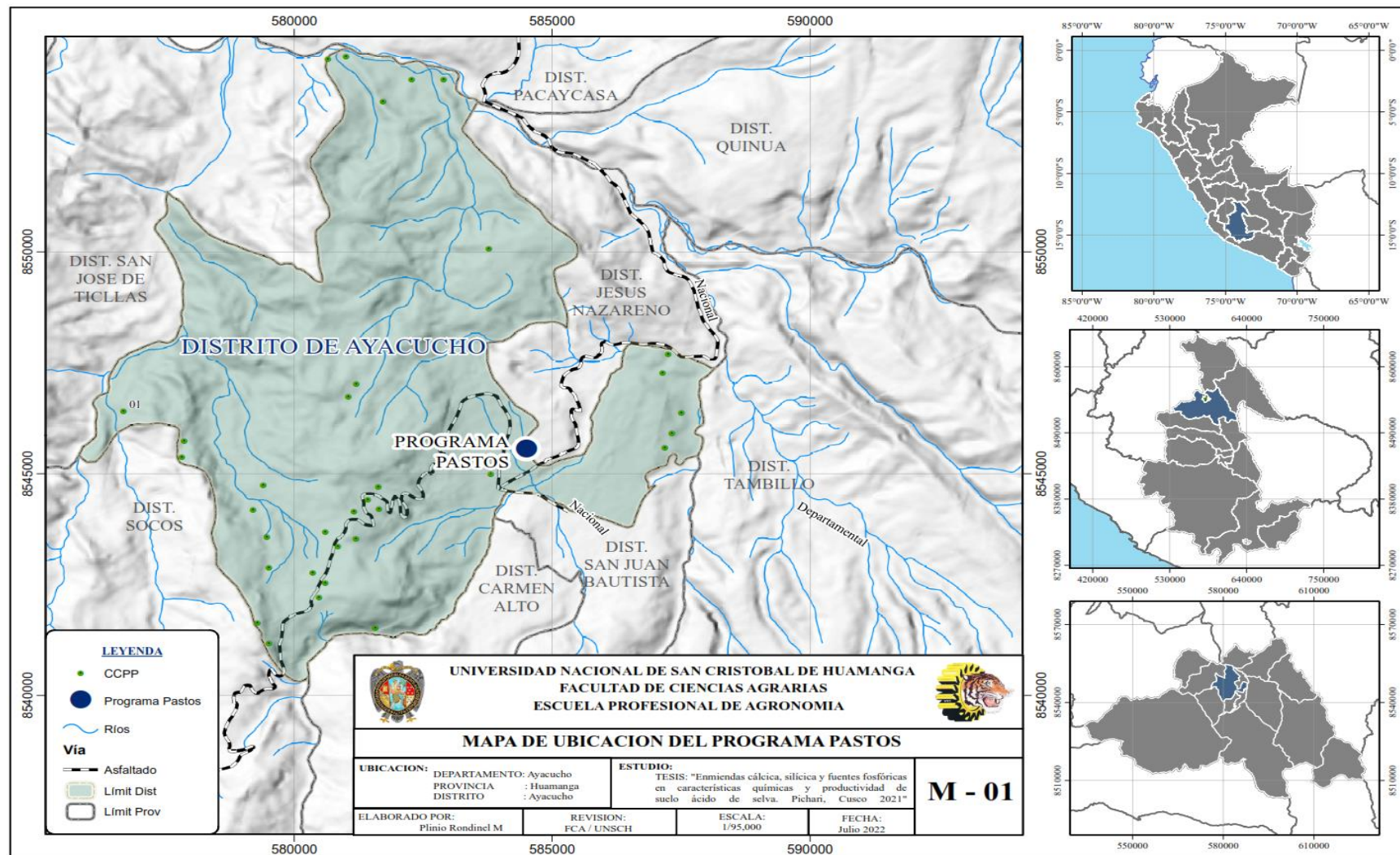
- Sanyal, S. K., & De Datta, S. K. (1991). Chemistry of Phosphorus Transformations in Soil. In *Advances in Soil Science* (Vol. 16, pp. 1–120). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3144-8_1
- Snyder, G., Matichenkov, V., & Datnoff, L. (2007). Silicon. In A. Barker & D. Pilbeam (Eds.), *Handbook of Plant Nutrition* (pp. 551–568). Taylor & Francis Group.
<https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2021.01.003>
- Sparks, D. (2003). *Environmental Soil Chemistry* (2nd ed.). Academic Press.
- Strawn, D. G., Bohn, H. L., & O'Connor, G. A. (2020). *Soil Chemistry* (5th ed.). Wiley-Blackwell.
- Tan, K. H. (2011). *Principles of Soil Chemistry* (4th ed.). CRC Press.
- Weil, R., & Brady, N. (2017). *The Nature and Properties of Soils* (15th ed.). Pearson.
- Yi, H., Xu, G., Cheng, H., Wang, J., Wan, Y., & Chen, H. (2012). An Overview of Utilization of Steel Slag. *Procedia Environmental Sciences*, 16, 791–801.
<https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.10.108>
- Zapata, R. (2004). *Química de la Acidez del Suelo*. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellin.

ANEXOS

Anexo 1. Ubicación del lugar de muestreo de suelo.



Anexo 2. Ubicación del lugar de la ejecución del experimento.



Anexo 3. Análisis de caracterización del suelo de Quisto Valle al inicio del experimento.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
PROGRAMA DE INVESTIGACION EN PASTOS Y GANADERIA
LABORATORIO DE SUELOS Y ANALISIS FOLIAR
Jr. Abraham Valdelomar N° 249 – Telf. 315936 966942996
Ayacucho – Perú
"Año del Fortalecimiento de la soberanía Nacional"

Región : Cusco HR. 0023
Provincia : La Convención
Distrito : Pichari
Comunidad : Quisto Valle E: 619611 N: 8632454 Z: 676msnm
Proyecto : "Tesis"
Solicitante : Sr. Plinio Rondinel Mora

ANALISIS DE CARACTERIZACION

Muestra	Análisis mecánico (%)			Clase Textural	pH (H ₂ O) 1:2.5	C. E. (dS/m.) 1:1	CaCO ₃ (%)	M.O. (%)	Nt (%)	Elementos Disp. (ppm)		Cationes cambiabiles (Cmol(+)Kg)						C. I. C. (Cmol(+)Kg)
	Arena	Limo	Arcilla							P	K	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ⁺⁺⁺	H ⁺	
01	76.2	10.9	12.9	Fr-Ao	4.86	0.14	0.0	1.36	0.07	12.4	147.2	0.48	0.40	0.75	0.18	1.3	0.1	10.8

Ayacucho, 18 de Febrero del 2022.

LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS
PLANTA, AGUAS Y FERTILIZANTES
RESPONSABLE
Juan B. Giron Molina
C.I.P. 77120

Ao: Arenoso, AoFr: Arena franca; FrAo: Franco arenosos; Fr: Franco; FrL: Franco limoso; L: Limoso; FrArAo: Franco arcillo arenoso; FrAr: Franco arcilloso; FrAr: Franco arcillosos; FrArL: Franco arcillo limoso; ArAo: Arcillo arenoso; ArL: Arcillo limoso; Ar: Arcilloso

Anexo 4. Análisis de caracterización del suelo de Quisto Valle al finalizar el experimento.



MULTISERVICIOS AGROLAB

INGENIEROS TRABAJANDO POR UN AGRO SOSTENIBLE

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES

ANÁLISIS DE SUELOS : CARACTERIZACIÓN

ASESORÍA Y CAPACITACIÓN EN:

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

Solicitante: Sr. Plinio Rondinel Mora

Departamento: Cusco

Provincia: La Convención

Distrito: Pichari

Proyecto: Enmienda cálcica, silícica y fuentes fosfóricas en características químicas y productividad de suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021.

Fecha: 12/09/2022

Numero de Muestra		pH (1:1)	C.E. dS.m ⁻¹	CaCO ³ %	Nt %	MO %	P ppm	K ppm	Analisis Mecanico			Clase Textural	CIC	Cationes cambiabiles					% Sat. De Bases
Lab	Campo								Arena %	Limo %	Arcilla %			Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ⁺⁺	
11744	T1-I	4.06	0.18	0.00	0.11	2.25	4.82	32.5					7.23	1.50	0.43	0.04	0.07	2.02	28
11745	T1-II	4.02	0.15	0.00	0.11	2.28	5.19	35.0					7.10	1.42	0.35	0.05	0.08	1.96	27
11746	T2-I	4.48	0.12	0.00	0.11	2.16	5.90	39.0					7.42	1.75	0.56	0.07	0.05	1.08	33
11747	T2-II	4.44	0.12	0.00	0.11	2.17	6.30	37.5					7.36	1.80	0.58	0.04	0.09	1.20	34
11748	T3-I	4.76	0.12	0.00	0.10	2.00	6.86	35.5					6.91	1.92	0.74	0.04	0.08	0.58	40
11749	T3-II	4.64	0.12	0.00	0.10	2.02	6.75	35.0					7.68	1.77	0.67	0.05	0.07	0.74	33
11750	T4-I	5.19	0.16	0.00	0.10	1.98	8.53	45.0					7.10	2.51	1.00	0.08	0.06	0.25	51
11751	T4-II	4.20	0.16	0.00	0.10	1.94	7.56	53.0					7.49	2.40	0.91	0.08	0.10	0.28	47



Ph. D. MARILYN CERDA GÓMEZ
Responsable de Laboratorio

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

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



MULTISERVICIOS AGROLAB

INGENIEROS TRABAJANDO POR UN AGRO SOSTENIBLE

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES

ANÁLISIS DE SUELOS : CARACTERIZACIÓN

ASESORÍA Y CAPACITACIÓN EN:

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

Solicitante: Sr. Plinio Rondinel Mora

Departamento: Cusco

Provincia: La Convención

Distrito: Pichari

Proyecto: Enmienda cálcica, silícica y fuentes fosfóricas en características químicas y productividad de suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021.

Fecha: 12/09/2022

Numero de Muestra		pH (1:1)	C.E. dS.m ⁻¹	CaCO ³ %	Nt %	MO %	P ppm	K ppm	Analisis Mecanico			Clase Textural	CIC	Cationes cambiabiles					% Sat. De Bases
Lab	Campo								Arena	Limo	Arcilla			Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ⁺⁺	
														Cmol(+).kg ⁻¹					
11752	T5-I	4.08	0.11	0.00	0.10	2.08	4.85	35.0					8.13	1.29	0.36	0.05	0.07	1.97	22
11753	T5-II	4.07	0.14	0.00	0.10	2.14	6.03	38.0					7.87	1.29	0.34	0.07	0.06	2.04	23
11754	T6-I	4.22	0.13	0.00	0.10	2.05	7.65	31.0					7.04	1.36	0.46	0.05	0.09	1.50	27
11755	T6-II	4.23	0.11	0.00	0.10	2.01	6.69	34.5					7.04	1.40	0.48	0.04	0.07	1.55	27
11756	T7-I	4.45	0.13	0.00	0.10	2.08	7.74	30.5					7.23	1.24	0.68	0.08	0.06	1.08	24
11757	T7-II	4.44	0.13	0.00	0.10	2.11	7.74	36.5					7.23	1.11	0.61	0.03	0.07	1.14	22
11758	T8-I	4.52	0.31	0.00	0.10	2.06	7.47	32.5					6.85	1.21	0.88	0.07	0.06	0.52	25
11759	T8-II	4.61	0.12	0.00	0.10	2.05	8.00	37.0					7.68	1.17	0.83	0.06	0.07	0.62	22



Ph. D. MARILENI CERDA GÓMEZ
Responsable de Laboratorio

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

Urb. Mariscal Cáceres Mz. "G-12" - Ayacucho / ☎ (066) 312049 - 📞 966638028 - 966631889 / 📠 982781298 ✉ agrolab01@yahoo.es - agrolab107@gmail.com



MULTISERVICIOS AGROLAB

INGENIEROS TRABAJANDO POR UN AGRO SOSTENIBLE

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES

ANÁLISIS DE SUELOS : CARACTERIZACIÓN

ASESORÍA Y CAPACITACIÓN EN:

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

Solicitante: Sr. Plinio Rondinel Mora

Departamento: Cusco

Provincia: La Convención

Distrito: Pichari

Proyecto: Enmienda cálcica, silícica y fuentes fosfóricas en características químicas y productividad de suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021.

Fecha: 12/09/2022

Numero de Muestra		pH	C.E. dS.m ⁻¹	CaCO ³ %	Nt %	MO %	P ppm	K ppm	Analisis Mecanico			Clase Textural	CIC	Cationes cambiabiles					% Sat. De Bases
Lab	Campo								Arena	Limo	Arcilla			Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ⁺⁺	
														Cmol (+).kg ⁻¹					
		(1:1)							%	%	%								
11760	T9-I	3.99	0.12	0.00	0.10	2.06	5.10	32.0					7.49	1.21	0.36	0.08	0.06	1.98	23
11761	T9-II	4.05	0.11	0.00	0.10	2.09	4.92	32.5					7.30	1.15	0.35	0.06	0.05	1.99	22
11762	T10-I	4.36	0.13	0.00	0.10	2.00	5.75	37.0					7.36	1.68	0.53	0.06	0.09	1.32	32
11763	T10-II	4.37	0.24	0.00	0.10	2.01	5.63	38.0					7.42	1.83	0.56	0.09	0.08	1.28	34
11764	T11-I	4.58	0.11	0.00	0.10	2.00	6.33	39.5					7.36	1.95	0.66	0.09	0.08	0.82	38
11765	T11-II	4.55	0.13	0.00	0.10	2.00	7.84	40.0					6.46	1.99	0.79	0.05	0.06	0.85	45
11766	T12-I	4.96	0.15	0.00	0.10	1.98	7.67	45.0					7.42	2.59	1.02	0.10	0.10	0.35	51
11767	T12-II	4.95	0.15	0.00	0.09	1.89	7.56	44.0					7.87	2.50	0.95	0.06	0.08	0.38	46



Ph. D. MARLENI CERBA GÓMEZ
Responsable de Laboratorio

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

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



MULTISERVICIOS AGROLAB

INGENIEROS TRABAJANDO POR UN AGRO SOSTENIBLE

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES

ANÁLISIS DE SUELOS : CARACTERIZACIÓN

ASESORÍA Y CAPACITACIÓN EN:

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

Solicitante: Sr. Plinio Rondinel Mora

Departamento: Cusco

Provincia: La Convención

Distrito: Pichari

Proyecto: Enmienda cálcica, silícica y fuentes fosfóricas en características químicas y productividad de suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021.

Fecha: 12/09/2022

Numero de Muestra		pH (1:1)	C.E. dS.m ⁻¹	CaCO ₃ %	Nt %	MO %	P ppm	K ppm	Análisis Mecánico			Clase Textural	CIC	Cationes cambiables					% Sat. De Bases
Lab	Campo								Arena	Limo	Arcilla			Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ⁺⁺	
									%	%	%			Cmol (+). kg ⁻¹					
11768	T13-I	3.99	0.18	0.00	0.11	2.24	6.69	36.5					7.68	1.35	0.31	0.11	0.09	1.99	25
11769	T13-II	4.03	0.16	0.00	0.11	2.2	6.47	31.0					6.78	1.18	0.35	0.05	0.05	2.04	24
11770	T14-I	4.17	0.17	0.00	0.10	2.11	9.23	30.5					7.74	1.37	0.41	0.04	0.05	1.60	24
11771	T14-II	4.20	0.14	0.00	0.10	2.13	7.30	34.0					7.62	1.30	0.35	0.06	0.06	1.74	24
11772	T15-I	4.27	0.14	0.00	0.09	1.92	8.18	31.0					6.85	1.22	0.63	0.06	0.07	1.32	25
11773	T15-II	4.30	0.16	0.00	0.10	2.03	7.65	28.0					7.49	1.20	0.58	0.07	0.08	1.44	23
11774	T16-I	4.38	0.15	0.00	0.10	2.03	10.19	36.5					7.55	1.16	0.80	0.09	0.05	1.00	22
11775	T16-II	4.41	0.12	0.00	0.11	2.22	8.39	34.0					7.81	1.31	0.83	0.08	0.04	0.92	24



[Firma]
Ph. D. MARIENI CERDA GÓMEZ
Responsable de Laboratorio

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

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

Anexo 5. Análisis de variancia del pH en suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021.

FV	GL	SC	CM	Fc	p-valor	Sig.
Tratamientos (T)	15	3.4250	0.2280	208.19	<.0001	**
F. fosfórica (P)	1	0.1070	0.1070	97.51	<.0001	**
Enmienda (E)	7	3.2800	0.4690	427.17	<.0001	**
Dol lin	1	2.2512	2.2512	2052.38	<.0001	**
Dol cuad	1	0.0036	0.0036	3.28	0.0889	n.s.
Dol cúb	1	0.0296	0.0296	27.03	<.0001	**
Si Mg lin	1	0.4337	0.4337	395.35	<.0001	**
Si Mg cuad	1	0.0023	0.0023	2.06	0.1708	n.s.
Si Mg cúb	1	0.0004	0.0004	0.33	0.574	n.s.
Dol vs Si Mg	1	0.5592	0.5592	509.77	<.0001	n.s.
P * E	7	0.0390	0.0060	5.03	0.0036	**
Error	16	0.0180	0.0010			
Total	31	3.4430				
- Coeficiente de determinación (R^2) : 99.49%						
- Coeficiente de variación : 0.75%						
- Promedio de la variable pH del suelo : 4.41						
Prueba de normalidad de errores----- Test por Shapiro - Wilk						
p-valor = 0.6222						
Prueba de homogeneidad de varianzas----- Test por Bartlett						
p-valor = 0.7082						

Anexo 6. Análisis de variancia de efectos simples del pH en suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021.

FV	GL	SC	CM	Fc	p-valor	Sig.
P en Dol 0	1	0.0004	0.0004	0.36	0.5544	n.s.
P en Dol 2	1	0.0090	0.0090	8.23	0.0111	**
P en Dol 4	1	0.0182	0.0182	16.62	0.0009	**
P en Dol 6	1	0.0576	0.0576	52.51	<.0001	**
P en Si Mg 0	1	0.0042	0.0042	3.85	0.0673	n.s.
P en Si Mg 2	1	0.0016	0.0016	1.46	0.2447	n.s.
P en Si Mg 4	1	0.0256	0.0256	23.34	0.0002	**
P en Si Mg 6	1	0.0289	0.0289	26.35	0.0001	**
Dol en ST	3					
Dol en ST lin	1	1.3727	1.3727	1251.47	<.0001	**
Dol en ST cuad	1	0.0028	0.0028	2.56	0.1289	n.s.
Dol en ST cúb	1	0.0189	0.0189	17.25	0.0007	**
Si Mg en ST	3					
Si Mg en ST lin	1	0.2856	0.2856	260.39	<.0001	**
Si Mg en ST cuad	1	0.0005	0.0005	0.41	0.5309	n.s.
Si Mg en ST cúb	1	0.0029	0.0029	2.63	0.1241	n.s.
Dol en FDA	3					
Dol en FDA lin	1	0.9030	0.9030	823.25	<.0001	**
Dol en FDA cuad	1	0.0010	0.0010	0.92	0.351	n.s.
Dol en FDA cúb	1	0.0112	0.0112	10.23	0.005	**
Si de Mg en FDA	3					
Si Mg en FDA lin	1	0.1575	0.1575	143.59	<.0001	**
Si Mg en FDA cuad	1	0.0021	0.0021	1.93	0.1842	n.s.
Si Mg en FDA cúb	1	0.0007	0.0007	0.66	0.4289	n.s.

Anexo 7. Prueba de Tukey de efectos simples del pH en suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021.

Tratamiento	Fósforo	Enmienda	Promedio	n	Tukey (0.05)
T ₀₁	Super triple	Dolomita 0	4.04	2	a
T ₀₉	Fosfato diamónico	Dolomita 0	4.02	2	a
T ₀₂	Super triple	Dolomita 2	4.46	2	a
T ₁₀	Fosfato diamónico	Dolomita 2	4.37	2	b
T ₀₃	Super triple	Dolomita 4	4.70	2	a
T ₁₁	Fosfato diamónico	Dolomita 4	4.57	2	b
T ₀₄	Super triple	Dolomita 6	5.20	2	a
T ₁₂	Fosfato diamónico	Dolomita 6	4.96	2	b
T ₀₅	Super triple	Silicato de Mg 0	4.08	2	a
T ₁₃	Fosfato diamónico	Silicato de Mg 0	4.01	2	a
T ₀₆	Super triple	Silicato de Mg 2	4.23	2	a
T ₁₄	Fosfato diamónico	Silicato de Mg 2	4.19	2	a
T ₀₇	Super triple	Silicato de Mg 4	4.45	2	a
T ₁₅	Fosfato diamónico	Silicato de Mg 4	4.29	2	b
T ₀₈	Super triple	Silicato de Mg 6	4.57	2	a
T ₁₆	Fosfato diamónico	Silicato de Mg 6	4.40	2	b

DSM = 0.13

Anexo 8. Análisis de variancia del aluminio intercambiable en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021.

FV	GL	SC	CM	Fc	p-valor	Sig.
Tratamientos (T)	15	10.7266	0.7151	204.5	<.0001	**
F. fosfórica (P)	1	0.1938	0.1938	55.41	<.0001	**
Enmienda (E)	7	10.4142	1.4877	425.45	<.0001	**
Dol lin	1	6.0280	6.0280	1723.83	<.0001	**
Dol cuad	1	0.1122	0.1122	32.09	<.0001	**
Dol cúb	1	0.0130	0.0130	3.72	0.0717	n.s.
Si Mg lin	1	3.3415	3.3415	955.58	<.0001	**
Si Mg cuad	1	0.0046	0.0046	1.3	0.2705	n.s.
Si Mg cúb	1	0.0070	0.0070	2.01	0.1754	n.s.
Dol vs Si Mg	1	0.9079	0.9079	259.63	<.0001	**
P * E	7	0.1186	0.0169	4.85	0.0043	**
Error	16	0.0560	0.0035			
Total	31	10.7826				

- Coeficiente de determinación (R^2) : 99.48%
- Coeficiente de variación : 4.78%
- Promedio de la variable aluminio cambiante : 1.24 cmol₍₊₎.kg⁻¹

Prueba de normalidad de errores----- Test por Shapiro - Wilk
p-valor = 0.7212

Prueba de homogeneidad de varianzas----- Test por Bartlett
p-valor = 0.900

Anexo 9. Análisis de variancia de efecto simples del aluminio intercambiable en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021

FV	GL	SC	CM	Fc	p-valor	Sig.
P en Dol 0	1	0.0000	0.0000	0.01	0.9337	n.s.
P en Dol 2	1	0.0256	0.0256	7.32	0.0156	**
P en Dol 4	1	0.0306	0.0306	8.76	0.0092	**
P en Dol 6	1	0.0100	0.0100	2.86	0.1102	n.s.
P en Si Mg 0	1	0.0001	0.0001	0.03	0.8678	n.s.
P en Si Mg 2	1	0.0210	0.0210	6.01	0.0261	*
P en Si Mg 4	1	0.0729	0.0729	20.85	0.0003	**
P en Si Mg 6	1	0.1521	0.1521	43.5	<.0001	**
Dol en ST	3					
Dol en ST lin	1	3.1979	3.1979	914.5	<.0001	**
Dol en ST cuad	1	0.1035	0.1035	29.6	<.0001	**
Dol en ST cúb	1	0.0081	0.0081	2.32	0.147	n.s.
Si Mg en ST	3					
Si Mg en ST lin	1	2.2278	2.2278	637.09	<.0001	**
Si Mg en ST cuad	1	0.0018	0.0018	0.51	0.4834	n.s.
Si Mg en ST cúb	1	0.0036	0.0036	1.03	0.3247	n.s.
Dol en FDA	3					
Dol en FDA lin	1	2.8356	2.8356	810.88	<.0001	**
Dol en FDA cuad	1	0.0231	0.0231	6.61	0.0205	*
Dol en FDA cúb	1	0.0051	0.0051	1.45	0.2464	n.s.
Si de Mg en FDA	3					
Si Mg en FDA lin	1	1.1937	1.1937	341.36	<.0001	**
Si Mg en FDA cuad	1	0.0028	0.0028	0.8	0.3831	n.s.
Si Mg en FDA cúb	1	0.0034	0.0034	0.98	0.3372	n.s.

Anexo 10. Prueba de Tukey de efectos simples de aluminio intercambiable en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021.

Tratamiento	Fósforo	Enmienda	Promedio	n	Tukey (0.05)
T ₀₁	Super triple	Dolomita 0	1.990	2	a
T ₀₉	Fosfato diamónico	Dolomita 0	1.985	2	a
T ₁₀	Fosfato diamónico	Dolomita 2	1.300	2	a
T ₀₂	Super triple	Dolomita 2	1.140	2	b
T ₁₁	Fosfato diamónico	Dolomita 4	0.835	2	a
T ₀₃	Super triple	Dolomita 4	0.660	2	b
T ₁₂	Fosfato diamónico	Dolomita 6	0.365	2	a
T ₀₄	Super triple	Dolomita 6	0.265	2	a
T ₁₃	Fosfato diamónico	Silicato de Mg 0	2.015	2	a
T ₀₅	Super triple	Silicato de Mg 0	2.005	2	a
T ₁₄	Fosfato diamónico	Silicato de Mg 2	1.670	2	a
T ₀₆	Super triple	Silicato de Mg 2	1.525	2	b
T ₁₅	Fosfato diamónico	Silicato de Mg 4	1.380	2	a
T ₀₇	Super triple	Silicato de Mg 4	1.110	2	b
T ₁₆	Fosfato diamónico	Silicato de Mg 6	0.960	2	a
T ₀₈	Super triple	Silicato de Mg 6	0.570	2	b

DSM = 0.237

Anexo 11. Análisis de variancia del calcio intercambiable en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021.

FV	GL	SC	CM	Fc	p-valor	Sig
Tratamientos (T)	15	6.031	0.402	82.40	<0.0001	**
F. fosfórica (P)	1	0.001	0.001	0.14	0.7092	n.s.
Enmienda (E)	7	5.921	0.846	173.40	<0.0001	**
Dol lin	1	2.712	2.712	555.98	<.0001	**
Dol cuad	1	0.022	0.022	4.46	0.0508	n.s.
Dol cúb	1	0.113	0.113	23.22	0.0002	**
Si Mg lin	1	0.026	0.026	5.31	0.0349	*
Si Mg cuad	1	0.004	0.004	0.74	0.4030	n.s.
Si Mg cúb	1	0.037	0.037	7.58	0.0141	*
Dol vs Si Mg	1	3.008	3.007	616.50	<.0001	**
P x E	7	0.108	0.015	3.15	0.0270	*
Error	16	0.078	0.005			
Total	31	6.108				

- Coeficiente de determinación (R^2) : 98.72%
- Coeficiente de variación : 4.46%
- Promedio de la variable calcio intercambiable : 1.57 cmol₍₊₎.kg⁻¹

Prueba de normalidad de errores----- Test por Shapiro - Wilk
p-valor = 0.2141

Prueba de homogeneidad de varianzas----- Test por Bartlett
p-valor = 0.9506

Anexo 12. Análisis de variancia de efecto simples del calcio intercambiable en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021.

FV	GL	SC	CM	Fc	p-valor	Sig.
P en Dol 0	1	0.0784	0.0784	16.07	0.0010	**
P en Dol 2	1	0.0004	0.0004	0.08	0.7783	n.s.
P en Dol 4	1	0.0156	0.0156	3.2	0.0924	n.s.
P en Dol 6	1	0.0081	0.0081	1.66	0.2159	n.s.
P en Si Mg 0	1	0.0006	0.0006	0.13	0.7251	n.s.
P en Si Mg 2	1	0.0020	0.0020	0.42	0.5285	n.s.
P en Si Mg 4	1	0.0012	0.0012	0.25	0.6231	n.s.
P en Si Mg 6	1	0.0020	0.0020	0.42	0.5285	n.s.
Dol en ST	3					
Dol en ST lin	1	0.9333	0.9333	191.32	<.0001	**
Dol en ST cuad	1	0.0435	0.0435	8.92	0.0087	**
Dol en ST cúb	1	0.0616	0.0616	12.63	0.0026	**
Si Mg en ST	3					
Si Mg en ST lin	1	0.0255	0.0255	5.23	0.0362	*
Si Mg en ST cuad	1	0.0028	0.0028	0.58	0.4587	n.s.
Si Mg en ST cúb	1	0.0265	0.0265	5.44	0.0331	*
Dol en FDA	3					
Dol en FDA lin	1	1.8576	1.8576	380.8	<.0001	**
Dol en FDA cuad	1	0.0000	0.0000	0	1.0000	n.s.
Dol en FDA cúb	1	0.0518	0.0518	10.63	0.0049	**
Si de Mg en FDA	3					
Si Mg en FDA lin	1	0.0046	0.0046	0.95	0.3448	n.s.
Si Mg en FDA cuad	1	0.0010	0.0010	0.21	0.6548	n.s.
Si Mg en FDA cúb	1	0.0119	0.0119	2.44	0.1378	n.s.

Anexo 13. Prueba de Tukey de efectos simples del calcio intercambiable en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021.

Tratamiento	Fósforo	Enmienda	Promedio	n	Tukey (0.05)
T ₀₁	Super triple	Dolomita 0	1.46	2	a
T ₀₉	Fosfato diamónico	Dolomita 0	1.18	2	b
T ₀₂	Super triple	Dolomita 2	1.78	2	a
T ₁₀	Fosfato diamónico	Dolomita 2	1.76	2	a
T ₁₁	Fosfato diamónico	Dolomita 4	1.97	2	a
T ₀₃	Super triple	Dolomita 4	1.85	2	a
T ₁₂	Fosfato diamónico	Dolomita 6	2.55	2	a
T ₀₄	Super triple	Dolomita 6	2.46	2	a
T ₀₅	Super triple	Silicato de Mg 0	1.29	2	a
T ₁₃	Fosfato diamónico	Silicato de Mg 0	1.27	2	a
T ₀₆	Super triple	Silicato de Mg 2	1.38	2	a
T ₁₄	Fosfato diamónico	Silicato de Mg 2	1.34	2	a
T ₀₇	Super triple	Silicato de Mg 4	1.18	2	a
T ₁₅	Fosfato diamónico	Silicato de Mg 4	1.21	2	a
T ₀₈	Super triple	Silicato de Mg 6	1.19	2	a
T ₁₆	Fosfato diamónico	Silicato de Mg 6	1.24	2	a

DSM=0.28

Anexo 14. Análisis de variancia del magnesio intercambiable en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021.

FV	GL	SC	CM	Fc	p-valor	Sig
Tratamientos (T)	15	1.4451	0.0963	51.9	<.0001	**
F. fosfórica (P)	1	0.0050	0.0050	2.69	0.1203	n.s.
Enmienda (E)	7	1.4303	0.2043	110.07	<.0001	**
Dol lin	1	0.7605	0.7605	409.70	<.0001	**
Dol cuad	1	0.0049	0.0049	2.64	0.1238	n.s.
Dol cúb	1	0.0031	0.0031	1.68	0.2129	n.s.
Si Mg lin	1	0.5678	0.5678	305.91	<.0001	**
Si Mg cuad	1	0.0156	0.0156	8.42	0.0104	*
Si Mg cúb	1	0.0022	0.0022	1.19	0.2919	n.s.
Dol vs Si Mg	1	0.0761	0.0761	40.97	<.0001	**
P x E	7	0.0099	0.0014	0.76	0.6292	n.s.
Error	16	0.0297	0.0019			
Total	31	1.4748				

- Coeficiente de determinación (R^2) : 97.99%
- Coeficiente de variación : 7.12%
- Promedio de la variable magnesio intercambiable : 0.61 cmol₍₊₎.kg

Prueba de normalidad de errores----- Test por Shapiro - Wilk
p-valor = 0.8057

Prueba de homogeneidad de varianzas----- Test por Bartlett
p-valor = 0.9149

Anexo 15. Prueba de Tukey de efectos principales de enmienda para magnesio intercambiable en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021.

Enmienda	Promedio	r	Tukey (0.05)
Dolomita 6 t. ha ⁻¹	0.970	4	a
Silicato Mg 6 t. ha ⁻¹	0.835	4	b
Dolomita 4 t. ha ⁻¹	0.715	4	c
Silicato de Mg 4 t. ha ⁻¹	0.625	4	c
Dolomita 2 t. ha ⁻¹	0.558	4	d
Silicato Mg 2 t. ha ⁻¹	0.425	4	e
Dolomita 0 t. ha ⁻¹	0.373	4	e
Silicato Mg 0 t. ha ⁻¹	0.340	4	e

DSM = 0.106

Anexo 16. Análisis de variancia para el fósforo disponible en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021.

FV	GL	SC	CM	Fc	p-valor	Sig
Tratamientos (T)	15	45.4385	3.0292	3.91	0.0051	**
F. fosfórica (P)	1	4.2778	4.2778	5.52	0.032	*
Enmienda (E)	7	36.8402	5.2629	6.79	0.0008	**
Dol lin	1	13.3743	13.3743	17.25	0.0007	**
Dol cuad	1	0.4456	0.4456	0.57	0.4595	n.s.
Dol cúb	1	1.6046	1.6046	2.07	0.1696	n.s.
Si Mg lin	1	11.6053	11.6053	14.96	0.0014	**
Si Mg cuad	1	1.0455	1.0455	1.35	0.2626	n.s.
Si Mg cúb	1	0.9440	0.9440	1.22	0.2862	n.s.
Dol vs Si Mg	1	7.8210	7.8210	10.09	0.0059	**
P x E	7	4.3205	0.6172	0.80	0.601	n.s.
Error	16	12.4081	0.7755			
Total	31	57.8466				

- Coeficiente de determinación (R^2) : 78.55 %
- Coeficiente de variación : 12.54 %
- Promedio de la variable Fósforo disponible : 7.02 ppm.

Prueba de normalidad de errores----- Test por Shapiro - Wilk
p-valor = 0.5948

Prueba de homogeneidad de varianzas----- Test por Bartlett
p-valor = 0.3560

Anexo 17. Prueba de Tukey de efectos principales de fuentes de fósforo para fósforo disponible en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021.

Fósforo	Promedio	r	Tukey (0.05)
Fosfato diamónico	7.388	16	a
Super triple	6.66	16	b

DSM = 0.66

Anexo 18. Prueba de Tukey de efectos principales de enmienda para fósforo disponible en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021.

Enmienda	Promedio	r	Tukey (0.05)			
Silicato Mg 6 t. ha ⁻¹	8.513	4	a			
Silicato Mg 4 t. ha ⁻¹	7.828	4	a	b		
Dolomita 6 t. ha ⁻¹	7.780	4	a	b		
Silicato Mg 2 t. ha ⁻¹	7.718	4	a	b	c	
Dolomita 4 t. ha ⁻¹	7.195	4	a	b	c	d
Silicato Mg 0 t. ha ⁻¹	6.010	4		b	c	d
Dolomita 0 t. ha ⁻¹	5.610	4			c	d
Dolomita 2 t. ha ⁻¹	5.528	4				d

DSM = 2.16

Anexo 19. Análisis de variancia para la longitud de raíces en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021.

FV	GL	SC	CM	Fc	p-valor	Sig
Tratamientos (T)	15	1730.245	115.350	106.99	<.0001	**
F. fosfórica (P)	1	66.505	66.505	61.69	<.0001	**
Enmienda (E)	7	1453.370	207.624	192.58	<.0001	**
Dol lin	1	506.352	506.352	469.66	<.0001	**
Dol cuad	1	128.344	128.344	119.04	<.0001	**
Dol cúb	1	35.752	35.752	33.16	<.0001	**
Si Mg lin	1	725.208	725.208	672.66	<.0001	**
Si Mg cuad	1	9.375	9.375	8.70	0.0059	**
Si Mg cúb	1	5.208	5.208	4.83	0.0353	*
Dol vs Si Mg	1	43.130	43.130	40.00	<.0001	**
P x E	7	210.370	30.053	27.88	< 0.0001	**
Error	32	34.500	1.078			
Total	47	1764.745				

- Coeficiente de determinación (R^2) : 98.04%
- Coeficiente de variación : 6.17%
- Promedio de la variable longitud de raíz : 16.82 cm

Prueba de normalidad de errores----- Test por Shapiro - Wilk
p-valor = 0.4169

Prueba de homogeneidad de varianzas----- Test por Bartlett
p-valor = 0.7369

Anexo 20. Análisis de variancia de efecto simples de la longitud de raíz del maíz en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021.

FV	GL	SC	CM	Fc	p-valor	Sig.
P en Dol 0	1	1.042	1.042	0.970	0.3330	n.s.
P en Dol 2	1	32.667	32.667	30.300	<.0001	**
P en Dol 4	1	160.167	160.167	148.560	<.0001	**
P en Dol 6	1	20.167	20.167	18.710	0.0001	**
P en Si Mg 0	1	10.667	10.667	9.890	0.0036	**
P en Si Mg 2	1	13.500	13.500	12.520	0.0013	**
P en Si Mg 4	1	6.000	6.000	5.570	0.0246	*
P en Si Mg 6	1	32.667	32.667	30.300	<.0001	**
Dol en ST	3					
Dol en ST lin	1	148.838	148.838	138.050	<.0001	**
Dol en ST cuad	1	7.521	7.521	6.980	0.0127	*
Dol en ST cúb	1	44.204	44.204	41.000	<.0001	**
Si Mg en ST	3	191.583	63.861	59.230	<.0001	**
Si Mg en ST lin	1	190.817	190.817	176.990	<.0001	**
Si Mg en ST cuad	1	0.750	0.750	0.700	0.4104	n.s.
Si Mg en ST cúb	1	0.017	0.017	0.020	0.9018	n.s.
Dol en FDA	3					
Dol en FDA lin	1	385.067	385.067	357.160	<.0001	**
Dol en FDA cuad	1	176.333	176.333	163.560	<.0001	**
Dol en FDA cúb	1	3.267	3.267	3.030	0.0913	n.s.
Si de Mg en FDA	3					
Si Mg en FDA lin	1	589.067	589.067	546.380	<.0001	**
Si Mg en FDA cuad	1	12.000	12.000	11.130	0.0022	**
Si Mg en FDA cúb	1	9.600	9.600	8.900	0.0054	**

Anexo 21. Prueba de Tukey de efectos simples de longitud de raíz en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021.

	Fósforo	Enmienda	Promedio	n	Tukey (0.05)
T ₀₁	Super triple	Dolomita 0	9.17	3	a
T ₀₉	Fosfato diamónico	Dolomita 0	8.33	3	a
T ₁₀	Fosfato diamónico	Dolomita 2	22.00	3	a
T ₀₂	Super triple	Dolomita 2	17.33	3	b
T ₁₁	Fosfato diamónico	Dolomita 4	25.67	3	a
T ₀₃	Super triple	Dolomita 4	15.33	3	b
T ₁₂	Fosfato diamónico	Dolomita 6	24.00	3	a
T ₀₄	Super triple	Dolomita 6	20.33	3	b
T ₀₅	Super triple	Silicato de Mg 0	10.67	3	a
T ₁₃	Fosfato diamónico	Silicato de Mg 0	8.00	3	b
T ₀₆	Super triple	Silicato de Mg 2	13.67	3	a
T ₁₄	Fosfato diamónico	Silicato de Mg 2	10.67	3	b
T ₁₅	Fosfato diamónico	Silicato de Mg 4	19.33	3	a
T ₀₇	Super triple	Silicato de Mg 4	17.33	3	b
T ₁₆	Fosfato diamónico	Silicato de Mg 6	26.00	3	a
T ₀₈	Super triple	Silicato de Mg 6	21.33	3	b

DSM = 3.14

Anexo 22. Análisis de variancia de la MS radicular del maíz en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021.

FV	GL	SC	CM	Fc	p-valor	Sig
Tratamientos (T)	15	168.7753	11.2517	12.4	< 0.0001	**
F. fosfórica (P)	1	73.3838	73.3838	80.9	< 0.0001	**
Enmienda (E)	7	80.1524	11.4503	12.62	< 0.0001	**
Dol lin	1	51.8373	51.8373	57.15	<.0001	**
Dol cuad	1	0.2380	0.2380	0.26	0.612	n.s.
Dol cúb	1	0.6586	0.6586	0.73	0.4005	n.s.
Si Mg lin	1	17.4193	17.4193	19.2	0.0001	**
Si Mg cuad	1	0.7491	0.7491	0.83	0.3703	n.s.
Si Mg cúb	1	0.6395	0.6395	0.71	0.4073	n.s.
Dol vs Si Mg	1	8.6106	8.6106	9.49	0.0042	**
P x E	7	15.2391	2.177	2.4	0.043	*
Error	32	29.0257	0.9071			
Total	47	197.8009				

- Coeficiente de determinación (R^2) : 85.33%
- Coeficiente de variación : 8.21%
- Promedio de la variable MS radicular : 11.61 g

Prueba de normalidad de errores----- Test por Shapiro - Wilk
p-valor = 0.1250

Prueba de homogeneidad de varianzas----- Test por Bartlett
p-valor = 0.0667

Anexo 23. Análisis de variancia de efecto simples de MS de la raíz del maíz en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021.

FV	GL	SC	CM	Fc	p-valor	Sig.
P en Dol 0	1	6.32	6.32	6.97	0.0127	*
P en Dol 2	1	2.38	2.38	2.63	0.1150	ns
P en Dol 4	1	21.43	21.43	23.63	<.0001	**
P en Dol 6	1	3.39	3.39	3.74	0.0621	ns
P en Si Mg 0	1	1.49	1.49	1.64	0.2092	**
P en Si Mg 2	1	11.02	11.02	12.15	0.0015	**
P en Si Mg 4	1	26.42	26.42	29.13	<.0001	*
P en Si Mg 6	1	16.17	16.17	17.83	0.0002	**
Dol en ST	3					
Dol en ST lin	1	24.23	24.23	26.71	<.0001	**
Dol en ST cuad	1	0.09	0.09	0.10	0.7569	*
Dol en ST cúb	1	4.60	4.60	5.07	0.0313	**
Si Mg en ST	3					**
Si Mg en ST lin	1	1.78	1.78	1.96	0.1707	**
Si Mg en ST cuad	1	0.28	0.28	0.30	0.5850	n.s.
Si Mg en ST cúb	1	0.02	0.02	0.02	0.8803	n.s.
Dol en FDA	3					
Dol en FDA lin	1	27.66	27.66	30.50	<.0001	**
Dol en FDA cuad	1	0.97	0.97	1.07	0.3077	**
Dol en FDA cúb	1	0.99	0.99	1.10	0.3032	n.s.
Si de Mg en FDA	3					
Si Mg en FDA lin	1	20.86	20.86	23.00	<.0001	**
Si Mg en FDA cuad	1	3.06	3.06	3.37	0.0755	**
Si Mg en FDA cúb	1	0.97	0.97	1.07	0.3081	**

Anexo 24. Prueba de Tukey de efectos simples de la MS radicular del maíz en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021.

Tratamiento	Fósforo	Enmienda	Promedio	n	Tukey (0.05)
T ₀₉	Fosfato diamónico	Dolomita 0	10.91	3	a
T ₀₁	Super triple	Dolomita 0	8.85	3	b
T ₁₀	Fosfato diamónico	Dolomita 2	12.32	3	a
T ₀₂	Super triple	Dolomita 2	11.06	3	a
T ₁₁	Fosfato diamónico	Dolomita 4	14.45	3	a
T ₀₃	Super triple	Dolomita 4	10.67	3	b
T ₁₂	Fosfato diamónico	Dolomita 6	14.72	3	a
T ₀₄	Super triple	Dolomita 6	13.22	3	a
T ₁₃	Fosfato diamónico	Silicato de Mg 0	10.43	3	a
T ₀₅	Super triple	Silicato de Mg 0	9.43	3	a
T ₁₄	Fosfato diamónico	Silicato de Mg 2	12.11	3	a
T ₀₆	Super triple	Silicato de Mg 2	9.40	3	b
T ₁₅	Fosfato diamónico	Silicato de Mg 4	14.05	3	a
T ₀₇	Super triple	Silicato de Mg 4	9.86	3	b
T ₁₆	Fosfato diamónico	Silicato de Mg 6	13.71	3	a
T ₀₈	Super triple	Silicato de Mg 6	10.43	3	b

DSM = 2.88

Anexo 25. Análisis de variancia de la MS del vástago del maíz en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021.

FV	GL	SC	CM	Fc	p-valor	Sig
Tratamientos (T)	15	180.678	12.045	2.24	0.0273	*
F. fosfórica (P)	1	1.841	1.841	0.34	0.5626	n.s.
Enmienda (E)	7	105.069	15.010	2.79	0.022	*
Dol lin	1	25.798	25.798	4.8	0.0359	*
Dol cuad	1	11.344	11.3434	2.11	0.1561	n.s.
Dol cúb	1	35.730	35.730	6.64	0.0148	*
Si Mg lin	1	18.487	18.487	3.44	0.073	n.s.
Si Mg cuad	1	5.060	5.060	0.94	0.3393	n.s.
Si Mg cúb	1	8.640	8.640	1.61	0.2141	n.s.
Dol vs Si Mg	1	0.009	0.009	0.00	0.9675	n.s.
P x E	7	73.768	10.538	1.96	0.0923	n.s.
Error	32	172.092	5.378			
Total	47	352.770				

- Coeficiente de determinación (R^2) : 51.22%

- Coeficiente de variación : 9.58%

- Promedio de la variable MS del vástago : 24.21 g

Prueba de normalidad de errores----- Test por Shapiro - Wilk
p-valor = 0.1864

Prueba de homogeneidad de varianzas----- Test por Bartlett
p-valor = 0.1374

Anexo 26. Análisis de variancia de la altura de planta del maíz en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021.

FV	GL	SC	CM	Fc	p-valor	Sig
Tratamientos (T)	15	371.313	24.754	6.680	<.0001	**
F. fosfórica (F)	1	22.687	22.688	6.120	0.02	*
Enmienda (E)	7	147.479	21.068	5.680	0.00	**
Dol lin	1	3.675	3.675	0.990	0.33	n.s.
Dol cuad	1	12.042	12.042	3.250	0.08	n.s.
Dol cúb	1	18.408	18.408	4.960	0.03	*
Si Mg lin	1	100.833	100.833	27.190	<.0001	**
Si Mg cuad	1	1.500	1.500	0.400	0.53	n.s.
Si Mg cúb	1	7.500	7.500	2.020	0.16	n.s.
Dol vs Si Mg	1	3.521	3.521	0.950	0.34	n.s.
P x E	7	201.146	28.735	7.750	<.0001	**
Error	32	118.667	3.708			
Total	47	489.979				

- Coeficiente de determinación (R^2) :75.78 %
- Coeficiente de variación :3.53 %
- Promedio de la variable altura de planta :54.53 cm.

Prueba de normalidad de errores----- Test por Shapiro - Wilk
p-valor = 0.2583

Prueba de homogeneidad de varianzas----- Test por Bartlett
p-valor = 0.1934

Anexo 27. Análisis de variancia de efecto simples de la altura de planta del maíz en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021.

FV	GL	SC	CM	Fc	p-valor	Sig.
P en Dol 0	1	1.500	1.500	0.400	0.53	n.s.
P en Dol 2	1	48.167	48.167	12.990	0.00	**
P en Dol 4	1	0.167	0.167	0.040	0.83	n.s.
P en Dol 6	1	96.000	96.000	25.890	<.0001	**
P en Si Mg 0	1	24.000	24.000	6.470	0.02	*
P en Si Mg 2	1	42.667	42.667	11.510	0.00	**
P en Si Mg 4	1	0.667	0.667	0.180	0.6744	n.s.
P en Si Mg 6	1	10.667	10.667	2.880	0.0996	n.s.
Dol en ST	3					
Dol en ST lin	1	15.000	15.000	4.040	0.0528	n.s.
Dol en ST cuad	1	75.000	75.000	20.220	<.0001	**
Dol en ST cúb	1	26.667	26.667	7.190	0.0115	*
Si Mg en ST	3					
Si Mg en ST lin	1	141.067	141.067	38.040	<.0001	**
Si Mg en ST cuad	1	8.333	8.333	2.250	0.1437	n.s.
Si Mg en ST cúb	1	11.267	11.267	3.040	0.0909	n.s.
Dol en FDA	3					
Dol en FDA lin	1	43.350	43.350	11.690	0.0017	**
Dol en FDA cuad	1	14.083	14.083	3.800	0.0601	n.s.
Dol en FDA cúb	1	0.817	0.817	0.220	0.6421	n.s.
Si de Mg en FDA	3					
Si Mg en FDA lin	1	5.400	5.400	1.460	0.2364	n.s.
Si Mg en FDA cuad	1	1.333	1.333	0.360	0.553	n.s.
..Si Mg en FDA cúb	1	0.267	0.267	0.070	0.7903	n.s.

Anexo 28. Prueba de Tukey de efectos simples de la altura de planta del maíz en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021.

Tratamiento	Fósforo	Enmienda	Promedio	n	Tukey (0.05)
T ₀₉	Fosfato diamónico	Dolomita 0	53.67	3	a
T ₀₁	Super triple	Dolomita 0	52.67	3	a
T ₀₂	Super triple	Dolomita 2	59.33	3	a
T ₁₀	Fosfato diamónico	Dolomita 2	53.67	3	b
T ₁₁	Fosfato diamónico	Dolomita 4	54.67	3	a
T ₀₃	Super triple	Dolomita 4	54.33	3	a
T ₁₂	Fosfato diamónico	Dolomita 6	59.00	3	a
T ₀₄	Super triple	Dolomita 6	51.00	3	b
T ₁₃	Fosfato diamónico	Silicato de Mg 0	54.00	3	a
T ₀₅	Super triple	Silicato de Mg 0	50.00	3	b
T ₁₄	Fosfato diamónico	Silicato de Mg 2	55.00	3	a
T ₀₆	Super triple	Silicato de Mg 2	49.67	3	b
T ₁₅	Fosfato diamónico	Silicato de Mg 4	56.00	3	a
T ₀₇	Super triple	Silicato de Mg 4	55.33	3	a
T ₀₈	Super triple	Silicato de Mg 6	58.33	3	a
T ₁₆	Fosfato diamónico	Silicato de Mg 6	55.67	3	a

DSM = 5.83

Anexo 29. Panel fotográfico

Fotografía 1. Muestreo del suelo. Prueba de campo con un pH-chimetro (Izquierda). Apoyos para realizar el muestreo de suelos (Derecha).



Fotografía 2: Preparación del suelo para iniciar con el experimento.



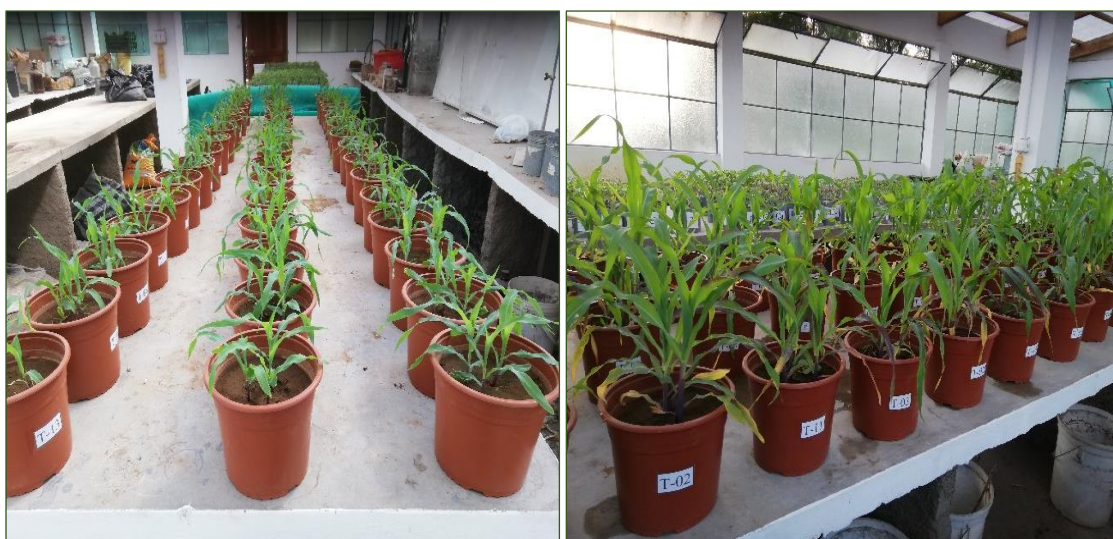
Fotografía 3. Tamizado y preparación de las macetas.



Fotografía 4. Pesado y la aplicación de las enmiendas inorgánicas (Dolomita y silicato de magnesio).



Fotografía 5: Manejo agronómico en invernadero de las unidades experimentales.



Fotografía 6. Evaluación radicular de los T₁ (ST con 0 t. ha⁻¹ de dolomita) lado izquierdo y T₄ (ST con 6 t. ha⁻¹ de dolomita) lado derecho.



Fotografía 7. Evaluación radicular de los T₁₃ (FDA con 0 t. ha⁻¹ de silicato de magnesio) lado izquierdo y T₁₆ (FDA con 6 t. ha⁻¹ de silicato de magnesio) lado derecho.



Fotografía 8. Preparación de las muestras de suelos para envío al laboratorio después de la cosecha del maíz.



Fotografía 9. Medición del pH del suelo (superior izquierda. y derecha), medida del peso de la MS radicular (inferior izquierda y derecha).



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Bach. PLINIO RONDINEL MORA

R.D. N° 305-2024-UNSCH-FCA-D

En la ciudad de Ayacucho a los diecinueve días del mes de noviembre del año dos mil veinticuatro, siendo las dieciocho horas, se reunieron en el auditorio de la Facultad de Ciencias Agrarias, bajo la presidencia de la Ph.D. Marhleni Cerda Gómez Decano (e) de la Facultad de Ciencias Agrarias; los miembros del jurado conformado por Ph.D. Marhleni Cerda Gómez, Mtro. Rodolfo Alca Mendoza como asesor, Ing. Eduardo Robles García y M.Sc. Alex Lázaro Tineo Bermúdez; actuando como secretario de actas el Mtro. Rodolfo Alca Mendoza, para recibir la sustentación de la Tesis titulado: **Enmienda cálcica, silícica y fuentes fosfóricas en características químicas y productividad de suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021**, para obtener el Título Profesional de Ingeniero Agrónomo presentado por el Bachiller **PLINIO RONDINEL MORA**.

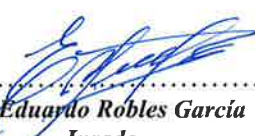
El señor Decano (e) previa verificación de los documentos exigidos solicitó se proceda con la sustentación y posterior defensa de la tesis en un periodo de cuarenta y cinco minutos de acuerdo al reglamento de grados y títulos vigente. Terminado la exposición, los miembros del Jurado, formularon sus preguntas,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

Jurado evaluador	Exposición	Respuestas a las preguntas	Generación de conocimiento	Promedio
Ph.D. Marhleni Cerda Gómez	15	15	17	16
Mtro. Rodolfo Alca Mendoza	16	16	16	16
Ing. Eduardo Robles García	16	16	16	16
M.Sc. Alex Lázaro Tineo Bermúdez	17	16	17	17
PROMEDIO GENERAL				16

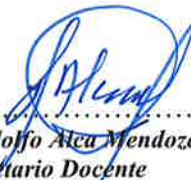
Acto seguido se invita al sustentante y publico en general para dar a conocer el resultado final. Firman el acta.


Ph.D. Marhleni Cerda Gómez
Presidente


Mtro. Rodolfo Alca Mendoza
Asesor


Ing. Eduardo Robles García
Jurado


M.Sc. Alex Lázaro Tineo Bermúdez
Jurado


Mtro. Rodolfo Alca Mendoza
Secretario Docente



UNSCH

FACULTAD DE CIENCIAS
AGRARIAS

CONSTANCIA DE CONTROL DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE TESIS

El que suscribe coordinador responsable de la valoración y verificación de originalidad de los trabajos de investigación y de tesis de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, designado mediante la RCF N° 005-2024-UNSCH-FCA-CF; hace constar que el trabajo de tesis titulado;

Enmienda cálcica, silícica y fuentes fosfóricas en características químicas y productividad de suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021

Autor : Plinio Rondinel Mora
Asesor : Rodolfo Alca Mendoza

Ha sido sometido al control de originalidad mediante el software TURNITIN UNSCH, acorde al Reglamento de originalidad de trabajos de investigación, aprobado mediante RCU N° 039-2021-UNSCH-CU, y RCU N° 1530-2023-UNSCH-CU, emitiendo un resultado de **catorce (14 %)** de índice de similitud, realizado con **depósito de trabajos estándar**.

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

Nota: Se adjunta el resultado con Identificador de la entrega: 2553756427

Ayacucho, 16 de diciembre de 2024

UNIVERSIDAD NACIONAL DE
SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA
Facultad de Ciencias Agrarias

Dr. Yuri Gálvez Gastelú
Coordinador de Control de originalidad de
trabajo de investigación

Enmienda cálcica, silícica y fuentes fosfóricas en características químicas y productividad de suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021

por Plinio Rondinel Mora

Fecha de entrega: 16-dic-2024 10:29a.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2553756427

Nombre del archivo: BORRADOR_TESIS_Plinio_Rondinel__pdf_1.pdf (5.6M)

Total de palabras: 29009

Total de caracteres: 143634

Enmienda cálcica, silícica y fuentes fosfóricas en características químicas y productividad de suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021

INFORME DE ORIGINALIDAD

14%

INDICE DE SIMILITUD

15%

FUENTES DE INTERNET

1%

PUBLICACIONES

2%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.lamolina.edu.pe Fuente de Internet	5%
2	repositorio.unsch.edu.pe Fuente de Internet	1%
3	idoc.pub Fuente de Internet	1%
4	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
5	repositorio.uncp.edu.pe Fuente de Internet	1%
6	repositorio.unas.edu.pe Fuente de Internet	1%
7	repositorio.unu.edu.pe Fuente de Internet	1%
8	fr.scribd.com Fuente de Internet	<1%

9	repositorio.unheval.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
10	repositorio.umsa.bo Fuente de Internet	<1 %
11	repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080 Fuente de Internet	<1 %
12	www.dspace.uce.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
13	suelos.org.ar Fuente de Internet	<1 %
14	www.researchgate.net Fuente de Internet	<1 %
15	renati.sunedu.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
16	www.cenicafe.org Fuente de Internet	<1 %
17	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga Trabajo del estudiante	<1 %
18	www.munipichari.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
19	repositorio.iniap.gob.ec Fuente de Internet	<1 %

20

dspace.unl.edu.ec

Fuente de Internet

<1 %

21

repositorio.unal.edu.co

Fuente de Internet

<1 %

22

Submitted to unapiquitos

Trabajo del estudiante

<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 30 words

Excluir bibliografía

Activo

Enmienda cálcica, silícica y fuentes fosfóricas en características químicas y productividad de suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021

Plinio Rondinel Mora; Rodolfo Alca Mendoza
Área de investigación; Suelos
Línea de investigación: Suelo, agua y medio ambiente
plinio.rondinel.01@unsch.edu.pe
rodolfo.alca@unsch.edu.pe

RESUMEN

El ensayo se realizó en el invernadero del programa de investigación de pastos y ganadería de la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga, para evaluar la enmienda cálcica, silícica y fuentes fosfóricas en características químicas y productividad de suelo ácido de selva. La aplicación de las enmiendas fue a una dosis de 0, 2, 4 y 6 t.ha⁻¹ en macetas con 3.5 kg de suelo, incubadas por un periodo de 45 días a capacidad de campo para luego sembrar maíz. Se empleó un diseño completo al azar con arreglo factorial 2P x 8E con tres repeticiones para variables químicas del suelo y biométricas del cultivo de maíz, en el que se evaluó el pH, aluminio intercambiable, calcio, magnesio, fósforo disponible y variables biométricas como longitud de raíz, peso de materia seca radicular, vástago y altura de planta. Los resultados en las características químicas indican que a una dosis de 6 t.ha⁻¹ de dolomita en el ST resultó con pH (5.15), aluminio intercambiable (0.17 y 2.34 cmol₍₊₎.kg⁻¹ respectivamente); el uso de silicato de magnesio en el ST a dosis de 6 t.ha⁻¹ resultó con pH (4.58), aluminio intercambiable (0.59 cmol₍₊₎.kg⁻¹) siendo los mejores resultados significativamente. A dosis de 6 t.ha⁻¹ de dolomita y silicato de magnesio produjo cambios significativos en el magnesio intercambiable (0.95 y 0.81 cmol₍₊₎.kg⁻¹ respectivamente). En las variables biométricas a dosis de 6 t.ha⁻¹ de dolomita en el ST resultó con longitud de raíces (27.60 cm) y peso de materia seca radicular (12.86 g), el uso de silicato de magnesio en el ST a dosis de 6 t.ha⁻¹ resultó con longitud de raíz (21.10 cm) y peso de materia seca radicular (10.30 g) siendo los mejores resultados significativamente.

Palabras clave: pH del suelo, Dolomita, Silicato de magnesio, Suelos ácidos.

ABSTRACT

The trial was conducted in the greenhouse of the pasture and livestock research program of the National University of San Cristobel of Huamanga, to evaluate the calcium, silica and phosphorus amendments on chemical characteristics and productivity of acidic jungle soil. The application of the amendments was at a dose of 0, 2, 4 and 6 t.ha⁻¹ in pots with 3.5 kg of soil, incubated for a period of 45 days at field capacity and then sowing corn. A complete randomized design with a 2P x 8E factorial arrangement with two and three repetitions was used for chemical variables of the soil and biometric variables of the corn crop, in which pH, exchangeable aluminum, calcium, magnesium and biometric variables such as root length, root dry matter weight, stem and plant height were evaluated. The results in the chemical characteristics indicate that at a dose of 6 t.ha⁻¹ of dolomite in the ST resulted in pH (5.15), aluminum, exchangeable calcium (0.17 and 2.34 cmol(+).kg⁻¹ respectively); the use of magnesium silicate in the ST at a dose of 6 t.ha⁻¹ resulted in pH (4.58), exchangeable aluminum (0.59 cmol(+).kg⁻¹) being the best results significantly. At doses of 6 t.ha⁻¹ of dolomite and magnesium silicate produced significant changes in exchangeable magnesium (0.95 and 0.81 cmol(+).kg⁻¹ respectively). In the biometric variables at doses of 6 t.ha⁻¹ of dolomite in the ST resulted in root length (27.60 cm) and root dry matter weight (12.86 g), the use of magnesium silicate in the ST at doses of 6 t.ha⁻¹ resulted in root length (21.10 cm) and root dry matter weight (10.30 g) being the best results significantly.

Keywords: Soil pH, Dolomite, Magnesium silicate, Acid soils.

1. INTRODUCCIÓN

Los suelos ácidos ocupan aproximadamente el 30% o 3 950 millones de hectáreas del área terrestre libre de hielo del mundo (Alewell, 2003), estos suelos se han desarrollado donde la precipitación supera a la evapotranspiración pudiendo ser acelerado por ciertas plantas y actividades humanas o siendo retardados por prácticas cuidadosas. En los ecosistemas controlados, la acidificación del suelo se debe sobre todo a la emisión de protones durante los ciclos del carbono, el nitrógeno y el azufre, así como a procesos en los que intervienen fertilizantes nitrogenados. En tales circunstancias, la acidez del suelo tiene un impacto sustancial en la accesibilidad de los nutrientes para su absorción por las plantas e influye en la actividad microbiana. La baja disponibilidad del fósforo es una característica principal en suelos ácidos, debido a la reacción con óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio, resultando minerales de baja solubilidad (Havlin et al., 2017; Manahan, 2017).

Los suelos del distrito de Pichari – La Convención – Cusco, se desarrollaron sobre un clima cálido característico de ceja de selva con una temperatura media que varía de 24 a 27 °C y una precipitación acumulada de 3,281 mm/año (Conislla, 2019), las cuales aceleran la velocidad de las reacciones en el suelo, produciendo iones de hidrogeno y la desbasificación de los suelos dando resultado suelos ácidos en diferentes grados. La actividad frecuente es la tala, quema de los bosques primarios para la apertura de nuevas áreas agrícolas para cultivos de pan de llevar (maíz, frijol) acelerando de esta manera el proceso de acidificación en el suelo, debido a las actividades antrópicas realizadas. De esta manera campaña tras campañas los cultivos reducen sus rendimientos y productividad, debido a las condiciones ácidas que presentan estos suelos (Fijación del fósforo por aluminio y hierro, la toxicidad por aluminio, hierro y manganeso). Por ello se pretende aplicar enmiendas cálcicas, silícicas con la finalidad de balancear las bases cambiables del suelo, incrementar el pH, precipitar o neutralizar total o parcialmente elementos tóxicos (aluminio y manganeso) y la liberación de iones fosfatos los cuales pueden ser absorbidos por las plantas incrementando la producción y productividad de los cultivos. Según los resultados de varios estudios, uno de los métodos más utilizados para reducir la acidez del suelo es el uso de enmiendas inorgánicas. Éstas son capaces de mejorar la fertilidad química, cuando se aplican adecuadamente, dando como resultado importantes cambios químicos en el suelo, lo que, a su vez, tiene efectos ventajosos para el crecimiento y desarrollo óptimo de las plantas. La mayoría de los carbonatos, hidróxidos, óxidos y silicatos de calcio y/o magnesio que se utilizan están incluidos en las enmiendas inorgánicas. El calcio y el magnesio no son directamente responsables del efecto neutralizante de las enmiendas, los aniones relacionados con el calcio y el magnesio son los responsables de este efecto, estos aniones incluyen CO_3^{2-} , OH^- y SiO_3^{2-} (Espinosa, 2001; Weil & Brady, 2017).

El presente trabajo tuvo como objetivo, evaluar la enmienda cálcica, silícica y fuentes fosfóricas en características químicas y productividad de suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021.

2. METODOLOGÍA

2.1. Unidad de muestreo

La unidad de muestreo del presente trabajo es un suelo agrícola que pertenece a la comunidad de Quisto Valle del Centro Poblado de Quisto Central, distrito de Pichari, provincia La Convención, región Cusco. Las coordenadas en UTM corresponden a 619611 m E y 8632454 m N zona 18 sur, con una altitud de 548 m s.n.m. Asimismo, esta unidad del suelo se encuentra ubicado a nivel de sub-paisaje en una ladera de montaña, de clima cálido característico de ceja de selva con una temperatura media anual que varía

de 24 a 27 °C y una precipitación acumulada de 3281 mm/año (Conislla, 2019). La muestra de suelo utilizada en el presente experimento fue un suelo ácido colectado de 0 a 20 cm de profundidad dentro de una hectárea de suelo, se colectaron 50 sub-muestras de suelo de 3.5kg c/u, cada punto de muestreo estuvo separado aproximadamente 12 m. Finalmente, las muestras, fueron al invernadero del área de Suelos del Programa de Investigación en Pastos y Ganadería de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.

Caracterización de la muestra de suelo

Las diversas propiedades físicas y químicas se determinaron de acuerdo a los métodos empleados por el laboratorio de Análisis de Suelo y Análisis Foliar Nicolás Roulet, del Programa de Investigación en Pastos y Ganadería, de la Facultad de Ciencias Agrarias, de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. El suelo corresponde a una clase textural franco arenosa, con un contenido de arcilla de 12.9%, el pH es muy fuertemente ácido (4.86), bajo contenido de materia orgánica (1.36%), contenido medio de fósforo disponible (12.4 ppm), contenido medio de potasio (147.2 ppm), el contenido de la CIC es moderado (10.8 cmol₍₊₎.kg⁻¹), el porcentaje de acidez cambiante es de 43.61% y el porcentaje de saturación de bases es de 56.39%.

Tabla 2.1

Resultados del análisis de caracterización del suelo de Quisto Valle.

Características		Valor	Interpretación
Arena		76.2	Clase textural
Limo		10.9	Franco
Arcilla		12.9	Arenoso
pH (H ₂ O, 1:2.5)	(---)	4.86	Muy fuertemente ácido
C.E. (1:1)	(dS.m ⁻¹)	0.14	No salino
CaCO ₃	(%)	0.0	No calcáreo
M.O.	(%)	1.36	Bajo
Fósforo disponible	ppm	12.4	Medio
Potasio disponible	ppm	147.2	Medio
CIC	(cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)	10.8	Moderado
Ca ²⁺	”	0.48	
Mg ²⁺	”	0.40	
K ⁺	”	0.75	
Na ⁺	”	0.18	
Al ³⁺	”	1.30	
H ⁺	”	0.10	
Al ³⁺ + H ⁺	”	1.40	
PSB	%	56.39	
PAC	%	43.61	

Fuente: Laboratorio de suelos y análisis foliar – UNSCH (acondicionado).

2.2. Factores y tratamientos

El experimento se llevó a cabo en macetas de 3.5 kg de tierra por maceta. Las fuentes fosfóricas empleadas fueron el superfosfato triple de calcio (46% P_2O_5 , 13% Ca) y fosfato diamónico (18%N, 46% P_2O_5) y enmiendas inorgánicas se utilizaron dolomita (CaO: 33.05%, MgO: 19.37%) y silicato de magnesio (SiO_2 : 33.10%, MgO: 35.9%) a una dosis 0, 2, 4 y 6 t. ha^{-1} .

2.3. Procedimiento

Una vez en el invierno el suelo colectado fue vertido sobre un toldo de plástico de 12 m^2 y secado durante dos semanas, cuya temperatura estuvo entre 20 a 25 °C, alrededor de cada cuatro días, el suelo fue removido con ayuda de un rastrillo y una pala recta, posteriormente fue tamizado a través de una malla de 2 mm de apertura, luego el suelo fue homogeneizado para ser vertido en macetas circulares de 3.5 kg de tierra seca al aire. La aplicación de las enmiendas inorgánicas cálcicas y silícicas a dosis antes mencionados se mezcló completamente con el suelo donde se mantuvo a una humedad de capacidad de campo por 45 días, después de ello se realizó la fertilización fosfórica conjuntamente con la siembra del maíz. Luego de 15 DDS se realizó la primera fertilización nitrogenada (40%) y potásica (50%), 35 DDS segunda fertilización nitrogenada (40%) y potásica (50%), 50 DDS se realizó la tercera fertilización nitrogenada (20%), 90 DDS se realizó la cosecha (siendo la dosis de fertilización de 250 – 200 – 200 de NPK).

Evaluaciones fase post invernadero. En el suelo se evaluó el pH en una relación suelo agua 1:1; aluminio intercambiable por el método de Yuan; cationes cambiables como calcio, magnesio se determinó por absorción atómica y el fósforo disponible determinado por el método de Olsen modificado. En el cultivo indicador se evaluaron variables biométricas como la longitud de raíces, peso de la materia seca radicular y del vástago y por último se evaluó la altura de planta.

2.4. Diseño experimental

Se utilizó el diseño completamente al azar (DCA) con un arreglo factorial 2P x 8E con 3 repeticiones. Los tratamientos resultaron de las combinaciones de dos fuentes de fósforo por ocho niveles de enmiendas que dieron como resultado 16 tratamientos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Evaluación en las características químicas del suelo

pH

En el análisis de variancia (ANVA) para el pH del suelo se observa en la tabla 3.1, resultó que existe diferencia estadística altamente significativa entre las interacciones de fuentes fosfóricas (P) y enmiendas (E), como resultado del análisis de caracterización del suelo, realizado una vez concluida el experimento.

Tabla 3.1

Análisis de variancia del pH en suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021

FV	GL	SC	CM	Fc	p-valor	Sig
Tratamientos (T)	15	3.425	0.228	208.19	<.0001	**
F. fosfórica (P)	1	0.107	0.107	97.51	<.0001	**
Enmienda (E)	7	3.280	0.469	427.17	<.0001	**
P x E	7	0.039	0.006	5.03	0.0036	**
Error	16	0.018	0.001			
Total	31	3.443				

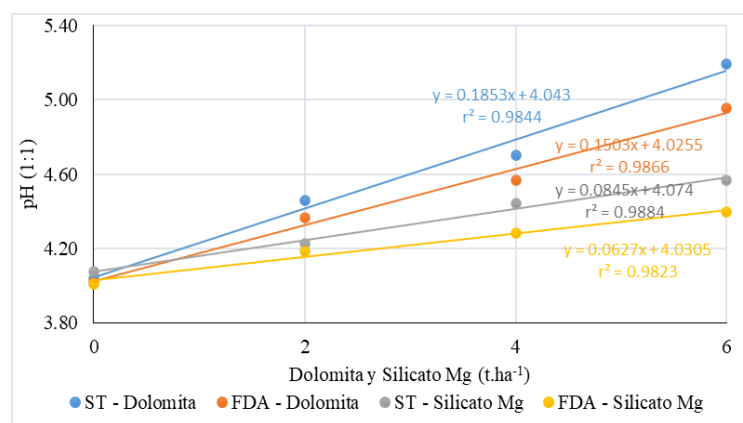
Promedio : 4.41

CV : 0.75 %

El efecto de las diferentes dosis de dolomita evaluadas en las fuentes fosfóricas (ST, FDA) resultó con tendencias lineales positivas con diferencia estadística altamente significativa, de manera que a 6 t.ha⁻¹ resultó con pH promedios de 5.15 y 4.93 respectivamente (Figura 3.2), mientras el efecto de las diferentes dosis de silicato de magnesio evaluadas en las fuentes fosfóricas (ST, FDA), también resultó con tendencias lineales positivas con diferencia estadística significativa, de manera que a 6 t.ha⁻¹ resultó con pH con promedios de 4.58 y 4.41 respectivamente (Figura 3.2).

Figura 3.2

Tendencia lineal del pH por efecto de dolomita y silicato de Mg en las fuentes fosfóricas (ST, FDA) en un suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021



Resultados similares se reportaron con la aplicaciones crecientes de dolomita en suelos ácidos donde existe la tendencia de elevar el pH (Bolan et al., 2003; Fageria & Baligar, 2008; Fageria & Nascente, 2014), quienes afirman que el anión acompañante es el carbonato (CO₃²⁻) quien reacciona con el ion hidrógeno para formar dióxido de carbono (CO₂) y agua (H₂O), siendo éstas moléculas estables, aumentando de esta manera el pH del suelo; de igual manera para el caso de silicato de magnesio, el anión acompañante es silicato (SiO₃²⁻) que reacciona con iones hidrógeno para formar el ácido monosilícico (H₄SiO₄) (Álvarez & Osorio, 2014; Matichenkov, 2008; Weil & Brady, 2017), incrementó el pH del suelo.

Aluminio intercambiable

En el análisis de variancia (ANVA) para el aluminio intercambiable del suelo se observa en la tabla 3.2, resultó que existe una diferencia estadística altamente significativa entre las interacciones de fuentes fosfóricas (P) y enmiendas (E), como resultado del análisis caracterización del suelo, realizado una vez concluida el experimento.

Tabla 3.2

Análisis de variancia para el aluminio intercambiable en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021

FV	GL	SC	CM	Fc	p-valor	Sig
Tratamientos (T)	15	10.727	0.715	204.5	<.0001	**
F. fosfórica (P)	1	0.194	0.194	55.41	<.0001	**
Enmienda (E)	7	10.414	1.488	425.45	<.0001	**
P x E	7	0.119	0.017	4.85	0.0043	**
Error	16	0.056	0.004			
Total	31	10.783				

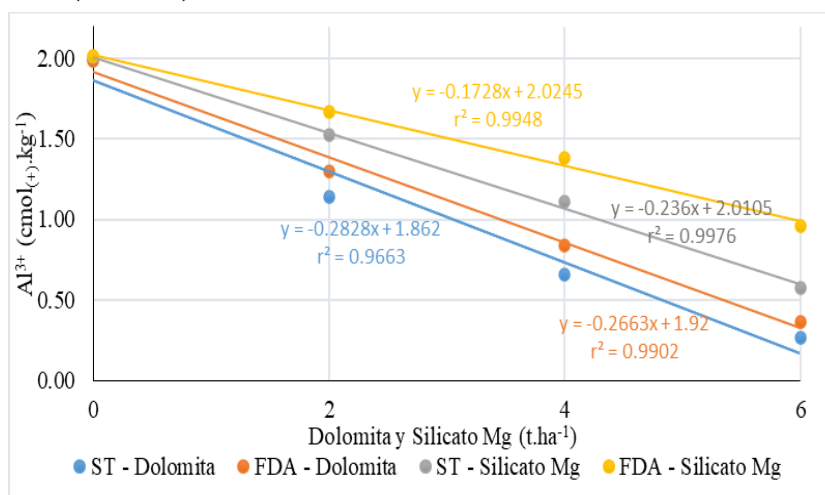
Promedio : 1.24 $\text{cmol}_{(+)}. \text{kg}^{-1}$

CV : 4.78 %

El efecto de las diferentes dosis de dolomita en las fuentes fosfóricas (ST, FDA) resultó con tendencias lineales de pendiente negativa con diferencia estadística altamente significativa, logrando una disminución proporcional de aluminio intercambiable del suelo que a 6 t.ha^{-1} resultó con promedios de 0.17 y 0.32 $\text{cmol}_{(+)}. \text{kg}^{-1}$ respectivamente (Figura 3.2); mientras el efecto de las diferentes dosis de silicato de magnesio en las fuentes fosfóricas (ST, FDA), resultó con tendencia lineal de pendiente negativa con diferencia estadística altamente significativa, logrando una disminución proporcional de aluminio intercambiable que a 6 t.ha^{-1} resultó con promedio de 0.59 y 0.98 $\text{cmol}_{(+)}. \text{kg}^{-1}$ para ST y FDA respectivamente (Figura 3.2).

Figura 3.2

Tendencia lineal del aluminio intercambiable por efecto de dolomita y silicato de Mg en las fuentes fosfóricas (ST, FDA) de un suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021



Varios autores reportaron resultados similares, en donde a dosis crecientes de dolomita independientemente de la fuente de fósforo, existe la disminución promedio de aluminio intercambiable (Bolan et al., 2003; Fageria & Nascente, 2014; Havlin et al., 2017; Weil & Brady, 2017), debido que el hidróxido producido por la hidrólisis del agua a causa del carbonato proveniente de la dolomita incrementa el pH y precipita el aluminio en forma de gibsita ($\text{Al}(\text{OH})_3^0$) disminuyendo así su efecto fitotóxico para las raíces de la mayoría de las plantas (Fageria & Baligar, 2008; George et al., 2012). De igual manera, el mecanismo principal del efecto del silicato en la disminución de la fitotoxicidad del aluminio esta probablemente relacionados con la formación de complejos silicatos hidro-aluminosos no tóxicos (Matichenkov, 2008).

Calcio intercambiable

En el análisis de variancia (ANVA) para el calcio intercambiable del suelo se observa en la tabla 3.3, resultó que existe una diferencia estadística significativa entre las interacciones de fuentes fosfóricas (P) y enmiendas (E), como resultado del análisis de caracterización del suelo realizado una vez concluida el experimento.

Tabla 3.3

Análisis de variancia del calcio intercambiable en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021

FV	GL	SC	CM	Fc	p-valor	Sig
Tratamientos (T)	15	6.031	0.402	82.40	<0.0001	**
F. fosfórica (P)	1	0.001	0.001	0.14	0.7092	n.s.
Enmienda (E)	7	5.921	0.846	173.40	<0.0001	**
P x E	7	0.108	0.015	3.15	0.0270	*
Error	16	0.078	0.005			
Total	31	6.108				
Promedio	: 1.57 $\text{cmol}_{(+)}. \text{kg}^{-1}$					
CV	: 4.46 %					

El efecto de las diferentes dosis de dolomita evaluadas en las fuentes fosfóricas (ST, FDA) resultó con tendencias lineales positivas con diferencia estadística significativa, de manera que el aporte de la dolomita provocó un aumento proporcional, dado que cuando se aplicaron una dosis 6 t.ha^{-1} resultó con 2.34 y $2.51 \text{ cmol}_{(+)}. \text{kg}^{-1}$ calcio intercambiable en el suelo en promedio para ST y FDA respectivamente (Figura 3.3).

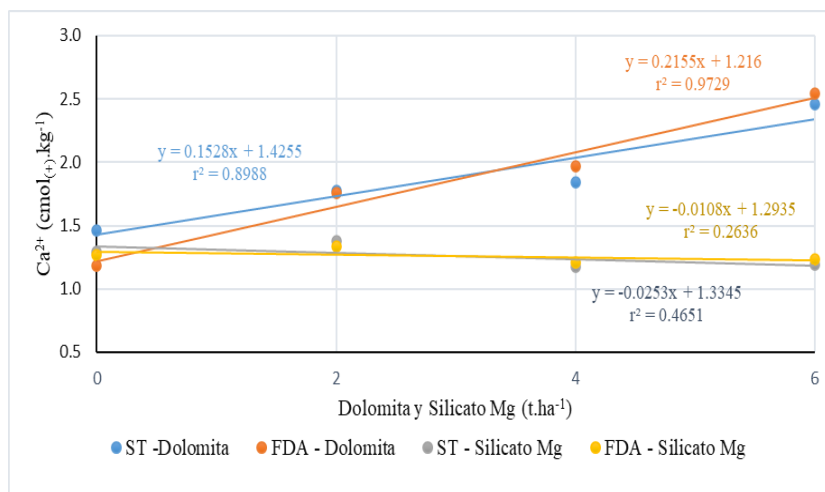
Valores de 4.2 cmol.kg^{-1} calcio intercambiable (Fageria, 2006), 2.1 cmol.kg^{-1} calcio intercambiable (Fageria et al., 2007) y 3.7 cmol.kg^{-1} calcio intercambiable (Fageria et al., 2014) resultó óptimo para la producción de frejol seco, frejol común y soya respectivamente como producto de la utilización de la dolomita.

Por otro lado, el efecto del silicato de magnesio para las fuentes fosfóricas (ST, FDA) no tuvo diferencias estadística significativas en el calcio intercambiable del suelo, sin embargo, otros autores utilizaron fertilizantes como wollastonita (CaSiO_3) dando buenos

resultados en el aumento del calcio intercambiable para poder incrementar la producción de arroz (Camargo et al., 2007).

Figura.3.3

Tendencia lineal del calcio intercambiable por efecto de dolomita y silicato de Mg en las fuentes fosfóricas (ST, FDA) de un suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021



También, otros autores utilizaron escorias básicas que es un sub producto de la industria siderúrgica del hierro los cuales proporcionan calcio intercambiable en el suelo de manera significativa (Carvalho-Pupatto et al., 2004; Peregrina et al., 2008; Prado & Fernandes, 2003).

Magnesio intercambiable

En el análisis de variancia (ANVA) para el magnesio intercambiable del suelo se observa en la tabla 3.4, resultó que existe diferencia estadística altamente significativa entre los tratamientos empleados (T) y las enmiendas (E), como resultado del análisis de caracterización del suelo realizadas una vez concluida el experimento, al no tener diferencia estadística significativa en la interacción, nuestro análisis se centró en la utilización de las enmiendas.

Tabla 3.4

Análisis de variancia del magnesio intercambiable en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021

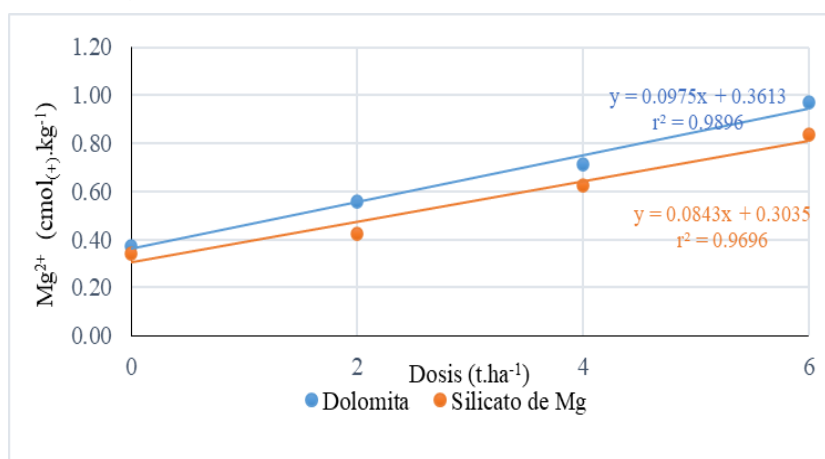
FV	GL	SC	CM	Fc	p-valor	Sig
Tratamientos (T)	15	1.4451	0.0963	51.9	<.0001	**
F. fosfórica (P)	1	0.0050	0.0050	2.69	0.1203	n.s.
Enmienda (E)	7	1.4303	0.2043	110.07	<.0001	**
P x E	7	0.0099	0.0014	0.76	0.6292	n.s.
Error	16	0.0297	0.0019			
Total	31	1.4748				
Promedio	: 0.61 cmol(+)·kg ⁻¹					
CV	: 7.12%					

El efecto de la dolomita y el silicato de magnesio en el contenido de magnesio intercambiable del suelo resultó con tendencia lineal positiva con diferencia estadística significativa de manera que a 6 t.ha⁻¹ resultó con promedios 0.95 y 0.81 cmol₍₊₎.kg⁻¹ de magnesio intercambiable respectivamente (Figura 3.4).

Experimentos realizados en la región del Cerrado en el Brasil en oxisoles con la utilización de cal dolomítica, el cual tuvo efectos positivos en el cambio de las propiedades químicas de los suelos, siendo así a una dosis de 12 t. ha⁻¹, donde el contenido de magnesio intercambiable aumento significativamente a 10 cm de profundidad (Fageria, 2006).

Figura 3.4

Tendencia lineal del magnesio intercambiable por efecto de dolomita y silicato de Mg en un suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021



Del mismo modo el efecto de utilizar escorias de la industria siderúrgicas, el cual contiene en su composición química silicato de magnesio (MgSiO₃) el cual contribuyó a incrementar el pH, disminuir la acidez intercambiable y aportar magnesio en suelos ácidos que son deficientes de bases cambiables propiciando incrementar la producción de caña de azúcar (Brassioli et al., 2009; Prado & Fernandes, 2003), arroz (Carvalho-Pupatto et al., 2004).

Fósforo disponible

En el análisis de variancia (ANVA) para el fósforo disponible se observa en la tabla 3.5, resultó que existe diferencia estadística significativa entre las fuentes fosfóricas (P) y enmiendas (E), como resultado del análisis de caracterización del suelo realizada una vez concluida el experimento.

Tabla 3.5

Análisis de variancia para el fósforo disponible en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021

FV	GL	SC	CM	Fc	p-valor	Sig
Tratamientos (T)	15	45.4385	3.0292	3.91	0.0051	**
F. fosfórica (P)	1	4.2778	4.2778	5.52	0.032	*
Enmienda (E)	7	36.8402	5.2629	6.79	0.0008	**
P X E	7	4.3205	0.6172	0.80	0.601	n.s.
Error	16	12.4081	0.7755			
Total	31	57.8466				

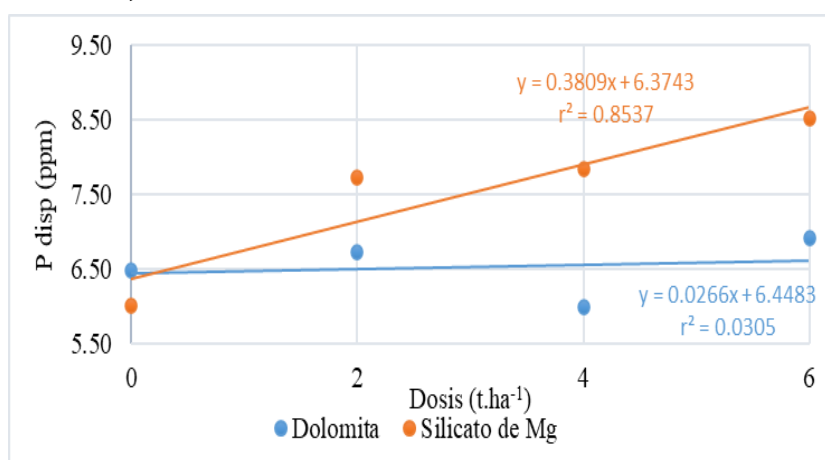
Promedio : 7.03 ppm

CV : 12.54 %

El efecto principal del silicato de magnesio, resultó con tendencia lineal positiva con diferencia estadística significativa, de modo que a 6 t.ha⁻¹ resultó de 8.60 ppm de fósforo disponible promedio, por otro lado el efecto principal de la dolomita resultó con una tendencia lineal positiva con diferencia estadística significativa, de modo a 6 t.ha⁻¹ resultó con 6.61 ppm de fósforo disponible del suelo.

Figura 3.5

Tendencia lineal para el fósforo disponible por efecto de dolomita y silicato de Mg de un suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021



3.2. En el cultivo indicador

Longitud de raíces

En el análisis de variancia (ANVA) para la longitud de raíz, se observa en la tabla 3.6, resultó que existe diferencia estadística altamente significativa entre las interacciones de fuentes fosfóricas (P) y enmiendas (E), como resultado de la evaluación biométrica realizada una vez concluida el experimento.

Tabla 3.6

Análisis de variancia de la longitud de raíz de maíz en un suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021

FV	GL	SC	CM	Fc	p-valor	Sig
Tratamientos (T)	15	1730.245	115.350	106.99	<.0001	**
F. fosfórica (P)	1	66.505	66.505	61.69	<.0001	**
Enmienda (E)	7	1453.370	207.624	192.58	<.0001	**
P x E	7	210.370	30.053	27.88	<.0001	**
Error	32	34.500	1.078			
Total	47	1764.745				

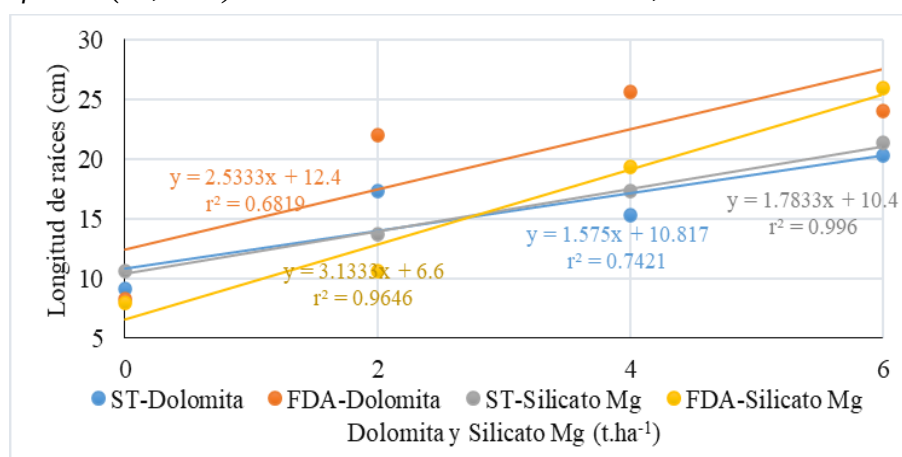
Promedio : 16.82 cm

CV : 6.17 %

El efecto de las diferentes dosis de dolomita evaluadas en las fuentes fosfóricas (ST, FDA) resultó con tendencias lineales positivas con diferencia estadística significativa, de manera que el uso de dolomita a 6 t.ha⁻¹ resultó con longitudes de raíces promedio de 27.60 y 20.27 cm respectivamente (Figura 3.6), mientras el efecto de las diferentes dosis de silicato de magnesio evaluadas en las fuentes fosfóricas (ST, FDA), también resultó con tendencias lineales positivas con diferencia estadística significativa, de manera que a 6 t.ha⁻¹ resultó con longitudes de raíces en promedio de 21.10 y 25.40 cm respectivamente (Figura 3.11).

Figura 3.6

Tendencia lineal de la longitud de raíz de maíz por efecto de dolomita y silicato de Mg en las fuentes fosfóricas (ST, FDA) de un suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021



El pH como una característica química muy importante nos ayuda a inferir otras características relacionadas de manera que el incremento del pH a consecuencia de la aplicación de dolomita (Fageria et al., 2014; Fageria & Baligar, 2008) y silicato de magnesio (Cabral et al., 2008; Carvalho-Pupatto et al., 2004; Peregrina et al., 2008), reduce significativamente la concentración de aluminio soluble e intercambiable el cual resulta un elemento fitotóxico (George et al., 2012; Havlin et al., 2017), inhibiendo la elongación de las raíces a causa de la alta concentración del aluminio, el principal efecto

tóxico del aluminio es la inhibición de la división celular, lo que resulta en una reducción o cese del crecimiento de las raíces principales y laterales, llevándolo así al deterioro de las células de la raíz, disminuyendo la permeabilidad al agua y los nutrientes (George et al., 2012). Al reducir el crecimiento de las raíces, la absorción del fósforo es limitado porque se reduce el volumen del suelo explorado por las raíces (Havlin et al., 2017).

Materia seca radicular

En el análisis de variancia (ANVA) para el peso de la MS radicular se observa en la tabla 3.7, resultó que existe diferencia estadística significativa entre las interacciones de fuentes de fósforo (P) y enmiendas (E), producto de la evaluación biométrica realizada una vez concluida el experimento.

Tabla 3.7

Análisis de variancia del peso de la MS de la raíz de maíz en suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021

FV	GL	SC	CM	Fc	p-valor	Sig
Tratamientos (T)	15	168.775	11.252	12.4	< 0.0001	**
F. fosfórica (P)	1	73.384	73.384	80.9	< 0.0001	**
Enmienda (E)	7	80.152	11.450	12.62	< 0.0001	**
P x E	7	15.239	2.177	2.40	0.043	*
Error	32	29.026	0.907			
Total	47	197.801				

Promedio : 11.61 g

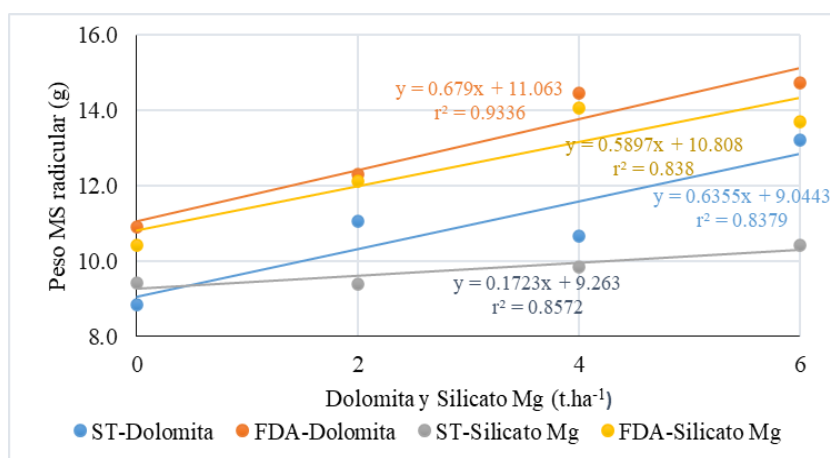
CV : 8.21 %

El efecto de las diferentes dosis de dolomita evaluadas en las fuentes fosfóricas (ST, FDA) resultó con tendencias lineales positivas con diferencia estadística significancia, de manera que a 6 t.ha⁻¹ resultó con pesos de MS radicular en promedio de 12.86 y 15.14 g respectivamente (Figura 3.7), del mismo modo el efecto de las diferentes dosis de silicato de magnesio evaluadas en las fuentes fosfóricas (ST, FDA), también resultó con tendencias lineales positivas con diferencia estadística significativa, de manera que a 6 t.ha⁻¹ resultó con peso de MS radicular en promedio de 10.30 y 14.35 g respectivamente (Figura 3.7).

El desarrollo radicular está influenciado por la concentración de elementos tóxicos en suelos ácidos como el aluminio y el manganeso (Havlin et al., 2017), siendo la dolomita una enmienda que minimiza el problema (Fageria et al., 2014; Fageria & Baligar, 2008) y silicato de magnesio (Cabral et al., 2008; Carvalho-Pupatto et al., 2004; Peregrina et al., 2008).

Figura 3.7

Tendencia lineal del peso de la MS radicular del maíz por efecto de enmiendas de dolomita y silicato de magnesio en las fuentes fosfóricas (ST, FDA) en un suelo ácido de selva. Pichari, cusco 2021



Materia seca del vástago

En el análisis de variancia (ANVA) para el peso de la MS del vástago se observa en la tabla 3.8, resultó que existe diferencia estadística significativa entre las enmiendas empleadas, producto de la evaluación biométrica realizada una vez concluida el experimento.

Tabla 3.8

Análisis de variancia de la MS del vástago del maíz en suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021

FV	GL	SC	CM	Fc	p-valor	Sig
Tratamientos (T)	15	180.678	12.0452	2.24	0.027	*
F. fosfórica (P)	1	1.841	1.8408	0.34	0.563	n.s.
Enmienda (E)	7	105.069	15.010	2.79	0.022	*
Error	32	172.092	5.3779			
Total	47	352.770				

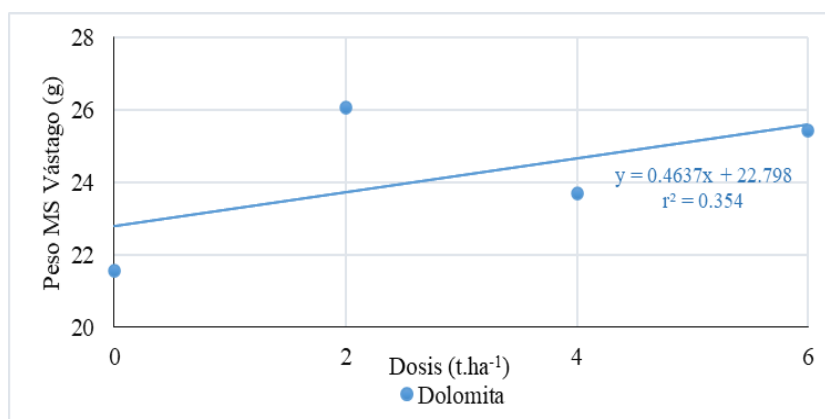
Promedio: 24.20 g

CV : 9.58 %

De acuerdo al análisis de varianza del cuadro anterior el efecto de la dolomita resultó con una diferencia estadística significativa y una tendencia lineal positiva de manera que a 6 t.ha⁻¹ resultó 25.57 g de MS del vástago en promedio (Figura 3.8).

Figura 3.8

Tendencia lineal del peso MS del vástago del maíz por efecto de la dolomita de un suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021



De acuerdo a los resultados con dolomita en el presente trabajo, resultados similares se han encontrado por Fageria & Baligar (2008), donde informaron que la mejora de los rendimientos de los cultivos debido al uso de cal dolomítica en los suelos ácidos están asociados a los cambios favorables en las características físicas, químicas y biológicas del suelo, de la misma manera Fageria et al. (2014), la aplicación de dolomita de 1.15 g.kg⁻¹ suelo tuvo una variación de 49% en el rendimiento de MS del vástago de soya con respecto al testigo. La aplicación de silicato de magnesio no tuvo diferencia significativa en el presente experimento, no obstante en diversos trabajos en condiciones de suelos ácidos tuvieron resultados con diferencia significativa con la aplicación de ésta fuente, es así que Cabral et al. (2008), menciona que a dosis crecientes de silicato de magnesio aplicados en surco y en área total tuvieron diferencias significativas con respecto al testigo

Altura de planta

En el análisis de variancia (ANVA) para la altura de planta se observa en la tabla 3.9, resultó que existe una diferencia estadística altamente significativa entre las interacciones de fuentes fosfóricas (P) y enmiendas (E), como resultado de la evaluación biométrica realizada una vez concluida el experimento.

Tabla 3.9

Análisis de variancia de la altura de planta del maíz en suelo ácido de selva con enmienda cálcica, silícica y fuente fosfórica. Pichari, Cusco 2021

FV	GL	SC	CM	Fc	p-valor	Sig
Tratamientos (T)	15	371.313	24.754	6.680	<.0001	**
F. fosfórica (P)	1	22.687	22.688	6.120	0.02	*
Enmienda (E)	7	147.479	21.068	5.680	0.00	**
P x E	7	201.146	28.735	7.750	<.0001	**
Error	32	118.667	3.708			
Total	47	489.979				

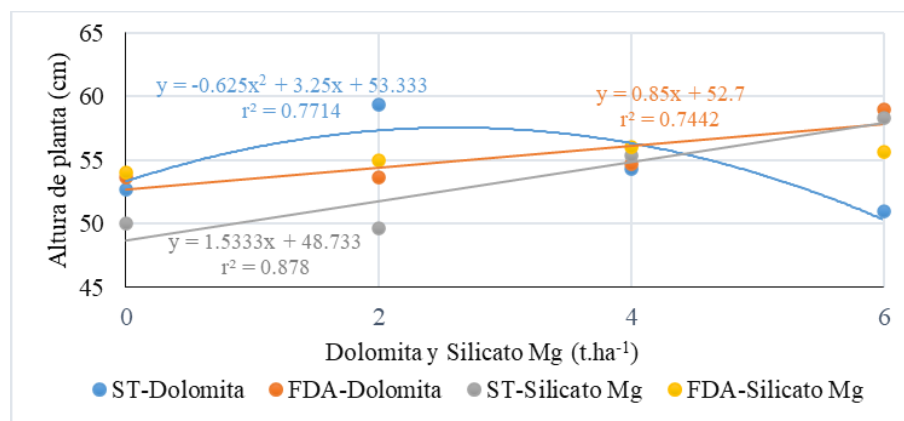
Promedio : 54.53 cm

CV : 3.53 %

El efecto de las diferentes dosis dolomita evaluadas en el ST resultó con una regresión cuadrática con diferencia estadística altamente significativa, de manera que a 2.6 t.ha⁻¹ se tuvo la máxima altura de planta promedio con 54.96 cm de igual manera efecto de las diferentes dosis de dolomita evaluadas para el FDA, resultó con una tendencia lineal positiva con diferencia estadística altamente significativa, de manera que a 6 t.ha⁻¹ resultó con 57.8 cm de altura planta en promedio, por último el efecto de las diferentes dosis de silicato de magnesio evaluadas en el ST, resultó con una regresión lineal y positiva con diferencia estadística significativa, de manera que a 6 t.ha⁻¹ resultó con 57.93 cm de altura de planta en promedio y sin encontrar una interacción estadística significativa entre silicato de magnesio y FDA.

Figura 3.9

Tendencia lineal y cuadrática de la altura de planta del maíz por efecto de la dolomita y silicato de Mg con fuentes fosfóricas (ST, FDA) en un suelo ácido de selva. Pichari, Cusco 2021



CONCLUSIONES

1. En las características químicas del suelo la aplicación de 6 t.ha⁻¹ de dolomita incrementó significativamente a 5.15 y 4.93 para valores de pH; 2.34 y 2.51 cmol₍₊₎.kg⁻¹ calcio intercambiable con el ST y FDA respectivamente, también redujo significativamente el contenido de aluminio intercambiable a 0.17 y 0.32 cmol₍₊₎.kg⁻¹ con el ST y FDA respectivamente; el uso de silicato de magnesio a una dosis de 6 t.ha⁻¹ de incrementó a 4.58 y 4.41 para de valores de pH con el ST y FDA respectivamente no hubo diferencia significativa para el calcio intercambiable, pero redujo significativamente el contenido de aluminio intercambiable a 0.59 y 0.98 cmol₍₊₎.kg⁻¹ con ST y FDA respectivamente. A dosis creciente de dolomita y silicato de magnesio aumentó significativamente el magnesio intercambiable de modo que al aplicar 6 t.ha⁻¹ resultó con promedios de 0.95 y 0.81 cmol₍₊₎.kg⁻¹ respectivamente.
2. En las variables biométricas a una dosis de 6 t.ha⁻¹ de dolomita aumentó significativamente la longitud de raíz y el peso de MS radicular, siendo 27.60 y 20.27

cm para longitud de raíz, 12.86 y 15.14 g de materia seca radicular con el ST y FDA respectivamente; asimismo, la aplicación de 6 t.ha⁻¹ de silicato de magnesio aumentó significativamente la longitud de raíz y el peso de materia seca radicular siendo 21.10 y 25.40 cm para la longitud de raíz, 10.30 y 14.35 g para la materia seca radicular cel ST y FDA respectivamente y sólo la aplicación de dolomita a una dosis de 6 t.ha⁻¹ aumentó significativamente a 25.57 g de materia seca del vástago. La aplicación de 6 t.ha⁻¹ dolomita alcanzó la máxima altura de maíz de 54.96 cm con el ST, 57.8 cm con el FDA y de 57.93 cm con el ST.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alewell, C. (2003). Acid Inputs into the Soils from Acid Rain. In Z. Rengel (Ed.), *Handbook of Soil Acidity* (p. 496). Marcel Dekker. <https://doi.org/10.1201/9780203912317.ch3>
- Álvarez, C., & Osorio, W. (2014). *Silicio Agronomicamente Esencial*. Universidad Nacional de Colombia.
- Bolan, N. S., Adriano, D. C., & Curtin, D. (2003). Soil acidification and liming interactions with nutrient and heavy metal transformation and bioavailability. *Advances in Agronomy*, 78, 215–272. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(02\)78006-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(02)78006-1)
- Brassioli, F., Prado, R., & Fernandes, F. (2009). Avaliação agrônômica da escória de siderurgia na cana-de-açúcar durante cinco ciclos de produção. *Bragantia*, 68(2), 381–387. <https://doi.org/10.1590/s0006-87052009000200012>
- Cabral, N., Venancio, R., Silva, M., Brito, J., Carbone, M., & Seron, H. (2008). Formas de aplicação de silicato de cálcio e magnésio na cultura do sorgo em neossolo quartzarênico de cerrado. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 38.
- Camargo, M., Seron, H., Korndorfer, G., Araujo, A., & Borges, C. (2007). Soil reaction and absorption of silicon by rice. *Scientia Agrícola*, 64(2), 176–180. <https://doi.org/10.1590/s0103-90162007000200011>
- Carvalho-Pupatto, J., Büll, L., & Costa, C. (2004). Soil chemical attributes, root growth and rice yield according to slag application. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 39(12), 1213–1218. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2004001200008>
- Conislla, A. (2019). *Clima del distrito de Pichari*. Municipalidad distrital de Pichari, Cusco. Pichari: Mejoramiento de capacidades para el ordenamiento territorial y el mejor uso de los suelos de Pichari, distrito de Pichari -La Convención -Cusco.
- Espinosa, J. (2001). *Acidez y encalado de los Suelos* (F. Silva (ed.); 2nd ed.). Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo.

- Fageria, N. (2006). Liming and copper fertilization in dry bean production on an oxisol in no-tillage system. *Journal of Plant Nutrition*, 29(7), 1219–1228. <https://doi.org/10.1080/01904160600767435>
- Fageria, N., & Baligar, V. (2008). Ameliorating Soil Acidity of Tropical Oxisols by Liming For Sustainable Crop Production. In Elsevier Inc (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 99, Issue 08, pp. 345–399). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)00407-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)00407-0)
- Fageria, N., Baligar, V., & Zobel, R. (2007). Yield, nutrient uptake, and soil chemical properties as influenced by liming and boron application in common bean in a no-tillage system. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 38(11–12), 1637–1653. <https://doi.org/10.1080/00103620701380413>
- Fageria, N., Moreira, A., Moraes, L., & Moraes, M. (2014). Influence of Lime and Gypsum on Yield and Yield Components of Soybean and Changes in Soil Chemical Properties. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 45(3), 271–283. <https://doi.org/10.1080/00103624.2013.861906>
- Fageria, N., & Nascente, A. (2014). Management of soil acidity of South American soils for sustainable crop production. In D. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 128, pp. 221–275). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802139-2.00006-8>
- George, E., Horst, W. J., & Neumann, E. (2012). Adaptation of Plants to Adverse Chemical Soil Conditions. In *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants* (3rd ed., pp. 409–472). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00017-0>
- Havlin, J., Tisdale, S., Nelson, W., & Beaton, J. (2017). *Soil Fertility and Fertilizers An Introduction to Nutrient Management* (8th ed.). Pearson.
- Manahan, S. (2017). *Environmental Chemistry* (G. Taylor & Francis (ed.); 10th ed.) [CRC Press]. <https://doi.org/10.1021/ed078p1169>
- Matichenkov, V. . (2008). *Deficiencia y funcionalidad del sílice en suelos, cosechas y alimentos*. 431–438.
- Peregrina, F., Mariscal, I., Ordóñez, R., González, P., Terefe, T., & Espejo, R. (2008). Agronomic Implications of Converter Basic Slag as a Magnesium Source on Acid Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 72(2), 402–411. <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0197>
- Prado, R., & Fernandes, F. (2003). Efeito residual da escória de siderurgia como corretivo de acidez do solo na soqueira de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 25(1), 199–207. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832001000100021>
- Weil, R., & Brady, N. (2017). *The Nature and Properties of Soils* (15th ed.). Pearson.