

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE AGRONOMÍA



**“FUENTES ENCALANTES Y FOSFATADAS EN LA
RECUPERACIÓN DE UN SUELO ÁCIDO DE TINGO MARÍA, EN
MAÍZ (*Zea mays* L.) EN INVERNADERO”**

**Presentado por
FERNANDO BRAULIO CHUNG MONTOYA**

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

**Lima-Perú
2019**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE AGRONOMÍA

**“FUENTES ENCALANTES Y FOSFATADAS EN LA
RECUPERACIÓN DE UN SUELO ÁCIDO DE TINGO MARÍA, EN
MAÍZ (*Zea mays* L.) EN INVERNADERO”**

**Presentado por
FERNANDO BRAULIO CHUNG MONTOYA**

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

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Ing. Mg. Sc. Julián Chura Chuquiya

PRESIDENTE

Dr. Oscar Loli Figueroa

ASESOR

Ing. Mg. Sc. Braulio La Torre Martínez

MIEMBRO

Ing. Mg. Sc. Luis Tomassini Vidal

MIEMBRO

DEDICATORIA

Al Gran Creador, a mi padre Raúl, a Pancho y a las almendras.

AGRADECIMIENTOS

A mi mamá Luz y mi padrastro Roger, por su apoyo durante todo este tiempo, gracias por todo.

A mis hermanos, Sujin y Jorge, por el amor infinito que siempre me han mostrado, considero que nuestro padre estaría muy orgulloso de nosotros.

A Amanda, por ser quien eres, y porque me ayudas a ser mejor persona cada día. Gracias por el amor, la comprensión y el empuje para llegar a concretar todo esto.

Al Dr. Óscar Loli Figueroa, por su gran labor como mentor, como profesor y como ejemplo.

A los miembros del jurado: Ing. Mg Sc. Luis Tomassini Vidal, Ing. Mg. Sc. Braulio La Torre Martínez y al Ing. Mg. Sc. Julian Chura Chuquiya por sus aportes y correcciones en el presente trabajo.

Al Sr. Mario y al Sr. Óscar, por su apoyo en el Laboratorio e Invernadero de Fertilidad del Suelo, en los análisis foliares y radiculares.

Al Ing. MS. Grimaldo Febres, por su apoyo y sus consejos en la revisión estadística del experimento.

A la Sra. Jesús Gutiérrez y la Sra. Rosmery Arteaga, por su empuje y su apoyo para poder llegar a concretar la sustentación de la tesis.

A Jorge Steven Rodríguez, por siempre estar presto a ayudarme durante la instalación y el manejo de la tesis.

A Carlos Mestanza Novoa, por su apoyo y explicación de los análisis estadísticos con los códigos R.

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

ÍNDICE GENERAL

I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivo general	2
1.2. Objetivos específicos	2
II. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Acidez del suelo	3
2.1.1. Origen de la acidez del suelo.....	3
2.1.2. Fuentes de la acidez del suelo	3
2.1.3. Hidrólisis del aluminio	6
2.1.4. Tipos de acidez del suelo	8
2.1.5. Características nutricionales de los suelos ácidos.....	9
2.2. El fósforo.....	11
2.2.1. El fósforo en la planta	11
2.2.2. El fósforo en suelos ácidos	12
2.2.3. Fuentes de fósforo y su influencia en el pH del suelo	14
2.3. Encalado	14
2.3.1. Fundamento	14
2.3.2. Materiales encalantes	16
2.3.3. Uso del silicio para atenuar la acidez del suelo.....	17
III. MATERIALES Y MÉTODOS	21
3.1. Ubicación del campo experimental	21
3.2. Suelo experimental.....	21
3.2.1. Muestreo del suelo	21
3.2.2. Análisis de caracterización	21
3.3. Enmiendas encalantes.....	22
3.4. Factores en estudio.....	22
3.5. Materiales, insumos y equipos	24

3.5.1.	Materiales	24
3.5.2.	Insumos.....	24
3.5.3.	Equipos	25
3.6.	Métodos y procedimientos.....	25
3.6.1.	Fase de macetería.....	25
3.6.2.	Evaluaciones realizadas	25
3.7.	Diseño experimental	28
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	31
4.1.	En las propiedades del suelo experimental.....	31
4.1.1.	pH.....	31
4.1.2.	Acidez cambiable	35
4.1.3.	Aluminio cambiable.....	38
4.2.	Análisis foliar y radicular.....	42
4.2.1.	Peso seco	42
4.2.2.	Nitrógeno	49
4.2.3.	Fósforo	56
4.2.4.	Potasio.....	61
4.2.5.	Magnesio.....	68
4.2.6.	Calcio	74
V.	CONCLUSIONES	80
VI.	RECOMENDACIONES.....	81
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
VIII.	ANEXOS	94

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Características físicas – químicas del suelo analizado.....	23
Cuadro 2: Tratamientos evaluados en el ensayo experimental.....	24
Cuadro 3: Esquema del análisis de varianza.....	29
Cuadro 4: Comparaciones de los promedios de pH obtenidos entre las dosis y evaluadas en los diferentes materiales encalantes.....	31
Cuadro 5: Comparaciones de los promedios de pH obtenidos entre los materiales encalantes y evaluadas en las diferentes dosis.....	32
Cuadro 6: Comparaciones de los promedios de pH obtenidos entre las diferentes fuentes de fósforo después de la cosecha.....	33
Cuadro 7: Comparaciones de los promedios de pH obtenidos entre los materiales encalantes y evaluadas en las diferentes fuentes de fósforo después de incubación.....	34
Cuadro 8: Comparaciones de los promedios de pH obtenidos entre las fuentes de fósforo y evaluadas en los diferentes materiales encalantes después de incubación.....	35
Cuadro 9: Comparaciones de los promedios de acidez cambiante obtenidos entre las dosis y evaluadas en los diferentes materiales encalantes.....	36
Cuadro 10: Comparaciones de los promedios de acidez cambiante obtenidos entre los materiales encalantes y evaluadas en las diferentes dosis.....	37
Cuadro 11: Comparaciones de los promedios de acidez cambiante obtenidos entre las diferentes fuentes de fósforo.....	38
Cuadro 12: Comparaciones de los promedios de aluminio cambiante obtenidos entre las dosis y evaluadas en los diferentes materiales encalantes.....	38
Cuadro 13: Comparaciones de los promedios de acidez cambiante obtenidos entre los materiales encalantes y evaluadas en las diferentes dosis.....	39
Cuadro 14: Comparaciones de los promedios de aluminio cambiante obtenidos entre las dosis y evaluadas en las diferentes fuentes de fósforo.....	40
Cuadro 15: Comparaciones de los promedios de aluminio cambiante obtenidos entre las fuentes de fósforo y evaluadas en las diferentes dosis.....	42
Cuadro 16: Comparaciones de los promedios de peso seco obtenidos entre las dosis y evaluadas en los diferentes materiales encalantes y fuentes de fósforo.....	43
Cuadro 17: Comparaciones de los promedios de peso seco obtenidos entre los materiales encalantes y evaluadas en las diferentes dosis y fuentes de fósforo.....	45

Cuadro 18: Comparaciones de los promedios de peso seco obtenidos entre las fuentes de fósforo y evaluadas en los diferentes materiales encalantes y dosis.	47
Cuadro 19: Comparaciones de los promedios de extracción de N obtenidos entre las dosis y evaluadas en los diferentes materiales encalantes y fuentes de fósforo.	49
Cuadro 20: Comparaciones de los promedios de extracción de N obtenidos entre los materiales encalantes y evaluadas en las diferentes dosis y fuentes de fósforo.	51
Cuadro 21: Comparaciones de los promedios de extracción de N obtenidos entre las fuentes de fósforo y evaluadas en los diferentes materiales encalantes y dosis.	54
Cuadro 22: Comparaciones de los promedios de extracción de P obtenidos entre las dosis y evaluadas en los diferentes materiales encalantes y fuentes de fósforo.	56
Cuadro 23: Comparaciones de los promedios de extracción de P obtenidos entre los materiales encalantes y evaluadas en las diferentes dosis y fuentes de fósforo.	58
Cuadro 24: Comparaciones de los promedios de extracción de P obtenidos entre las fuentes de fósforo y evaluadas en los diferentes materiales encalantes y dosis.	60
Cuadro 25: Comparaciones de los promedios de extracción de K obtenidos entre las dosis y evaluadas en los diferentes materiales encalantes y fuentes de fósforo.	62
Cuadro 26: Comparaciones de los promedios de extracción de K obtenidos entre los materiales encalantes y evaluadas en las diferentes dosis y fuentes de fósforo.	64
Cuadro 27: Comparaciones de los promedios de extracción de K obtenidos entre las fuentes de fósforo y evaluadas en los diferentes materiales encalantes y dosis.	66
Cuadro 28: Comparaciones de los promedios de extracción de Mg obtenidos entre las dosis y evaluadas en los diferentes materiales encalantes y fuentes de fósforo.	68
Cuadro 29: Comparaciones de los promedios de extracción de Mg obtenidos entre los materiales encalantes y evaluadas en las diferentes dosis y fuentes de fósforo.	70
Cuadro 30: Comparaciones de los promedios de extracción de Mg obtenidos entre las fuentes de fósforo y evaluadas en los diferentes materiales encalantes y dosis.	72
Cuadro 31: Comparación de los promedios de extracción de Ca foliar obtenidos entre las dosis y evaluadas en los diferentes materiales encalantes.	74
Cuadro 32: Comparación de los promedios de extracción de Ca foliar obtenidos entre los materiales encalantes y evaluadas en las diferentes dosis.	75
Cuadro 33: Comparación de los promedios de extracción de Ca foliar obtenidos entre las dosis y evaluadas en las diferentes fuentes de fósforo.	75
Cuadro 34: Comparación de los promedios de extracción de Ca foliar obtenidos entre las fuentes de fósforo y evaluadas en las diferentes dosis.	76

Cuadro 35: Comparaciones de los promedios de extracción de Ca radicular obtenidos entre las dosis y evaluadas en los diferentes materiales encalantes y fuentes de fósforo.	76
Cuadro 36: Comparaciones de los promedios de extracción de Ca radicular obtenidos entre los materiales encalantes y evaluadas en las diferentes dosis y fuentes de fósforo.	77
Cuadro 37: Comparaciones de los promedios de extracción de Ca radicular obtenidos entre las fuentes de fósforo y evaluadas en los diferentes materiales encalantes y dosis.	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Relación entre el pH y la distribución y carga promedio de especies de Al soluble.....	8
Figura 2: Cambios en el pH después de la aplicación de 4 dosis de silicato de magnesio y dolomita.....	32
Figura 3: Efecto de la aplicación de silicato de magnesio y dolomita a diferentes dosis de material encalante en el pH del suelo.....	33
Figura 4: Cambios en la acidez cambiante después de la aplicación de 4 dosis de silicato de magnesio y dolomita.....	36
Figura 5: Efecto de la aplicación de silicato de magnesio y dolomita a diferentes dosis de material encalante en la acidez cambiante del suelo.....	37
Figura 6: Cambios en el aluminio cambiante después de la aplicación de 4 dosis de silicato de magnesio y dolomita.....	39
Figura 7: Efecto de la aplicación de silicato de magnesio y dolomita a diferentes dosis de material encalante en el aluminio cambiante del suelo.....	40
Figura 8: Cambios en el aluminio cambiante después de la aplicación de 4 dosis de material encalante junto con FDA o ST como fuentes de fósforo.....	41
Figura 9: Efecto de la aplicación de FDA y ST a diferentes dosis de material encalante en el aluminio cambiante del suelo.....	42
Figura 10: Efecto de la dosis de material encalante en el peso seco foliar en los diferentes materiales encalantes y fuentes de fósforo.....	44
Figura 11: Efecto de la dosis de material encalante en el de peso seco radicular en los diferentes materiales encalantes y fuentes de fósforo.....	44
Figura 12: Efecto de los materiales encalantes en el peso seco foliar en las diferentes dosis y fuentes de fósforo.....	45
Figura 13: Efecto de los materiales encalantes en la producción de peso seco radicular en las diferentes dosis y fuentes de fósforo.....	46
Figura 14: Efecto de las fuentes de fósforo en la producción de peso seco foliar en los diferentes materiales encalantes y dosis.....	48
Figura 15: Efecto de las fuentes de fósforo en la producción de peso seco radicular en los diferentes materiales encalantes y dosis.....	48

Figura 16: Efecto de las dosis de material encalante en la extracción de nitrógeno foliar en los diferentes materiales encalantes y fuentes de fósforo.	50
Figura 17: Efecto de las dosis de material encalante en la extracción de nitrógeno radicular en los diferentes materiales encalantes y fuentes de fósforo.	51
Figura 18: Efecto de los materiales encalantes en la extracción de nitrógeno foliar en las diferentes dosis y fuentes de fósforo.	52
Figura 19: Efecto de los materiales encalantes en la extracción de nitrógeno radicular en las diferentes dosis y fuentes de fósforo.	52
Figura 20: Efecto de las fuentes de fósforo en la extracción de nitrógeno foliar en los diferentes materiales encalantes y dosis.	55
Figura 21: Efecto de las fuentes de fósforo en la extracción de nitrógeno radicular en los diferentes materiales encalantes y dosis.	55
Figura 22: Efecto de las dosis de material encalante en la extracción de fósforo foliar en los diferentes materiales encalantes y fuentes de fósforo.	57
Figura 23: Efecto de las dosis de material encalante en la extracción de fósforo radicular en los diferentes materiales encalantes y fuentes de fósforo.	57
Figura 24: Efecto de los materiales encalantes en la extracción de fósforo foliar en las diferentes dosis y fuentes de fósforo.	59
Figura 25: Efecto de los materiales encalantes en la extracción de fósforo radicular en las diferentes dosis y fuentes de fósforo.	59
Figura 26: Efecto de las fuentes de fósforo en la extracción de fósforo foliar en los diferentes materiales encalantes y dosis.	60
Figura 27: Efecto de las fuentes de fósforo en la extracción de fósforo radicular en los diferentes materiales encalantes y dosis.	61
Figura 28: Efecto de las dosis de material encalante en la extracción de potasio foliar en los diferentes materiales encalantes y fuentes de fósforo.	63
Figura 29: Efecto de las dosis de material encalante en la extracción de potasio radicular en los diferentes materiales encalantes y fuentes de fósforo.	63
Figura 30: Efecto de los materiales encalantes en la extracción de potasio foliar en las diferentes dosis y fuentes de fósforo.	65
Figura 31: Efecto de los materiales encalantes en la extracción de potasio radicular en las diferentes dosis y fuentes de fósforo.	65
Figura 32: Efecto de las fuentes de fósforo en la extracción de potasio foliar en los diferentes materiales encalantes y dosis.	67

Figura 33: Efecto de las fuentes de fósforo en la extracción de potasio radicular en los diferentes materiales encalantes y dosis.	67
Figura 34: Efecto de las dosis de material encalante en la extracción de magnesio foliar en los diferentes materiales encalantes y fuentes de fósforo.	69
Figura 35: Efecto de las dosis de material encalante en la extracción de magnesio radicular en los diferentes materiales encalantes y fuentes de fósforo.	69
Figura 36: Efecto de los materiales encalantes en la extracción de magnesio foliar en las diferentes dosis y fuentes de fósforo.	71
Figura 37: Efecto de los materiales encalantes en la extracción de magnesio radicular en las diferentes dosis y fuentes de fósforo.	71
Figura 38: Efecto de las fuentes de fósforo en la extracción de magnesio foliar en los diferentes materiales encalantes y dosis.	73
Figura 39: Efecto de las fuentes de fósforo en la extracción de magnesio radicular en los diferentes materiales encalantes y dosis.	73
Figura 40: Efecto de las dosis de material encalante en la extracción de calcio radicular en los diferentes materiales encalantes y fuentes de fósforo.	77
Figura 41: Efecto de los materiales encalantes en la extracción de calcio radicular en las diferentes dosis y fuentes de fósforo.	78
Figura 42: Efecto de las fuentes de fósforo en la extracción de calcio radicular en los diferentes materiales encalantes y dosis.	79

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Análisis de varianza y análisis de los supuestos para el pH del suelo después de incubación.....	94
Anexo 2: Análisis de varianza y análisis de los supuestos para la acidez cambiante del suelo.....	95
Anexo 3: Efecto del material encalante en la acidez cambiante del material de suelo..	96
Anexo 4: Efecto de las dosis en la acidez cambiante del material de suelo.....	96
Anexo 5: Análisis de varianza y análisis de los supuestos para el aluminio cambiante del suelo.....	97
Anexo 6: Efecto del material encalante en el aluminio cambiante del material de suelo.	98
Anexo 7: Efecto de la dosis en el aluminio cambiante del material de suelo.	98
Anexo 8: Efecto de la fuente de fósforo en el aluminio cambiante del material de suelo.	98
Anexo 9: Análisis de varianza y análisis de los supuestos para el pH del suelo después de cosecha.....	99
Anexo 10: Efecto del material encalante en el pH del material de suelo.....	100
Anexo 11: Efecto de las dosis de material encalante en el pH del material de suelo. .	100
Anexo 12: Análisis de varianza y análisis de los supuestos para el peso seco de la parte foliar.	101
Anexo 13: Análisis de varianza y análisis de los supuestos para el peso seco de la parte radicular.....	102
Anexo 14: Efecto del material encalante en la producción de peso seco en hoja y raíz.	103
Anexo 15: Efecto de la dosis de material encalante en la producción de peso seco en hoja y raíz.	103
Anexo 16: Efecto de la fuente de fósforo en la producción de peso seco en hoja y raíz.	103
Anexo 17: Análisis de varianza y análisis de los supuestos para absorción de nitrógeno de la parte foliar.....	104
Anexo 18: Análisis de varianza y análisis de los supuestos para absorción de nitrógeno de la parte radicular.	105

Anexo 19: Efecto del material encalante en la extracción de nitrógeno en hoja y raíz.	106
Anexo 20: Efecto de la dosis de material encalante en la extracción de nitrógeno en hoja y raíz.	106
Anexo 21: Efecto de la fuente de fósforo en la extracción de nitrógeno en hoja y raíz.	106
Anexo 22: Análisis de varianza y análisis de los supuestos para absorción de fósforo de la parte foliar.....	107
Anexo 23: Análisis de varianza y análisis de los supuestos para absorción de fósforo de la parte radicular.	108
Anexo 24: Efecto del material encalante en la extracción de fósforo en hoja y raíz. ..	109
Anexo 25: Efecto de la dosis de material encalante en la extracción de fósforo en hoja y raíz.	109
Anexo 26: Efecto de la fuente de fósforo en la extracción de fósforo en hoja y raíz. .	109
Anexo 27: Análisis de varianza y análisis de los supuestos para absorción de potasio de la parte foliar.....	110
Anexo 28: Análisis de varianza y análisis de los supuestos para absorción de potasio de la parte radicular.	111
Anexo 29: Efecto de enmiendas encalantes en la extracción de potasio en hoja y raíz.	112
Anexo 30: Efecto de las dosis de las enmiendas encalantes en la extracción de potasio en hoja y raíz.	112
Anexo 31: Efecto de las fuentes de fósforo en la extracción de potasio en hoja y raíz.	112
Anexo 32: Análisis de varianza y análisis de los supuestos para absorción de magnesio de la parte foliar.....	113
Anexo 33: Análisis de varianza y análisis de los supuestos para absorción de magnesio de la parte radicular.	114
Anexo 34: Efecto del material encalante en la extracción de magnesio en hoja y raíz.	115
Anexo 35: Efecto de la dosis de material encalante en la extracción de magnesio en hoja y raíz.	115
Anexo 36: Efecto de la fuente de fósforo en la extracción de magnesio en hoja y raíz.	115

Anexo 37: Análisis de varianza y análisis de los supuestos para absorción de calcio de la parte foliar.....	116
Anexo 38: Análisis de varianza y análisis de los supuestos para absorción de calcio de la parte radicular.	117
Anexo 39: Efecto del material encalante en la absorción de calcio en hoja y raíz.	118
Anexo 40: Efecto de la dosis de material encalante en la absorción de calcio en hoja y raíz.	118
Anexo 41: Efecto de la fuente de fósforo en la absorción de calcio en hoja y raíz.	118
Anexo 42: Análisis de efectos simples de la variable pH del material del suelo después de incubación.....	119
Anexo 43: Análisis de efectos simples de la variable pH del material del suelo después de cosecha.....	119
Anexo 44: Análisis de efectos simples de la variable acidez cambiante del material del suelo.....	120
Anexo 45: Análisis de efectos simples de la variable aluminio cambiante del material del suelo.....	120
Anexo 46: Análisis de efectos simples de la variable peso seco foliar.....	121
Anexo 47: Análisis de efectos simples de la variable peso seco foliar.....	122
Anexo 48: Análisis de efectos simples de la variable peso seco radicular.	123
Anexo 49: Análisis de efectos simples de la variable peso seco radicular.	124
Anexo 50: Comparaciones de los promedios de peso seco obtenidos entre las dosis y evaluadas en los diferentes materiales encalantes.	125
Anexo 51: Comparaciones de los promedios de peso seco obtenidos entre los materiales encalantes y evaluadas en las diferentes dosis.....	125
Anexo 52: Comparaciones de los promedios de peso seco obtenidos entre las fuentes de fósforo y evaluadas en los diferentes materiales encalantes.....	125
Anexo 53: Análisis de efectos simples de la variable absorción de nitrógeno foliar...	126
Anexo 54: Análisis de efectos simples de la variable absorción de nitrógeno foliar.	127
Anexo 55: Análisis de efectos simples de la variable absorción de nitrógeno radicular.	128
Anexo 56: Análisis de efectos simples de la variable absorción de nitrógeno radicular.	129

Anexo 57: Comparaciones de los promedios de extracción de N obtenidos entre las dosis y evaluadas en los diferentes materiales encalantes.	130
Anexo 58: Comparaciones de los promedios de extracción de N obtenidos entre los materiales encalantes y evaluadas en las diferentes dosis.	130
Anexo 59: Comparaciones de los promedios de extracción de N obtenidos entre las fuentes de fósforo y evaluadas en los diferentes materiales encalantes.	130
Anexo 60: Análisis de efectos simples de la variable absorción de fósforo foliar.	131
Anexo 61: Análisis de efectos simples simples de la variable absorción de fósforo foliar.	132
Anexo 62: Análisis de efectos simples de la variable absorción de fósforo radicular.	133
Anexo 63: Análisis de efectos simples simples de la variable absorción de fósforo radicular.	134
Anexo 64: Comparaciones de los promedios de extracción de P obtenidos entre las dosis y evaluadas en los diferentes materiales encalantes.	135
Anexo 65: Comparaciones de los promedios de extracción de P obtenidos entre los materiales encalantes y evaluadas en las diferentes dosis.	135
Anexo 66: Comparaciones de los promedios de extracción de P obtenidos entre las fuentes de fósforo y evaluadas en los diferentes materiales encalantes.	135
Anexo 67: Análisis de efectos simples de la variable absorción de potasio foliar.	136
Anexo 68: Análisis de efectos simples simples de la variable absorción de potasio foliar.	137
Anexo 69: Análisis de efectos simples de la variable absorción de potasio radicular.	138
Anexo 70: Análisis de efectos simples simples de la variable absorción de potasio radicular.	139
Anexo 71: Comparaciones de los promedios de extracción de K obtenidos entre las dosis y evaluadas en los diferentes materiales encalantes.	140
Anexo 72: Comparaciones de los promedios de extracción de K obtenidos entre los materiales encalantes y evaluadas en las diferentes dosis.	140
Anexo 73: Comparaciones de los promedios de extracción de K obtenidos entre las fuentes de fósforo y evaluadas en los diferentes materiales encalantes.	140
Anexo 74: Análisis de efectos simples de la variable absorción de magnesio foliar...	141
Anexo 75: Análisis de efectos simples simples de la variable absorción de magnesio foliar.	142

Anexo 76: Análisis de efectos simples de la variable absorción de magnesio radicular.	143
Anexo 77: Análisis de efectos simples simples de la variable absorción de magnesio radicular.....	144
Anexo 78: Comparaciones de los promedios de extracción de Mg obtenidos entre las dosis y evaluadas en los diferentes materiales encalantes.	145
Anexo 79: Comparaciones de los promedios de extracción de Mg obtenidos entre los materiales encalantes y evaluadas en las diferentes dosis.	145
Anexo 80: Comparaciones de los promedios de extracción de Mg obtenidos entre las fuentes de fósforo y evaluadas en los diferentes materiales encalantes.	145
Anexo 81: Análisis de efectos simples de la variable absorción de calcio foliar.	146
Anexo 82: Análisis de efectos simples de la variable absorción de calcio radicular...	147
Anexo 83: Análisis de efectos simples simples de la variable absorción de calcio radicular.....	148
Anexo 84: Comparaciones de los promedios de extracción de Ca obtenidos entre las dosis y evaluadas en los diferentes materiales encalantes.	149
Anexo 85: Comparaciones de los promedios de extracción de Ca obtenidos entre los materiales encalantes y evaluadas en las diferentes dosis.	149

RESUMEN

Un ensayo fue realizado en el Laboratorio e Invernadero de Fertilidad del Suelo de la Universidad Nacional Agraria La Molina, para evaluar el efecto de la dolomita y el silicato de magnesio como encalantes, junto con dos fuentes de fósforo, fosfato diamónico (FDA) y superfosfato triple (ST), en la corrección de un suelo ácido proveniente de Tingo María, y en la absorción de fósforo en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.). Cada una de las fuentes encalantes fueron aplicadas para desplazar 0, 3.1, 6.2 y 12.4 m-eq $H^+ + Al^{3+}/100$ g de suelo en macetas de 3 kg, para luego ser incubadas al 80% de su capacidad de campo durante 45 días, y posteriormente ser sembradas con maíz. Se empleó un diseño completo al azar con arreglo factorial de 2x4x2, con tres repeticiones, en el que se evaluó el pH, después de incubación y cosecha; la acidez cambiante y el aluminio cambiante del material de suelo y el peso seco y la extracción de N, P, K, Ca y Mg, foliar y radicular, en la cosecha. El silicato de magnesio aplicado a dosis de 12.4 m-eq/100 g de suelo incrementó el pH, y disminuyó la acidez cambiante y aluminio cambiante del suelo. El aumento del pH y la disminución de la acidez cambiante y el aluminio cambiante producido por la aplicación de silicato de magnesio favoreció la formación de biomasa. El aumento del pH y la disminución de la acidez cambiante y el aluminio cambiante producido por el incremento en las dosis de silicato de magnesio favoreció la formación de biomasa y la absorción de nutrientes, como el N, P, K, Mg y Ca, tanto a nivel foliar como radicular. El uso de FDA como fuente de fósforo permitió un mejor desarrollo en la planta, produciendo las mayores absorciones de N, P, K, Mg y Ca, comparadas con el uso de ST, lo que a su vez permitió una mayor formación de biomasa.

El silicato de magnesio presenta un buen potencial como enmienda encalante para la recuperación de suelos ácidos.

Palabras clave: suelo ácido, silicato de magnesio, *Zea mays*

ABSTRACT

A pot experiment was conducted at the Laboratory and Greenhouse of Soil Fertility of the National Agrarian University La Molina, to evaluate the effect of dolomite and magnesium silicate as liming materials, together with two sources of phosphorus, diammonium phosphate (DAP) and triple superphosphate (TSP), in the correction of an acid soil from Tingo María, and in the absorption of phosphorus in the corn crop (*Zea mays* L.). Each of the liming material were applied to displace 0, 3.1, 6.2 and 12.4 m-eq $H^+ + Al^{3+}/100$ g of soil in 3-kg pots, to be incubated at 80% of field capacity for 45 days, and later to be sown with corn. A complete randomized design with a factorial arrangement of 2x4x2 was used, with three replications, in which soil pH, after incubation and harvesting; the changeable acidity and the changeable aluminum of the soil material and the dry weight and the extraction of N, P, K, Ca and Mg, foliar and radicular, in the harvest, was evaluated. The magnesium silicate applied at a dose of 12.4 m-eq/100 g of soil increased the pH, and the exchangeable acidity and changeable aluminum of the soil decreased. The increase of the pH and the decrease of the changeable acidity and the changeable aluminum produced by the application of magnesium silicate improved the formation of biomass. The increase of the pH and the decrease of the changeable acidity and the changeable aluminum produced by the increase in the doses of magnesium silicate favored the formation of biomass and the absorption of nutrients, such as N, P, K, Mg and Ca, both in leaves and roots. The use of FDA as a source of phosphorus allowed a better development in the plant, producing the greater absorptions of N, P, K, Mg and Ca, compared with the use of ST, which in turn allowed a greater formation of biomass. Magnesium silicate has good potential as a liming material for the recovery of acid soils.

Keywords: acid soil, magnesium silicate, *Zea mays*

I. INTRODUCCIÓN

Las condiciones climáticas tropicales, caracterizadas por altas temperaturas y precipitaciones intensas, son una de las causas más frecuentes del desarrollo de los suelos ácidos en el planeta. Tales suelos pueden corresponder a los órdenes Ultisoles, Alfisoles, Inceptisoles, e incluso Entisoles (Soil Survey Staff, 2014). La acidez del suelo afecta de manera significativa la disponibilidad de nutrientes para las plantas y la actividad de los microorganismos. Los suelos ácidos se caracterizan por ser pobres en fósforo, debido a la reacción del mismo con el aluminio, lo que resulta en minerales de baja solubilidad que no pueden ser tomados por las plantas; son asimismo pobres en calcio, magnesio y potasio debido a la desbasificación del suelo producto de las precipitaciones intensas. Por otro lado, y como factor limitante para el crecimiento de plantas en suelos ácidos, presentan altas concentraciones de aluminio, hierro y eventualmente manganeso, las cuales producen toxicidad para algunas plantas, limitando su crecimiento y afectando la producción de las mismas.

La aplicación de enmiendas encalantes es una de las principales formas de corregir la acidez del suelo. El encalado aplicado de manera adecuada produce cambios químicos importantes en el suelo, los cuales son beneficiosos para el crecimiento vegetal. Las enmiendas utilizadas para el encalado son principalmente óxidos o carbonatos de magnesio y calcio, y su acción se enfoca en desplazar el aluminio intercambiable adsorbido en la superficie de las partículas del suelo y en neutralizar el aluminio liberado a la solución suelo, el cual a su vez es el causante de la baja disponibilidad de fósforo en suelos ácidos.

Las enmiendas silicatadas, en forma de silicatos de calcio y magnesio, son similares en composición a los carbonatos de los metales mencionados, pero presentan mayor actividad química, lo que las convierte en una alternativa para el encalado de los suelos ácidos. A su vez, el silicio ofrece a la planta ciertos beneficios, como una mayor resistencia frente a estreses de carácter biótico y abiótico.

Debido a lo expuesto anteriormente, proponemos que la aplicación de silicato de magnesio en suelos ácidos puede producir un mayor efecto encalante que la dolomita, permitiendo así una reducción de la actividad del aluminio, con la consecuente reducción de la toxicidad del mismo, y un aumento en el nivel de pH, produciendo una mayor disponibilidad de fósforo y los demás nutrientes.

Por tales consideraciones, y teniendo en cuenta la necesidad de realizar investigaciones en los suelos ácidos de nuestro país, se efectuó el presente trabajo de investigación en un suelo ácido de Tingo María con el objetivo de evaluar el efecto de los materiales encalantes y las fuentes fosfatadas en un material de suelo ácido en el cultivo de maíz.

1.1. Objetivo general

Evaluar la factibilidad de la aplicación de silicato de magnesio como enmienda encalante para la corrección de un suelo ácido de Tingo María y para la absorción de fósforo en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.).

1.2. Objetivos específicos

- Evaluar el efecto de la aplicación de cuatro dosis de silicato de magnesio y de dolomita (0, 3.1, 6.2 y 12.4 m-eq/ 100 g) sobre el pH, la acidez cambiante y aluminio cambiante en el suelo ácido experimental.
- Evaluar el efecto de la aplicación de las enmiendas y dosis anteriores sobre rendimiento de materia seca (parte aérea y radicular) de plantas de maíz fertilizadas con dos fuentes de fósforo (superfosfato triple y fosfato diamónico) en un suelo ácido.
- Evaluar el efecto de la aplicación de las enmiendas encalantes y de las fuentes de fósforo sobre la composición nutricional de N, P, K, Ca y Mg en la parte foliar y radicular de la planta de maíz.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Acidez del suelo

2.1.1. Origen de la acidez del suelo

En las zonas tropicales, caracterizadas por periodos largos donde la precipitación es mayor que la evapotranspiración, la acidificación es uno de los procesos principales involucrados en la evolución del suelo (Chesworth, 1992). Los suelos, en sus condiciones naturales, pueden ser ácidos como consecuencia del material de origen, el cual es ácido y naturalmente bajo en los cationes básicos, como Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+ , o por la intensidad de acción de los agentes de intemperismo, como el clima y los microorganismos. A pesar de la tentación siempre presente de atribuir la acidez del suelo a las actividades humanas, es una consecuencia natural de la intemperie. Durante el proceso de intemperismo, los ácidos carbónicos y orgánicos promueven la hidrólisis (disolución) de los minerales del suelo, se produce una mayor remoción de cationes de carácter básico del complejo de intercambio, como Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+ y la consecuente acumulación de cationes de naturaleza ácida, como el Al^{3+} y el H^+ . La materia orgánica del suelo es también fuente de ácidos débiles (donadores de protones con baja ionización). Entre ellos, se destacan los ácidos carboxílicos, grupos fenólicos y alcohólicos (Novais et al., 2008; Essington, 2003). La acidez del suelo también puede producirse mediante el uso prolongado de fertilizantes de amonio, la eliminación de cationes en la porción cosechada de los cultivos y el proceso de lixiviación, y la liberación de ácidos orgánicos en la descomposición de residuos de cultivos y desechos orgánicos agregados (Fageria et al., 1990; Sparks, 2003).

2.1.2. Fuentes de la acidez del suelo

Diversos ecosistemas y procesos del suelo pueden afectar el pH del suelo. Los iones de hidrógeno pueden agregarse o eliminarse de un ecosistema, o pueden producirse o consumirse en reacciones dentro del ecosistema. En los ecosistemas manejados, la acidificación del suelo es causada principalmente por la liberación de protones (H^+) durante la transformación y ciclo del carbono, el nitrógeno y el azufre, y las reacciones

de los fertilizantes. La acidificación del suelo causada por estos procesos puede tener impactos adversos cuando los suelos no pueden amortiguarse contra una mayor disminución del pH (Bolan et al., 2004).

Existen pocos mecanismos de entrada directa o salida de H^+ . Los insumos más significativos son los H^+ de la disociación del agua, del ácido carbónico y de los ácidos nítrico y sulfúrico en la lluvia ácida, originados por la actividad humana (Helyar y Porter, 1989; Alewell, 2003). Estudios a largo plazo de los cambios en la deposición y la química del suelo han demostrado que las entradas de acidez derivadas de la atmósfera hacen que los suelos se acidifiquen rápidamente, dependiendo de la intensidad de la entrada del ácido y la capacidad de tamponamiento del suelo (Blake, 2004). Los vapores ácidos que se forman en la atmósfera provienen principalmente de la quema de combustibles fósiles, aunque también en la atmósfera se forma ácido sulfúrico y nítrico, que proviene de la emisión de dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno, provenientes de fuentes naturales o antropogénicas (Blake, 2004; Sparks, 2003). En la mayoría de los suelos agrícolas donde son comunes las prácticas de encalado y fertilización intensa, los efectos de la precipitación ácida probablemente sean insignificantes. Sin embargo, en suelos que tienen una CIC muy baja, bajo contenido de materia orgánica, bajo contenido de arcilla y muy poco profundos, la precipitación ácida puede tener un impacto significativo (Cowling, 1980; McFee y Kelley, 1977, citados por Thomas y Hargrove, 1984). La lluvia también es una fuente de acidez. Es naturalmente ácida, generalmente en el rango de pH 5.0-5.5, principalmente debido al dióxido de carbono (CO_2) atmosférico disuelto que forma ácido carbónico (H_2CO_3):



Aunque el H^+ formado represente solo una cantidad diminuta de ácido, este es probablemente beneficioso, incluso esencial, para procesos tales como la intemperización del suelo a partir de las rocas y la liberación de nutrientes insolubles de los minerales del suelo (Blake, 2004). Las especies de carbonato disueltas participan en reacciones ácido-base homogéneas y heterogéneas e intercambian reacciones con la litosfera y la atmósfera. Tales reacciones son significativas en la regulación del pH y la composición de las aguas naturales (Stumm y Morgan, 1996).

La acidez del suelo también puede producirse por la descomposición de residuos vegetales o desechos orgánicos en ácidos orgánicos. En los ecosistemas agrícolas y naturales, los productos de la descomposición de la materia orgánica, y los materiales húmicos, suelen poseer diversos grupos funcionales, capaces de atraer y disociar iones de hidrógeno, como lo son los ácidos carboxílicos y grupos fenólicos y enólicos (Helyar y Porter, 1989; Fageria, 2014; Sposito, 2008). Los H^+ producidos por la descomposición de la materia orgánica son inestables en suelos minerales porque reaccionan con las arcillas, liberando aluminio intercambiable y ácido silícico (Coleman y Thomas, 1967, citados por Sánchez, 1980; Havlin et al., 1999). La acidificación también es atribuible a la respiración de los microorganismos y de las raíces; los procesos metabólicos generan CO_2 y ácidos orgánicos solubles acidificantes, los cuales se comportan como ácidos libres en el suelo. Por el efecto de la hidrólisis del CO_2 a la presión que se alcanza en el suelo, el pH puede llegar a ser menor o cercano a 5.0 (Stumm y Morgan, 1996). Las actividades biológicas, como la fotosíntesis y la respiración, los fenómenos físicos, como la turbulencia natural o inducida con aireación concomitante, y sobre todo los procesos como la precipitación y disolución de $CaCO_3$ y otros minerales influyen en la regulación del pH a través de sus capacidades respectivas para disminuir y aumentar la concentración de dióxido de carbono disuelto. Además de la fotosíntesis y la respiración, otras reacciones mediadas biológicamente afectan las concentraciones de iones H^+ de las aguas naturales (Stumm y Morgan, 1996).

Respecto a las sales solubles, las sales ácidas, neutras o básicas en la solución del suelo se originan a partir de la intemperización de los minerales, la descomposición de la materia orgánica, o la adición de fertilizantes. Los cationes de estas sales desplazarán el Al^{3+} adsorbido en suelos ácidos y, de este modo, la solución del pH del suelo disminuye (Havlin et al., 1999). Los ácidos solubles pueden, bajo ciertas circunstancias, influir fuertemente en el pH del suelo y otras propiedades del suelo. Aunque la importancia de los ácidos solubles es a menudo transitoria, su efecto sobre la acidez del suelo puede ser grande (Thomas y Hargrove, 1984). La aplicación de fertilizantes en los ecosistemas manejados para la producción agrícola es un importante contribuyente a la acidificación del suelo. La aplicación de fertilizantes nitrogenados como la urea y el sulfato de amonio a los suelos producen H^+ mediante la nitrificación y la lixiviación de NO_3^- (Havlin et al., 1999).

Las raíces de las plantas toman del suelo los nutrientes en forma de cationes y aniones; esta absorción de nutrientes va acompañada de una transferencia de H^+ , OH^- y HCO_3^- desde la raíz hacia la solución suelo. Esto se hace para mantener la electroneutralidad y el balance de cargas en el citoplasma. Como consecuencia, los ecosistemas que aumentan en biomasa acidifican el suelo (Blake, 2004; Zapata, 2004). Además, la absorción de cationes por el cultivo puede reducir o incrementar la acidez del suelo producida por la nitrificación de NH_4^+ de los fertilizantes, desechos animales y vegetales, o de la materia orgánica (Havlin et al., 1999). También, los exudados liberados por los microorganismos y las raíces son importantes en la acidez y el reciclaje de elementos menores, como el Fe, Cu y Zn. Los ácidos orgánicos de cadena corta son los exudados más comunes en el suelo producidos por las raíces, como una de las actividades de la rizósfera. El grupo ácido de estos compuestos puede ceder fácilmente su protón en el rango del pH del suelo (Zapata, 2004).

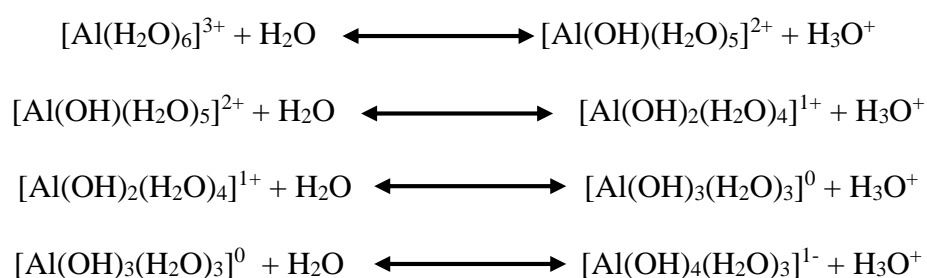
La remoción de cationes básicos influye también en la acidez del suelo. Debido a que las soluciones que contienen sales deben ser eléctricamente neutras (cargas positivas y negativas iguales), la lixiviación del agua debajo de la zona radicular contendrá tanto aniones como cationes. Havlin et al. (1999) menciona que por cada kilogramo de N lavado desde el suelo como NO_3^- , lleva consigo 3.6 kg de $CaCO_3$ o su equivalente en cationes.

Los grupos estructurales Si-OH y Al-OH expuestos en la superficie de los minerales arcillosos silicatados, así como los grupos Al-OH y Fe-OH de los oxihidróxidos de Fe (goethita, hematita, magnetita) y Al (gibbsita) contribuyen a la generación de acidez, y, a medida que aumenta el pH, más cargas negativas son generadas (Novais et al., 2007). Los minerales arcillosos, como la caolinita (1:1) y montmorillonita (2:1), y los óxidos de Fe y Al contribuyen a la amortiguación del pH del suelo, a través de la disociación de H^+ a partir del rompimiento de enlaces en sus bordes o sus superficies (Havlin et al., 1999).

2.1.3. Hidrólisis del aluminio

Los suelos se vuelven ácidos por varias razones. La fuente más común de hidrógeno es la reacción de los iones de aluminio con el agua (Fageria y Baligar, 2008). La mayoría de las partículas de arcilla interactúan con los iones H^+ . El ion hidrógeno penetra en la capa

octaédrica y reemplaza los átomos de Al. El Al liberado es luego adsorbido por el complejo de arcilla y un complejo de H-Al-arcilla se forma rápidamente. Los iones Al^{3+} pueden hidrolizarse y producir iones H^+ (Tan, 2011). La hidrólisis es un fenómeno molecular que es muy importante para la acidez del suelo. Una gran relación carga/tamaño en los cationes da como resultado una gran energía de hidratación. La hidrólisis se produce cuando la relación carga/tamaño del catión es tan grande que causa la ruptura de los enlaces H-O. Los cationes que se hidrolizan son aquellos que tienen mayor carga, son pequeños, o ambos. Los cationes importantes del suelo que se hidrolizan y contribuyen significativamente a la acidez del suelo incluyen Al^{3+} y Fe^{3+} . Los iones de aluminio monoméricos ($[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$) son adsorbidos electrostáticamente en las superficies cargadas negativamente de los minerales de arcilla y se pueden liberar por intercambio con otros cationes. Se hidrolizan en solución, formando una serie de compuestos de hidroxialuminio y liberan protones al mismo tiempo. Los productos de hidrólisis son adsorbidos por los minerales de arcilla, lo que provoca un aumento de la hidrólisis y la producción de más iones H^+ . Además, los iones H^+ producidos por hidrólisis reaccionan y disuelven o descomponen los minerales del suelo (Thomas y Hargrove, 1984). Los suelos ácidos son, por lo tanto, ricos en aluminio soluble acompañados por una serie compleja de sus productos de hidrólisis en forma de sustancias hidroxialuminínicas (Tan, 2011). La hidrólisis de las especies monoméricas formadoras de Al (contiene un ion metálico o, en este caso, una especie Al^{3+}) se muestra a continuación (Bertsch, 1989, citado por Sparks, 2003):



Las reacciones de hidrólisis sucesivas se asocian con un aumento del pH. El complejo $[\text{Al}(\text{OH})(\text{H}_2\text{O})_5]^{2+}$ es de menor importancia y existe solo en un rango de pH estrecho. El complejo $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$ es predominante por debajo de pH 4.7, $[\text{Al}(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_4]^{1+}$ entre pH 4.7 y 6.5, $[\text{Al}(\text{OH})_3(\text{H}_2\text{O})_3]^0$ entre pH 6.5 y 8. El hexaquoaluminio monomérico $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$ es intercambiable, aunque su carga trivalente da lugar a una fuerte retención

o preferencia por muchos coloides del suelo (Bohn et al., 2001). La Figura 1, adaptada por Havlin et al. (1999) se ilustra el rango de pH en el cual predominan las diferentes especies hidrolíticas de Al.

2.1.4. Tipos de acidez del suelo

Según Novais et al. (2008), existen tres tipos de acidez: la acidez activa, intercambiable y potencial.

La acidez del suelo es evaluada, generalmente, por medio de su pH, determinándose la actividad de H^+ en una suspensión de suelo con agua o con soluciones salinas. El pH es el logaritmo negativo de la concentración molar de H^+ , por lo tanto el pH está relacionado con la concentración de H^+ en la solución suelo, que determina la acidez activa del suelo. La acidez activa se refiere a la actividad de los iones H^+ (H_3O^+) en solución, medida por el pH. Este es el tipo de acidez del suelo sobre el cual reacciona el crecimiento de la planta (Tan, 2011). Se debe tener en cuenta que la acidez activa es sólo una parte muy pequeña en relación con la acidez intercambiable o la acidez potencial del suelo.

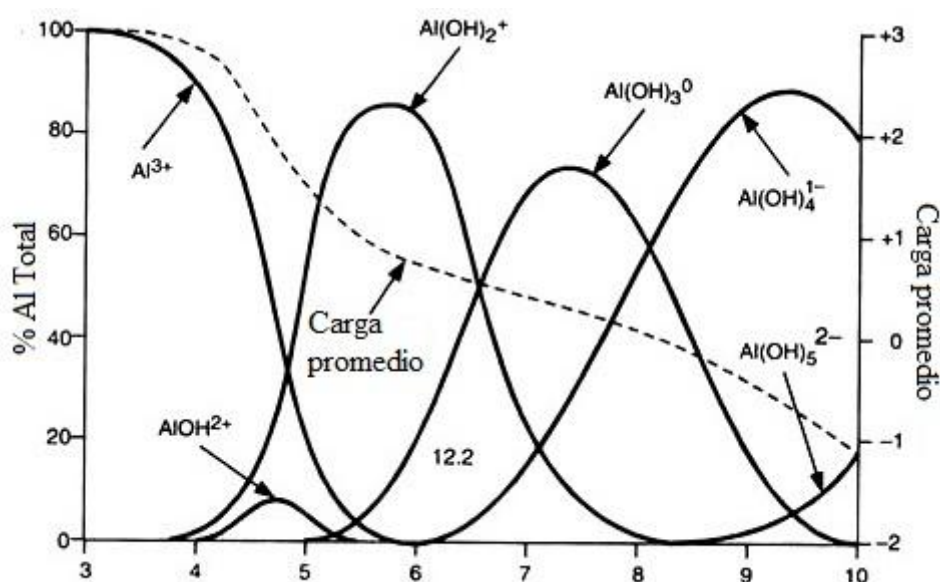


Figura 1: Relación entre el pH y la distribución y carga promedio de especies de Al soluble. Fuente: Havlin et al., 1999

La acidez intercambiable mide la cantidad de H^+ , Al^{3+} y otros cationes de hidrólisis ácida adsorbidos por una fuerza de carácter electrostático. Esta acidez es determinada por extracción con solución de KCl 1 M a pH en torno a 5.5, ya que para valores de pH mayor que 5.6 ocurre la precipitación del Al^{3+} .

La acidez potencial se refiere a la cantidad de formas intercambiables y no intercambiables de esos iones en el suelo, es decir, es la acidez intercambiable más la acidez no intercambiable. En general, la determinación de la acidez extraída con una sal tamponada a pH 7.0, como el acetato de calcio 0.5 M, caracteriza la acidez potencial del suelo (H+Al). Esta acidez potencial incluye H+Al adsorbidos en forma electrovalente, así como los iones H ligados covalentemente que se disocian de compuestos orgánicos, de grupos OH en la superficie de las arcillas, y de algunos polímeros de Al. La acidez no intercambiable es determinada por la diferencia entre la acidez potencial y la acidez intercambiable.

En la determinación de la acidez potencial (H+Al), la acidez extraída con el uso de la solución de Ca(OAc) 0.5 M, tamponada a pH 7, se extrae la acidez activa, la acidez intercambiable y la acidez no intercambiable o acidez dependiente de pH. La acidez potencial es representada por H+Al, con el H sin signo de carga, pues este elemento, en su mayoría, presenta una conexión covalente con el oxígeno, en estado no ionizado. Esta condición es importante para diferenciarlo del H^+ intercambiable, extraído por el KCl. El Al también sin carga indica formas hidrolizadas de Al, del intercambiador y de polímeros.

2.1.5. Características nutricionales de los suelos ácidos

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 (Sánchez y Salinas, 1983). La acidificación del suelo ha recibido cada vez más atención debido a la grave amenaza que representa para la producción agrícola y la biodiversidad en los ecosistemas terrestres (Chen et al., 2013). A medida que el suelo se acidifica, la toxicidad del aluminio (Al) y el manganeso (Mn) para las plantas y la deficiencia de nutrientes, como el fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y molibdeno (Mo), se produce, y por lo tanto se reducen los rendimientos de los cultivos, amenazando la seguridad alimentaria (Shi et al., 2019; Fenn et al., 2006).

Uno de los principales problemas para las plantas que crecen en suelos ácidos es la toxicidad por aluminio. El aluminio en la solución del suelo causa raíces y partes superiores atrofiadas en plantas susceptibles. El grado de toxicidad depende del tipo de planta y la especie de Al (Foy, 1984). Si bien el Al monomérico $[Al(H_2O)_6]^{3+}$ es particularmente tóxico para las plantas, los estudios también han demostrado que las especies poliméricas de Al en soluciones acuosas pueden ser muy tóxicas para plantas como la soja y el trigo (Parker et al., 1988; 1989). Un pH bajo también puede aumentar la solubilidad de los metales pesados que también pueden ser perjudiciales para las plantas (Sparks, 2003).

La toxicidad del aluminio es un factor clave que limita el crecimiento de las raíces de las plantas y la productividad de los cultivos en suelos ácidos. El Al^{3+} libre en alta concentración inhibe la expansión, elongación y la división de las células de la raíz (Kochian, 1995; Barcelo y Poschenrieder, 2002; Kochian et al., 2004), lo que resulta en pequeños sistemas de raíces que limitan la absorción de agua y nutrientes. El pH del suelo afecta significativamente la disponibilidad de nutrientes en las plantas y a microorganismos. A un pH bajo, se observa que el Al, el Fe y el Mn se vuelven más solubles y pueden ser tóxicos para las plantas. A medida que aumenta el pH, su solubilidad disminuye y se producen precipitaciones.

Como efecto indirecto del pH esta la actividad del H^+ , alterando la solubilidad de los demás nutrientes en el suelo, principalmente los micronutrientes, que, en concentraciones elevadas, pueden ser tóxicos para las plantas. La deficiencia de nutrientes y la creciente disponibilidad de metales tóxicos pueden posteriormente disminuir la calidad del suelo y reducir los rendimientos de los cultivos (Dai et al., 2017). Bajo condiciones de amazonia, las principales limitaciones de fertilidad de suelos son la acidez elevada, la baja capacidad de cambio de cationes, la deficiencia de N, P, K, S, Ca, Mg, B, Cu, Zn y también la alta capacidad de esos suelos para fijar el P aplicado como fertilizante (Sánchez y Cochrane, 1980, citados por Nortcliff, 1989).

Los cationes básicos (K^+ , Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+}), en suelos ácidos, a menudo se liberan primero de las superficies del suelo y se intercambian con H^+ (Kirk et al., 2010; Lu et al., 2015). Una vez que se han agotado los cationes básicos, la acidez del suelo se amortigua principalmente mediante la disolución de los minerales que contienen aluminio ($pH < 4.5$) (Johnson, 2002; Ross et al., 2008).

La reducción de la acidez del suelo promueve la insolubilización del aluminio y el manganeso, aumenta la disponibilidad de P y Mo y disminuye la disponibilidad de micronutrientes, como el Zn, Mn, Cu y Fe (Novais et al., 2008).

2.2. El fósforo

2.2.1. El fósforo en la planta

El fósforo es un nutriente esencial requerido para el crecimiento y desarrollo de las plantas y está íntimamente involucrado en una amplia gama de procesos fisiológicos y bioquímicos. Esto incluye sistemas de energía celular, estructura y función de los ácidos nucleicos, integridad de la membrana y metabolismo del azúcar (Runge-Metzger, 1995). La función del fósforo como componente de las estructuras macromoleculares es más prominente en los ácidos nucleicos que, como componentes del ADN, son los portadores de la información genética y, como unidades del ARN, son las estructuras responsables de la traducción de la información genética (Hawkesford et al., 2012).

El fósforo en la planta se presenta en forma inorgánica como ortofosfato y, en menor medida, como pirofosfato. Las formas orgánicas de fosfato son compuestos en los que el ortofosfato está esterificado con grupos hidroxilo de azúcares y alcoholes o está unido por un enlace pirofosfato a otro grupo fosfato. El compuesto más importante en el que los grupos fosfato están unidos por enlaces pirofosfato es el adenosin trifosfato (ATP). Parece que la función única del fosfato en el metabolismo es la formación de enlaces pirofosfato que permiten la transferencia de energía. La mayoría de los ésteres de fosfato son intermedios en las vías metabólicas de biosíntesis y degradación. Su función y formación están directamente relacionadas con el metabolismo energético de las células y con los fosfatos ricos en energía. La energía requerida, por ejemplo, para la biosíntesis del almidón o la absorción de iones es suministrada por un intermediario rico en energía o coenzima, predominantemente ATP (Hawkesford et al., 2012). El uridin trifosfato (UTP), el citidin trifosfato (CTP) y el guanosin trifosfato (GTP) son compuestos análogos al ATP (Mengel y Kirby, 2001).

La forma de puente del fosfodiéster también es abundante en los fosfolípidos de las biomembranas. Allí forma un puente entre un diglicérido y otra molécula (aminoácido, amina o alcohol). Las funciones de los fosfolípidos (y también de los sulfolípidos) están relacionadas con su estructura molecular. Hay una región lipofílica (que consta de dos

restos de ácidos grasos de cadena larga) y una región hidrofílica en una molécula; en una interfaz de lípido-agua, las moléculas están orientadas de modo que la capa límite se estabiliza. La carga eléctrica de la región hidrofílica juega un papel importante en las interacciones entre las superficies de biomembrana y los iones en el medio circundante (Hawkesford et al., 2012).

Aunque están presentes en las células en concentraciones relativamente bajas, los ésteres de fosfato (C-(P)) y los fosfatos ricos en energía ((P)~(P)) representan la energía metabólica de las células. Se han identificado hasta 50 ésteres formados a partir de fosfato y azúcares y alcoholes, aproximadamente 10 de los cuales, incluyendo glucosa 6-fosfato y fosfogliceraldehído, son los más abundantes (Hawkesford et al., 2012).

2.2.2. El fósforo en suelos ácidos

Los suelos de la región tropical se caracterizan por una alta intemperización, lixiviación de bases y formación de oxihidróxidos de aluminio y hierro. El fósforo se encuentra en la solución del suelo como ion ortofosfato, forma derivada del ácido ortofosfórico (H_3PO_4), estando directamente relacionado con el pH (Lindsay, 1979). La forma H_2PO_4^- predominantemente ocurre en suelos ácidos, es decir, en el rango de pH de 3 a 6 que, naturalmente, ocurre en suelos tropicales (Malavolta, 1985). Una disminución en el pH del suelo aumentará las concentraciones de Fe y Al en la solución del suelo y esto puede conducir a la adsorción/precipitación de fosfato. En suelos ácidos, la adsorción de P, y de la mayoría de los aniones, se atribuye generalmente a los óxidos hidratados de Fe y Al, y a la capa (1:1) de arcillas laminares, particularmente en suelos tropicales con pH bajo (Sanyal y De Datta, 1991; Adnan et al., 2003; Mc Bride, 1994). En los ambientes más importantes de pH (pH 4–8), los iones fosfato cargados negativamente (es decir, H_2PO_4^- y HPO_4^{2-}) se retienen fuertemente en las superficies de carga variable de minerales a pH ácido, y disminuyen gradualmente con el aumento del pH (Hingston et al., 1967; Okajima et al., 1983; Parfitt, 1989). En estas situaciones, junto con la elevada acidez, las combinaciones de fósforo más importantes son con el hierro (P-Fe) y el aluminio (P-Al). Los oxihidróxidos de hierro y aluminio se presentan preferencialmente con carga positiva, siendo así capaces de retener en su superficie varios tipos de aniones, predominantemente iones fosfatos (Hedley et al., 1990; Novais et al., 1991).

La fijación de fósforo es generalmente entendida como la transformación de formas solubles de fósforo en formas menos solubles después de la ocurrencia de reacciones con el suelo (Braga, 2006). Para suelos ácidos altamente intemperizados se ha propuesto dos mecanismos de fijación de fósforo, estos son precipitación y adsorción (Hsu, 1965). El término fijación envuelve mecanismos de adsorción, a través de ligaciones electrostáticas o covalentes, y de precipitación, con formación de compuestos insolubles, tornándose el elemento indisponible para la planta (Alcarde et al., 1991; citados por Boschetti et al., 1998).

La precipitación es la reacción entre iones, con la formación de una nueva fase o compuesto definido. Es la reacción del P con formas iónicas de Al y Fe en suelos ácidos o Ca en suelos neutros o calcáreos, formando compuestos de composición definida y poco solubles (Hsu, 1965; Kamprath, 1972; Sample, 1972). El aluminio en solución puede causar precipitación de fosfatos añadidos al suelo. Para evitar esta reacción, se debe precipitar el Al^{3+} por encalado, anterior a la adición de fuentes de P. De todas maneras, la retención de P por el suelo se mantiene en valores estequiométricos semejantes cuando se sustituye la precipitación de P por el Al^{3+} del suelo ácido por su adsorción por el hidróxido de Al recién formado por el encalado (Haynes, 1984).

En suelos ácidos, los minerales de óxidos e hidróxidos de Fe y Al están principalmente involucrados en la adsorción de P inorgánico. Desde que la solución del suelo es ácido, la superficie de estos minerales tiene carga positiva neta, que atrae $H_2PO_4^-$ y otros aniones (Havlin et al. 1999). En la fase inicial de rápida adsorción de P hay una atracción electrostática, seguida por la adsorción por oxihidróxidos, por medio de cambio de ligantes (Goldberg y Sposito, 1985; Sanyal y De Datta, 1991). La presencia de grupos OH^- y OH_2^+ , dependiendo del pH del medio, en los bordes de arcillas silicatadas, proporciona un mecanismo de adsorción semejante al presentado para los oxihidróxidos (Novais et al., 2008).

La magnitud de la adsorción depende de la cantidad de constituyentes con capacidad de sorber moléculas neutras o cargadas eléctricamente. En los suelos de regiones tropicales y subtropicales, los óxidos de hierro mal cristalizados, la cantidad de aluminio sustituyendo hierro, y en menores cantidades, los óxidos bien cristalizados y la caolinita son los principales responsables de ese fenómeno (Fontes y Weed, 1996).

Una característica importante de la toxicidad del Al es la inhibición de la absorción de P y la translocación por las plantas. Por lo tanto, el encalado a menudo aumenta la absorción de P de las plantas al disminuir la toxicidad de Al en lugar del efecto sobre la disponibilidad de fosfato per se (Haynes, 1982).

El fósforo está generalmente disponible para los cultivos a un pH del suelo de 6 a 7. Por lo tanto, en suelos ácidos cuyo pH es menor que 6, se requiere la aplicación de fertilizantes regulares de P, como los fosfatos de roca y el superfosfato triple, para saturar los iones Al y Fe a fin de mantener un suministro adecuado de P disponible para las plantas (Rahman et al., 2014).

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

El ácido fosfórico liberado de la disolución de fertilizantes fosfatados como el superfosfato triple y el fosfato monoamónico pueden temporalmente acidificar zonas localizadas en el sitio de aplicación. El primer material reducirá el pH tan bajo como 1.5, mientras que el último disminuirá el pH a aproximadamente 3.5; sin embargo, la cantidad de H⁺ producido es muy pequeña y tiene un efecto menor a largo tiempo en el pH. El fosfato diamónico incrementará el pH del suelo hasta 8, a menos que el pH inicial del suelo sea tan alto como el pH del fertilizante. La acidez producida por la nitrificación del NH₄⁺ en el fosfato diamónico compensará este incremento inicial de pH (Havlin et al., 1999).

2.3. Encalado

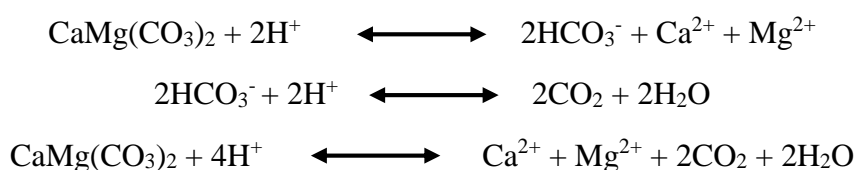
2.3.1. Fundamento

Tradicionalmente, el encalado ha sido la práctica más utilizada para aliviar la acidificación del suelo. El encalado es uno de los principales métodos utilizados por los agricultores para mejorar la fertilidad de los suelos ácidos porque disminuye el contenido de Al³⁺ intercambiable por reemplazo con Ca²⁺ y Mg²⁺; disminuye el contenido de Al³⁺ soluble por precipitación con los aniones hidroxilo generados por hidrólisis de carbonato en la solución del suelo; y aumenta el pH característico de los suelos ácidos debido a dicha hidrólisis (Olego et al., 2016).

El objetivo principal de encalar los suelos es superar los problemas químicos asociados con la acidez, que incluyen altas concentraciones de iones ácidos (H^+ y Al^{3+}) y elementos tóxicos (Mn^{2+}), y bajas concentraciones de cationes básicos (Ca y Mg) y otros nutrientes como Mo y P. Los aniones resultantes de la disociación de las enmiendas encalantes (HCO_3^- y OH^-) reaccionan con los protones de la solución del suelo dando como resultado la neutralización de Al^{3+} y disminuyendo la actividad y la biodisponibilidad de Al y Mn (Bolan et al., 2004; Kaminski et al., 2005; Weirich Neto et al., 2000). Debido a esta reacción, se produce la desorción del Al^{3+} débilmente adsorbido e incluso el hidrógeno de los grupos funcionales. Por lo tanto, estas reacciones se limitan al suelo en contacto con partículas correctivas, ya que su solución está controlada por su disociación y depende de la presencia de protones en la solución del suelo (Kaminski et al., 2005; Weirich Neto et al., 2000).

El encalado también aumenta la solubilidad de Mo y P, lo que aumenta su disponibilidad. La cal proporciona los cationes de nutrientes básicos (Ca^{2+} y Mg^{2+}) y también reduce la solubilidad de los metales pesados, minimizando así su biodisponibilidad y movilidad en los suelos (Bolan et al., 2004), además de eliminar no solo la toxicidad de Al^{3+} y H_3O^+ , sino también la toxicidad de Mn^{2+} (Olego et al., 2016).

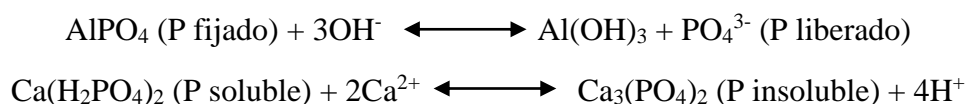
Los cambios en las propiedades químicas del suelo relacionadas con la acidez, con el uso de cal dolomítica [$CaMg(CO_3)_2$] se pueden explicar sobre la base de la siguiente ecuación (Fageria y Nascente, 2014):



Las ecuaciones anteriores muestran que las reacciones de neutralización de la acidez de la dolomita ocurren en dos pasos. En el primer paso, Ca y Mg reaccionan con H^+ en el complejo de intercambio y H^+ se reemplaza por Ca^{2+} y Mg^{2+} en los sitios de intercambio (partículas cargadas negativamente de arcilla o materia orgánica), formando HCO_3^- . En el segundo paso, HCO_3^- reacciona con H^+ para formar CO_2 y H_2O para aumentar el pH.

La aplicación de piedra caliza (carbonato de calcio) y cal dolomítica (carbonato doble de Ca y Mg) aumenta el Ca intercambiable de suelo y Ca y Mg, respectivamente. La mejora del crecimiento de las plantas en suelos ácidos no se debe a la adición de cationes básicos (Ca, Mg), sino debido a que el aumento del pH reduce la toxicidad de los niveles fitotóxicos de Al y Mn (Clark, 1984; Marschner, 1995).

Existe evidencia sobre la liberación del P fijado a partir del encalado en suelos ácidos. Mansell et al. (1984) y Edmeades y Perrott (2004) informaron que en los suelos ácidos de Nueva Zelanda, el beneficio primario del encalado se produce a través de un aumento en la disponibilidad de P al disminuir la adsorción de P y estimular la mineralización de P orgánico. En un trabajo realizado por Fageria (1989) se encontró que el aumento en la disponibilidad de P en el rango de pH de 5.0 a 6.5 se asoció con la liberación de iones P de óxidos de Al y Fe, que fueron responsables de la fijación de P. A un pH más alto (> 6.5), la reducción de P extraíble se asoció con la precipitación de P como fosfato de Ca (Naidu et al., 1990). Estos aumentos en el P extraíble o la liberación de este elemento en el rango de pH de 5.0–6.5 y la reducción en el rango de pH más alto (> 6.5) se pueden explicar mediante las siguientes ecuaciones (Fageria y Baligar, 2008):



Los suelos ácidos encalados dan como resultado la liberación de P para la absorción de la planta; este efecto se suele denominar "efecto de rebote de P" de la cal (Bolan et al., 2003). Bolan et al. (2003) informaron que en suelos ricos en Al intercambiables y solubles, el encalado podría aumentar la absorción de P de la planta al disminuir el Al, en lugar de aumentar la disponibilidad de P en sí. Esto puede deberse a un mejor crecimiento de la raíz donde se alivia la toxicidad de Al, lo que permite explorar un mayor volumen de suelo (Friesen et al., 1980).

2.3.2. Materiales encalantes

Se encuentra disponible una gama de materiales encalantes, que incluyen calcita (CaCO_3), cal quemada (CaO), cal apagada [Ca(OH)_2], dolomita ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{CO}_3\text{Mg}$) y escoria (CaSiO_3). Recientemente, se ha evaluado el potencial de encalado de otros compuestos que contienen Ca. Algunos de estos materiales incluyen rocas fosfatadas,

yeso proveniente de sistemas de desulfuración de gases de combustión de plantas de energía eléctrica, cenizas de caldera de lecho fluidizado, cenizas volantes y compostes orgánicos estabilizados con cal. La cantidad necesaria para rectificar la acidez del suelo depende del valor neutralizante del material encalante y de la capacidad de amortiguación del pH del suelo (Bolan et al., 2004).

Para ser considerados efectivos, los materiales encalantes deben contener óxidos, hidróxidos o silicatos como componentes neutralizantes (Alcarde y Rodella, 2003). Los subproductos, como las escorias de la industria del acero (básicamente compuestos de silicato de Ca y Mg) pueden ser una buena alternativa para reemplazar o aumentar el efecto de encalado de la superficie debido a su mayor solubilidad y alcalinidad en comparación con la cal, que puede reducir el tiempo asociado con el encalado mediante reacciones en el perfil del suelo (Peregrina et al., 2008; Yi et al., 2012). Además, las fuentes de Ca, Mg y Si pueden ser útiles para cultivos, reduciendo el consumo de cal (Castro y Crusciol, 2013) y mejorando el rendimiento de los cultivos que acumulan Si (Liang et al., 1994; Korndörfer y Lepsch, 2001; Guntzer et al., 2011).

La piedra caliza dolomítica comprende principalmente la dolomita mineral, que está hecha de un doble carbonato de calcio y magnesio ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Dos características importantes de la piedra caliza dolomítica como material de cal son su alta capacidad neutralizadora, presentada por CCE de 109 (Havlin et al., 1999), y su baja tasa de disolución, que es aproximadamente 100 veces menor que de calcita (Loeppert y Suarez, 1996).

2.3.3. Uso del silicio para atenuar la acidez del suelo

Los minerales silicatados presentes en el suelo poseen alta estabilidad química caracterizándolos como estructuras muy insolubles; no obstante, los mismos sufren procesos de meteorización a través de los cuales se presenta una lenta liberación de los diferentes compuestos que los constituyen (Osorio, 2014).

Los silicatos sufren dicho proceso de meteorización principalmente a través de un proceso químico llamado hidrólisis, en donde dicho mineral reacciona de manera lenta con iones de H^+ y OH^- , los cuales a través de distintas reacciones químicas generan la liberación de las distintas formas de silicio soluble en la solución del suelo (Fassbender, 1984).

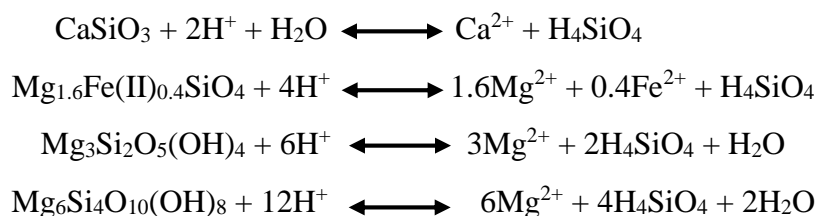
Una de las formas libre de silicio presente en la solución del suelo está representado por el ácido monosilícico (Snyder et al., 2006), el cual se puede encontrar en dos formas distintas: el ácido metasilícico (H_2SiO_3) y el ácido ortosilícico (H_4SiO_4), siendo este último la forma más abundante del silicio en la solución del suelo (Osorio, 2014). En los suelos ácidos, el ácido monosilícico constituye aproximadamente el 90% de Si en la solución de suelo (Riise et al., 2000; Wonisch et al., 2008), y el polímero de Si es responsable del resto. Una vez que ocurre la disociación de los silicatos, el ácido ortosilícico (H_4SiO_4) toma un comportamiento dinámico en la solución del suelo debido a que el mismo se puede reorganizar en minerales secundarios o, por el contrario, ser absorbido como nutriente por parte de las raíces de los cultivos (Álvarez y Osorio, 2014). La presencia de Al en las soluciones de suelos ácidos favorece al Si polimérico, ya que los grupos de Si-Al polimerizados son precursores para la formación de aluminosilicatos secundarios (Wonisch et al., 2008). El ácido monosilícico (H_4SiO_4) posee una alta actividad química (Iler, 1979; Lindsay, 1979), ya que este compuesto puede reaccionar fácilmente con cationes presentes la solución del suelo, principalmente con elementos como el aluminio, hierro y magnesio, o bien con metales pesados como cadmio, plomo y zinc (Matichenkov, 2008; Snyder et al., 2006), formando complejos solubles si la concentración de ácido monosilícico es baja (Schindler et al., 1976) y silicatos de metales pesados ligeramente solubles cuando la concentración de ácido monosilícico es mayor en el sistema (Cherepanov et al., 1994, citados por Matichenkov y Bocharnikova, 2001; Lindsay, 1979). En suelos ácidos, el silicato se adsorbe específicamente a las superficies de óxido hidratado de Al y Fe a través de reacciones de intercambio de ligandos y se sabe que forman complejos de superficie bidentados de esfera interna con superficies de óxido hidratado (Pokrovski et al., 2003; Heimstra et al., 2007). El ácido monosilícico puede polimerizarse en las superficies de óxido de Fe y Al y, por lo tanto, estar presente como ácido silícico polimérico adsorbido (Drees et al., 1989; Dietzel, 2000).

Además de la forma ya descrita con anterioridad, Matichenkov (2008) expone la presencia de otra forma de silicio en el suelo correspondiente al ácido polisilícico, el cual posee una dinámica distinta debido a que el mismo actúa sobre la parte física al mejorar la estructura del mismo, generando mayor número de sitios de unión para los cationes y permitiendo a su vez mayor retención del agua. Como los ácidos polisilícicos están altamente saturados de agua, pueden tener un efecto en la capacidad de retención de agua del suelo. Se ha encontrado que los ácidos polisilícicos son importantes para la formación de la estructura del suelo (Matichenkov et al., 1995).

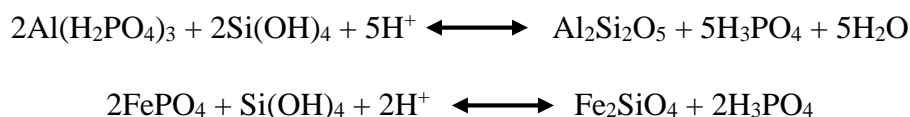
Los silicatos a través de diferentes reacciones pueden mejorar las condiciones químicas de los suelos agrícolas, esto se debe a que los silicatos poseen la capacidad de corregir la acidez y con ello aumentar la disponibilidad de múltiples nutrientes, es por ello que diversos estudios recomiendan su utilización como enmienda para mejorar los rendimientos en los cultivos (Álvarez y Osorio, 2014; Matichenkov, 2008; Snyder et al., 2006).

La corrección de la acidez al incorporar silicatos al suelo es debido al efecto alcalinizante que los mismos poseen, producto de una reacción química de hidrólisis que transforma los silicatos en hidróxidos, los cuales neutralizan sus cargas al consumir protones (iones hidronio) presentes en la fase líquida del suelo, lo que permite una elevación en el pH y con ello la corrección de una de las fuentes de la acidez (Álvarez y Osorio, 2014; Moreno et al., 2011).

Lindsay (1979) citado por Álvarez y Osorio (2014), explica cómo actúan los silicatos según la fuente de los mismos en la corrección de la acidez, a través de las siguientes reacciones:



Por otra parte, los silicatos pueden ejercer un rol fundamental en la disponibilidad de fósforo para los cultivos, tal y como se mencionó con anterioridad, debido a que el ácido ortosilícico (H_4SiO_4) puede desplazar los iones de fosfatos (H_2PO_4^-) que se encuentran fijados por óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio, o bien desplazar aquellos fosfatos unidos en los sitios de absorción de las arcillas (Álvarez y Osorio, 2014; Matichenkov, 2008). Esto permitiría que el fósforo liberado pueda ser absorbido por las plantas. Así mismo, Matichenkov (2008) presenta una serie de reacciones que dan cuenta de lo discutido con anterioridad:



Además, el ácido ortosilícico (H_4SiO_4) también posee la capacidad de fijar los cationes de hierro y aluminio cuando los mismos se encuentran libres en la solución del suelo, en donde pueden generar problemas de toxicidad para los cultivos (Snyder et al., 2006). Los mismos autores mencionan que este proceso de fijación también puede ocurrir con metales pesados presentes en el suelo.

En relación a lo expuesto con anterioridad, se denota la importancia que pueden tener dichos compuestos para el uso agronómico, de tal manera, Navarro y Navarro (2013) indican que las dos principales enmiendas silicatadas para uso agrícola corresponden al silicato de calcio (CaSiO_4) y el silicato de magnesio (MgSiO_4).

Ambos compuestos citados anteriormente poseen un poder de neutralización de la acidez distinto, lo cual se correlaciona al grado de pureza que poseen los mismos poseen, teniendo mayor pureza el silicato de magnesio y con ello un mejor efecto sobre la corrección de la acidez, pero además este mejor efecto puede ser debido al menor peso molecular que posee el magnesio en comparación al calcio (Navarro y Navarro, 2013).

Quero (2009), indica que al incorporar silicato de magnesio en suelos con problemas de acidez, lo que ocurre es una disociación del compuesto, liberando con ello el ácido ortosilícico (H_4SiO_4) el cual corrige la acidez como se explicó con anterioridad y a su vez aumenta la concentración de iones de magnesio (Mg^{2+}) en la solución del suelo, el cual puede ser tomado por parte de los cultivos para realizar diversas funciones metabólicas.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación del campo experimental

El ensayo se llevó a cabo en el Laboratorio e invernadero de Fertilidad del Suelo (LIFS) y los análisis de suelos y plantas en el Laboratorio de análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes del Departamento de Suelos de la Facultad de Agronomía de la Universidad Agraria La Molina (LASPAF-UNALM).

Ubicación geográfica:

Departamento	:	Lima
Provincia	:	Lima
Distrito	:	La Molina
Coordenadas	:	12°04'46''S 76°56'45''O
Elevación	:	243 m.s.n.m

3.2. Suelo experimental

3.2.1. Muestreo del suelo

El suelo usado en el experimento fue un suelo ácido colectado de 0-20 cm de profundidad, proveniente del departamento de Huánuco, provincia de Leoncio Prado, distrito Rupa Rupa. Presenta un clima cálido húmedo (tropical), su temperatura promedio es de 24°C, la precipitación anual supera los 3000 mm y a una altitud que bordea los 650 msnm.

Posteriormente una muestra del suelo obtenido fue llevada al laboratorio LASPAF de la UNALM para un análisis de caracterización correspondiente.

3.2.2. Análisis de caracterización

Las propiedades físico-químicas del suelo fueron determinadas empleando los métodos seguidos por el Laboratorio de análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes de la

Universidad Nacional Agraria La Molina (LASPAF – UNALM). El pH fue determinado por el método potenciométrico en extracto acuoso de suelo (relación 1:1). La conductividad eléctrica fue medida en el extracto anterior. La textura fue determinada por el método de Bouyoucos. La materia orgánica del suelo fue determinada por digestión vía húmeda (método de Walkley y Black), en tanto que el fósforo disponible fue determinado por extracción empleando la solución extractante de Olsen (NaHCO_3 0.5M) y posterior colorimetría con molibdato de amonio (azul). El potasio disponible fue determinado mediante extracción con acetato de amonio ($\text{CH}_3\text{COONH}_4$ 1N) y posterior espectrofotometría de absorción atómica del extracto obtenido. La capacidad de intercambio catiónico del suelo fue determinada mediante destilación de Kjeldahl del suelo saturado con solución de acetato de amonio ($\text{CH}_3\text{COONH}_4$ 1N), en tanto que los cationes cambiables fueron determinados por espectrofotometría de absorción atómica del filtrado anterior. Los resultados del análisis se resumen en el Cuadro 1.

El suelo es de textura franco arcillo arenoso, con un contenido de arcilla de 26%, pH extremadamente ácido (4.16), bajo contenido de materia orgánica (0.90%), bajo nivel de P disponible (0.6 ppm), bajo nivel de K (88 ppm), CIC medio (24.48 m-eq/100g), porcentaje de aluminio cambiable alto (89.27%), porcentaje de saturación de bases bajo (10.73%).

3.3. Enmiendas encalantes

- Dolomita ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{CO}_3\text{Mg}$) (CaO 29.18%, Mg 19.33%) Suministrada por la empresa COMACSA. Su presentación es en forma sólida (polvo). La dolomita fue tamizada a través de una malla 400.
- Magnekling (silicato de magnesio) (SiO_2 34%, MgO 32%). Proviene de la empresa TQC. Su presentación es en forma granulada. Los gránulos fueron molidos y tamizados a través de una malla 400.

3.4. Factores en estudio

En el experimento se aplicaron dos enmiendas encalantes, dolomita y silicato de magnesio. Ambos encalantes fueron aplicados para neutralizar 0, 3.1, 6.2 y 12.4 m-eq/100 de acidez cambiable. Después de la etapa de incubación del material encalante con el material de suelo, se procedió a aplicar las fuentes de fósforo, fosfato diamónico (FDA)

y superfosfato triple (ST). Los factores en estudio y los tratamientos se observan en el Cuadro 2.

Cuadro 1: Características físicas – químicas del suelo analizado

Características		Valor	Calificación
Arena (%)		47	
Limo (%)		27	
Arcilla (%)		26	
Clase textural			Franco arcillo arenoso
pH (H ₂ O, 1:1)	(----)	4.16	Extremadamente ácido
C.E. (1:1)	(dS/m)	0.07	No salino
CaCO ₃	(%)	0.0	No calcáreo
M.O.	(%)	0.90	Bajo
Fósforo disponible	ppm	0.60	Bajo
Potasio disponible	ppm	88	Bajo
CIC	(cmol _c /kg)	24.48	
Ca ²⁺	”	0.89	
Mg ²⁺	”	0.12	
K ⁺	”	0.07	
Na ⁺	”	0.05	
Al ³⁺	”	8.80	
H ⁺	”	0.60	
Al ³⁺ + H ⁺	”	9.40	
PSB	(%)	10.73	
PAC	(%)	89.27	

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 2: Tratamientos evaluados en el ensayo experimental.

Tratamiento	Material encalante	Dosis (m-eq/100g)	Fuente de fósforo
T1	CaCO ₃ .MgCO ₃	0	Superfosfato triple
T2	CaCO ₃ .MgCO ₃	0	Fosfato diamónico
T3	CaCO ₃ .MgCO ₃	3.1	Superfosfato triple
T4	CaCO ₃ .MgCO ₃	3.1	Fosfato diamónico
T5	CaCO ₃ .MgCO ₃	6.2	Superfosfato triple
T6	CaCO ₃ .MgCO ₃	6.2	Fosfato diamónico
T7	CaCO ₃ .MgCO ₃	12.4	Superfosfato triple
T8	CaCO ₃ .MgCO ₃	12.4	Fosfato diamónico
T9	Silicato de magnesio	0	Superfosfato triple
T10	Silicato de magnesio	0	Fosfato diamónico
T11	Silicato de magnesio	3.1	Superfosfato triple
T12	Silicato de magnesio	3.1	Fosfato diamónico
T13	Silicato de magnesio	6.2	Superfosfato triple
T14	Silicato de magnesio	6.2	Fosfato diamónico
T15	Silicato de magnesio	12.4	Superfosfato triple
T16	Silicato de magnesio	12.4	Fosfato diamónico

3.5. Materiales, insumos y equipos

3.5.1. Materiales

- Material de suelo ácido (Tingo María)
- Macetas
- Balde
- Libreta de campo
- Lapiceros
- Stickers

3.5.2. Insumos

- Urea (46%N)
- Cloruro de potasio (60%K₂O)
- Superfosfato triple (ST) (46%P₂O₅)
- Fosfato diamónico (FDA) (18%N 46% P₂O₅)
- Semilla de maíz PM 213

- Computadora

3.5.3. Equipos

- Potenciómetro
- Balanza
- Estufa

3.6. Métodos y procedimientos

3.6.1. Fase de macetería

El material de suelo fue tendido en una manta de plástico y secado al aire durante dos semanas, en las cuales se homogenizó con la ayuda de un rastrillo de madera. Luego fue tamizado por una malla de 2 mm de apertura, las partículas que no pasaban por el tamiz fueron molidas. Posteriormente el material de suelo fue homogenizado usando un saco de plástico, colocando cierta cantidad de suelo dentro del mismo, para luego agitarlo. En cada maceta se colocaron 3 kg de suelo seco. En cada unidad experimental (maceta) del tratamiento respectivo, se aplicó en sólido la fuente y dosis de enmienda correspondiente, siendo mezclado homogéneamente con el suelo, dichas fuentes y dosis se muestran en el cuadro 2. Posteriormente se incubó por un período de 45 días a una humedad constante del 80% de la capacidad de campo. Finalizado los 45 días, se realizó la fertilización fosfatada (superfosfato triple y fosfato diamónico), 200 ppm junto con la siembra del maíz PM 213. A los 15 días después de la siembra (DDS) se realizó la primera fertilización potásica (100 ppm) y nitrogenada (100 ppm). Luego de transcurridos 35 DDS se realizó la segunda fertilización potásica (100 ppm) y nitrogenada (100 ppm). Una aplicación de 50 ppm de nitrógeno se realizó a los 50 DDS. La fertilización se llevó a cabo a una dosis de 250-200-200. La cosecha se realizó aproximadamente 90 días después de la siembra.

3.6.2. Evaluaciones realizadas

En el material de suelo:

- pH del suelo: Para medir el pH se combinaron 20 ml de suelo y 20 ml de agua destilada en un recipiente de 100 ml. Se agitó intermitentemente durante 30 minutos y luego se insertó el electrodo del medidor de pH en el sobrenadante de la solución. Esta variable se midió después del proceso de incubación y después de la cosecha

- Acidez cambiable: 10 g de suelo fueron colocados en un recipiente y se añadió 50 ml de una solución 1 N KCl. Luego se agitó durante 30 minutos. Se filtró la solución resultante a un balón volumétrico de 100 ml. El residuo sólido fue lavado con fracciones aproximadamente de 10 ml de KCL. Luego se completó a volumen de 100 ml y se homogenizó. Se extrajo una alícuota de 25 ml del extracto y se adicionaron 3 gotas del indicador de fenolftaleína. Se procedió a titular con 0.05 N NaOH hasta que la solución se tornó de un color rosado pálido. Se adicionó 1 gota de fenolftaleína y se esperó durante 1 minuto. El color deberá mantenerse. Se anotó el gasto para los respectivos cálculos. Se usó un blanco y se trató como si fuese una muestra.

$$\text{Acidez cambiable (Al + H)} \frac{m - eq}{100 g} = \frac{100(x - y)N \times \text{Vol extrac}}{\text{alícuota} \times \text{peso suelo}}$$

Donde:

X= ml de NaOH usado Y= ml de NaOH usado para blanco

N= Normalidad de NaOH

- Aluminio cambiable: A la solución usada para medir la acidez cambiable se le adicionó una microgota de 0.05 N HCl. La solución retornó al punto anterior a la titulación final, es decir, fue nuevamente de color claro. Se adicionaron 10 ml de fluoruro de sodio 1 M para acomplejar el aluminio. Si el aluminio está presente en la solución, esta retornará a un color rosado por efecto de la alcalinización. Si la solución no retorna a un color rosado, no es necesario continuar porque el aluminio cambiable no está presente. Se procedió a titular la solución con 0.05 N HCl hasta que la decoloración fue permanente. La cantidad de ácido adicionado corresponde a la cantidad de aluminio cambiable. Se usó un blanco y se trató como si fuese una muestra.

$$\text{Aluminio cambiable (Al)} \frac{m - eq}{100 g} = \frac{100(x - y)N \times \text{Vol extrac}}{\text{alícuota} \times \text{peso suelo}}$$

Donde:

X= ml de HCl usado Y= ml de HCl usado para blanco

N= Normalidad de HCl

Tanto la acidez cambiante como el aluminio cambiante se midieron después de la cosecha.

En el cultivo indicador:

- Producción de materia seca (parte aérea y radicular):
El cogollo y las hojas de maíz (parte aérea) fueron cortadas al nivel del suelo, y posteriormente fueron lavadas con agua destilada y cortadas en trozos pequeños. Las raíces fueron extraídas cuidadosamente de las macetas, fueron lavadas con agua destilada y secadas al aire. Luego el material fue colocado en bolsas de papel kraft. Las muestras fueron sometidas a secado en estufa a 70° C hasta alcanzar peso constante. Luego que se extrajo de la estufa, se pesó para obtener el peso seco de la parte aérea y radicular (expresado en g/maceta).
- Análisis químico:
 - Secado y molienda: Para el análisis químico de los tejidos se emplearon las metodologías seguidas por el Laboratorio de Análisis de Suelos y Plantas de la Universidad Nacional Agraria La Molina. Luego que las muestras de follaje y de raíces fueran lavadas con agua corriente y desionizada, para eliminar los residuos que podrían encontrarse adheridos a la superficie, y secadas a estufa a aproximadamente 70 °C hasta peso constante, fueron molidas y empaquetadas para el análisis químico.
 - Digestión húmeda de las muestras: Los elementos N, P, K, Ca y Mg fueron analizados tanto en raíces como en la parte aérea. El nitrógeno fue determinado por el método de micro-Kjeldahl modificado (Jones, 1991). Porciones de tejido previamente secadas y molidas fueron digeridas en mezcla ácidos nítrico y perclórico (Zasoski y Burau, 1977) en relación 5:1. El fósforo fue medido por colorimetría empleando el reactivo sulfomolibdico. El azufre fue determinado por el método turbidimétrico. Los contenidos de Cd, Ca, K y Mg fueron determinados por espectrofotometría de absorción atómica en el extracto anterior.

3.7. Diseño experimental

El diseño experimental usado fue un diseño completamente al azar, con tres factores: factor material encalante, con dos niveles; factor dosis de material encalante, con cuatro niveles y factor fuente de fósforo, con dos niveles. Se realizaron 3 repeticiones por tratamiento. Las características evaluadas de las interacciones de cada uno de los componentes fueron sometidos a la prueba de Tukey con un nivel de significancia de 0.05 de probabilidad.

Modelo aditivo lineal

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

Para: $i= 1, 2$
 $j= 1,2,3,4$
 $k= 1,2$

Donde:

$Y_{ijk(l)}$ = Variable respuesta al usar la i-ésima fuente encalante, la j-ésima dosis de material encalante y la k-ésima fuente de fósforo obtenido.

μ = Es el efecto de la media general.

α_i = Es el efecto de la i-ésima fuente encalante.

β_j = Es el efecto de la j-ésima dosis de la fuente encalante.

γ_k = Es el efecto de la k-ésima fuente de fósforo.

$(\alpha\beta)_{ij}$ = Es el efecto de la interacción de la i-ésima fuente encalante y la j-ésima dosis de material encalante.

$(\alpha\gamma)_{ik}$ = Es el efecto de la interacción de la i-ésima fuente encalante y la k-ésima fuente de fósforo.

$(\beta\gamma)_{jk}$ = Es el efecto de la interacción de la j-ésima dosis de la fuente encalante y la k-ésima fuente de fósforo.

$(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$ = Es el efecto de la interacción de la i-ésima fuente encalante, la j-ésima dosis de material encalante y la k-ésima fuente de fósforo.

ε_{ijk} = Efecto del error experimental

Los datos obtenidos de las evaluaciones del material de suelo y de la parte foliar y radicular de las plantas de maíz fueron sometidos a la prueba de normalidad (Shapiro-

Wilk) para comprobar el supuesto de la distribución normal de los residuos, con un nivel de significancia de 0.05. Las hipótesis del modelo son:

Ho: Los residuos del modelo tienen distribución normal.

Ha: Los residuos del modelo no tienen distribución normal

Se acepta la hipótesis nula cuando el p-valor es mayor a 0.05

Así mismo, se realizó la prueba Levene para comprobar el supuesto de homogeneidad de varianzas, con un nivel de significancia de 0.05.

Las hipótesis del modelo son:

Ho: Las variancias de los tratamientos son homogéneos.

Ha: Las variancias de los tratamientos son heterogéneos.

Se acepta la hipótesis nula cuando el p-valor es mayor a 0.05

Cuadro 3: Esquema del análisis de varianza.

Fuente de variabilidad	G.L.
Encalante (E)	1
Dosis (D)	3
F. de fósforo (F)	1
ExD	3
ExF	1
DxF	3
ExDxF	3
Error	32
Total	47

En caso de incumplimiento de alguno de los supuestos se procedió a realizar transformaciones matemáticas específicas para cada variable, pero del mismo modo no se cumplió con los supuestos. Como último recurso se usó la eliminación de datos, considerando solo datos anómalos (outliers) del modelo. La cantidad de datos eliminados se indicará junto con los cuadros ANVA. Además, en algunos casos hubo pérdidas de unidades experimentales.

Luego de comprobar los supuestos, se realizó el análisis de variancia (ANVA) con arreglo factorial de tres factores, el nivel de significación fue de 0.05. En caso de encontrarse diferencias significativas solo a nivel de los factores, se procedió con el análisis de los efectos principales. Sin embargo, si se encontrase diferencias significativas a nivel de interacciones, se procedió a realizar un análisis de efectos simples (interacción de primer orden) o efectos simples simples (interacción de segundo orden). Posteriormente se realizó una prueba de Tukey, con un nivel de significancia de 0.05, en el que se contrastaron todos los tratamientos.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. En las propiedades del suelo experimental

4.1.1. pH

A partir del análisis de varianza para la variable pH (ANEXOS 1 y 9), se observa que resultaron significativas las interacciones Encalante x Dosis para las mediciones después de incubación y de cosecha. En el análisis de comparaciones de los promedios de pH obtenidos entre las dosis y evaluadas en los materiales encalantes (Cuadro 4, ANEXOS 42 y 43), para el caso de la dolomita no se observan diferencias significativas entre los niveles de pH después de la incubación, es decir, para cualquier dosis de dolomita aplicada, el nivel de pH fue estadísticamente similar. Pero, después de la cosecha, sí se presentaron diferencias estadísticas en el nivel de pH, obteniendo los valores más altos al aplicar 6.2 y 12.4 m-eq/100 g de dolomita. Al aplicar estas dosis se obtuvieron aumentos de 21.45 y 16.30% respecto al promedio de pH para la dosis 0 (sin aplicación).

Cuadro 4: Comparaciones de los promedios de pH obtenidos entre las dosis y evaluadas en los diferentes materiales encalantes.

Encalante	Dosis m-eq /100 g suelo	pH	
		Después de incubación	Después de cosecha
Dolomita	0	3.79 ^a	3.62 ^b
	3.1	3.83 ^a	3.60 ^b
	6.2	3.91 ^a	3.68 ^a
	12.4	3.91 ^a	3.70 ^a
Silicato de magnesio	0	3.87 ^c	3.62 ^d
	3.1	3.89 ^c	3.73 ^c
	6.2	4.18 ^b	3.81 ^b
	12.4	4.70 ^a	4.21 ^a

Al utilizar silicato de magnesio como material encalante, se observa que existen diferencias significativas en los promedios de pH a través de las diferentes dosis. Esto se presentó en las mediciones de pH después de la incubación y después de la cosecha. En ambas mediciones se observa que el mayor nivel de pH se obtuvo con la dosis de 12.4 m-eq/100 g de silicato de magnesio, siendo este nivel de pH mayor y estadísticamente diferente a los demás. Altos niveles de silicio (en forma de ácido monosilícico) incrementan el pH del suelo, y promueven la precipitación de metales, como Al (Lindsay, 1979; Owino-Gerroh y Gascho, 2005). Se observa que la tendencia de los promedios de pH obtenidos con la aplicación de dolomita a diferentes dosis no aumenta significativamente el pH, a diferencia de los niveles de pH obtenidos con el silicato de magnesio (Figura 2).

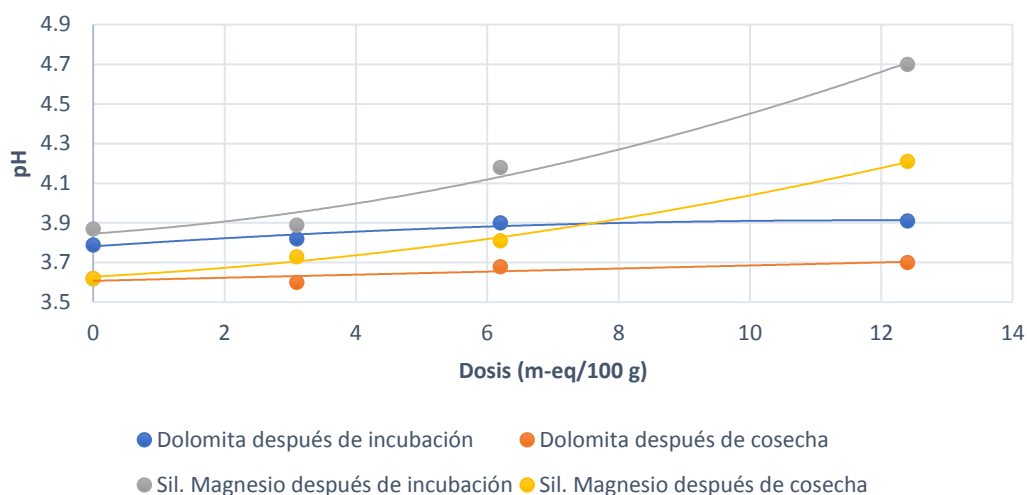


Figura 2: Cambios en el pH después de la aplicación de 4 dosis de silicato de magnesio y dolomita.

Cuadro 5: Comparaciones de los promedios de pH obtenidos entre los materiales encalantes y evaluadas en las diferentes dosis.

Encalante	pH							
	Dosis m-eq /100 g suelo							
	Después de incubación				Después de cosecha			
	0	3.1	6.2	12.4	0	3.1	6.2	12.4
Dolomita	3.79 ^a	3.83 ^a	3.91 ^b	3.90 ^b	3.62 ^a	3.60 ^b	3.68 ^b	3.70 ^b
Silicato de magnesio	3.87 ^a	3.89 ^a	4.18 ^a	4.70 ^a	3.62 ^a	3.73 ^a	3.81 ^a	4.21 ^a

En el análisis de comparaciones de los promedios de pH obtenidos entre los materiales encalantes evaluados en las diferentes dosis (Cuadro 5, Figura 3), se observó que los mayores niveles de pH se obtuvieron con el silicato de magnesio, en comparación con la dolomita, siendo estos significativamente diferentes en la mayoría de las dosis, principalmente en las dosis de 6.2 y 12.4 m-eq/100 g, en donde representaron un mayor aumento en el pH, tanto después de la incubación como después de la cosecha.

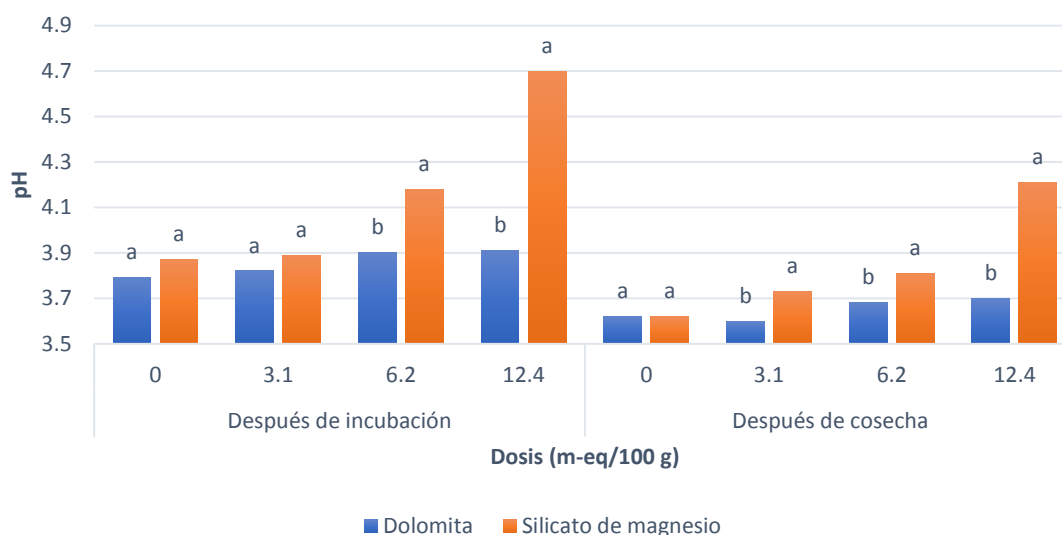


Figura 3: Efecto de la aplicación de silicato de magnesio y dolomita a diferentes dosis de material encalante en el pH del suelo.

A partir de los cuadros anteriores, se puede observar que, a medida que se aumentó la dosis de m-eq de silicato de magnesio, existe una tendencia de aumentar el pH. Resultados similares, usando silicatos para el encalado de suelos ácidos, fueron obtenidos por Cabral et al. (2008), Camargo et al. (2007) y Prado y Fernandes (2000). Según Alcarde (1992), esta elevación en el pH del suelo se debe al efecto de neutralización o alcalinidad ejercida por la fuente silicatada, que promueve la reacción de aniones SiO_3^{2-} con protones.

Cuadro 6: Comparaciones de los promedios de pH obtenidos entre las diferentes fuentes de fósforo después de la cosecha.

Fuente de fósforo	pH
FDA	3.72 ^b
ST	3.77 ^a

El efecto de las fuentes de fósforo en el pH del material de suelo, después de la cosecha, se presenta en el Cuadro 6. Se observa que el mayor nivel de pH se obtuvo al aplicar ST (3.77), siendo estadísticamente diferente y mayor que el nivel de pH alcanzado al aplicar FDA (3.72).

Se observa una disminución del pH en la medición después de la cosecha respecto a la medición del pH después de incubación. Esto puede deberse a la influencia del sistema radicular de la planta. Las raíces de las plantas toman del suelo los nutrientes en forma de cationes y aniones; esta absorción de nutrientes va acompañada de una transferencia de H^+ , OH^- y HCO_3^- desde la raíz hacia la solución suelo. Esto se hace para mantener la electroneutralidad y el balance de cargas en el citoplasma. Como consecuencia, los ecosistemas que aumentan en biomasa acidifican el suelo (Blake, 2004; Zapata, 2004). Además, la absorción de cationes por el cultivo puede reducir o incrementar la acidez del suelo producida por la nitrificación de NH_4^+ de los fertilizantes, desechos animales y vegetales, o de la materia orgánica (Havlin et al., 1999). También, los exudados liberados por los microorganismos y las raíces son importantes en la acidez y el reciclaje de elementos menores, como el Fe, Cu y Zn. Los ácidos orgánicos de cadena corta son los exudados más comunes en el suelo producidos por las raíces, como una de las actividades de la rizósfera. El grupo ácido de estos compuestos puede ceder fácilmente su protón en el rango del pH del suelo (Zapata, 2004).

Cuadro 7: Comparaciones de los promedios de pH obtenidos entre los materiales encalantes y evaluadas en las diferentes fuentes de fósforo después de incubación.

Encalante	Fuente de fósforo	
	FDA	ST
	pH	
Dolomita	3.87 ^b	3.84 ^b
Silicato de magnesio	4.10 ^a	4.21 ^a

En el análisis comparativo de los promedios de pH obtenidos entre los diferentes materiales encalantes y evaluados en los niveles de fuentes de fósforo (Cuadro 7), se observan mayores promedios de pH al aplicar silicato de magnesio respecto a la dolomita, sea junto con la aplicación de FDA o ST. Se observa que el mayor valor de pH se obtuvo

al aplicar silicato de magnesio con ST (4.21), comparado con la dolomita-ST, y la misma tendencia resultó al aplicar silicato de magnesio con FDA (4.10). Cuando se analizan los promedios de pH obtenidos entre las fuentes de fósforo en los niveles de material encalante, se observa que para el caso de la dolomita no existen diferencias significativas en los promedios de pH obtenidos al aplicar FDA o ST. Sin embargo, sí existieron diferencias significativas en los promedios de pH al aplicar silicato de magnesio, obteniéndose el mayor valor con ST.

Cuadro 8: Comparaciones de los promedios de pH obtenidos entre las fuentes de fósforo y evaluadas en los diferentes materiales encalantes después de incubación.

Encalante	Fuente de fósforo	
	FDA	ST
	pH	
Dolomita	3.87 ^a	3.84 ^a
Silicato de magnesio	4.10 ^b	4.21 ^a

4.1.2. Acidez cambiabile

Según lo obtenido en el análisis de varianza para la variable acidez cambiabile (ANEXO 2), se observa que resultaron significativas la interacción Encalante x Dosis, y el factor fuente de fósforo. En el análisis comparativo de los promedios de acidez cambiabile obtenidos entre las dosis y evaluados en los niveles de material encalante (Cuadro 9, ANEXO 44) se observa que no existieron diferencias significativas en los promedios de acidez cambiabile entre las diferentes dosis de dolomita. Sin embargo, sí se observaron diferencias significativas entre las dosis al aplicar silicato de magnesio, obteniéndose la mayor disminución de acidez cambiabile con la dosis de 12.4 m-eq/100 g, representando una disminución del 64.79% respecto a la dosis 0 (sin aplicación). La acidez intercambiabile consiste en H⁺ de los sitios de intercambio, así como los H⁺ resultante de la hidrólisis de Al desplazado de los sitios de intercambio. Además, el Al es el mayor componente de la acidez intercambiabile (Logan et al. 1985). Se ha demostrado que el silicato de magnesio tiene un gran efecto en la neutralización del aluminio y en su actividad (Schulthess y Tokunaga, 1996; Baylis et al., 1994). Así mismo, se observa que el aumento en las dosis de silicato de magnesio produjo una disminución progresiva de la acidez cambiabile (Cuadro 9 y Figura 4).

Respecto al efecto de las fuentes de fósforo en la acidez cambiante, se observa que la mayor reducción de acidez cambiante se obtuvo al aplicar ST como fuente de fósforo, siendo este resultado estadísticamente diferente al obtenido con FDA.

Cuadro 9: Comparaciones de los promedios de acidez cambiante obtenidos entre las dosis y evaluadas en los diferentes materiales encalantes.

Encalante	Dosis m-eq /100 g suelo	Acidez cambiante (m-eq H+Al /100 g suelo)
Dolomita	0	7.55 ^a
	3.1	7.73 ^a
	6.2	8.03 ^a
	12.4	7.35 ^a
Silicato de magnesio	0	8.18 ^a
	3.1	5.97 ^b
	6.2	4.05 ^c
	12.4	2.88 ^d

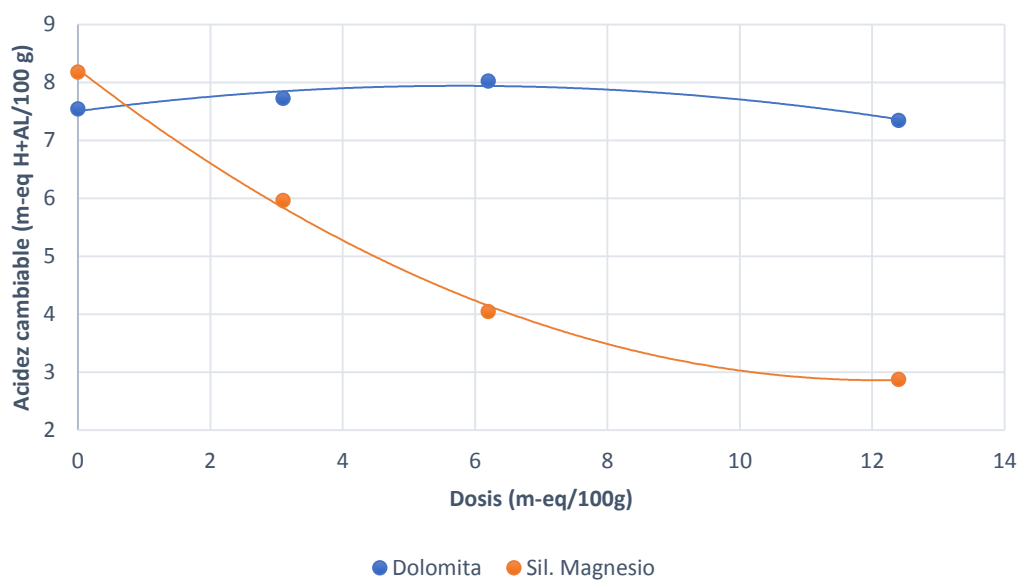


Figura 4: Cambios en la acidez cambiante después de la aplicación de 4 dosis de silicato de magnesio y dolomita.

En el análisis comparativo de los promedios de acidez cambiante entre los materiales encalantes y en las diferentes dosis (Cuadro 10 y Figura 5) se encontraron diferencias estadísticas significativas en los promedios de acidez cambiante obtenidos entre la dolomita y el silicato de magnesio en todas las dosis. Se observa que las mayores disminuciones de acidez cambiante se obtuvieron al aplicar silicato de magnesio, a excepción de la dosis 0 (sin aplicación). Al aplicar silicato de magnesio para las dosis 3.1, 6.2 y 12.4 m-eq/100 g, se observan disminuciones del 22.77, 49.56 y 60.82% en la acidez cambiante respecto a la dolomita, cuyas magnitudes se observan mejor en la Figura 5.

Cuadro 10: Comparaciones de los promedios de acidez cambiante obtenidos entre los materiales encalantes y evaluadas en las diferentes dosis.

Encalante	Acidez cambiante (m-eq/100 g)			
	Dosis m-eq /100 g suelo			
	0	3.1	6.2	12.4
Dolomita	7.55 ^b	7.73 ^a	8.03 ^a	7.35 ^a
Silicato de magnesio	8.18 ^a	5.97 ^b	4.05 ^b	2.88 ^b

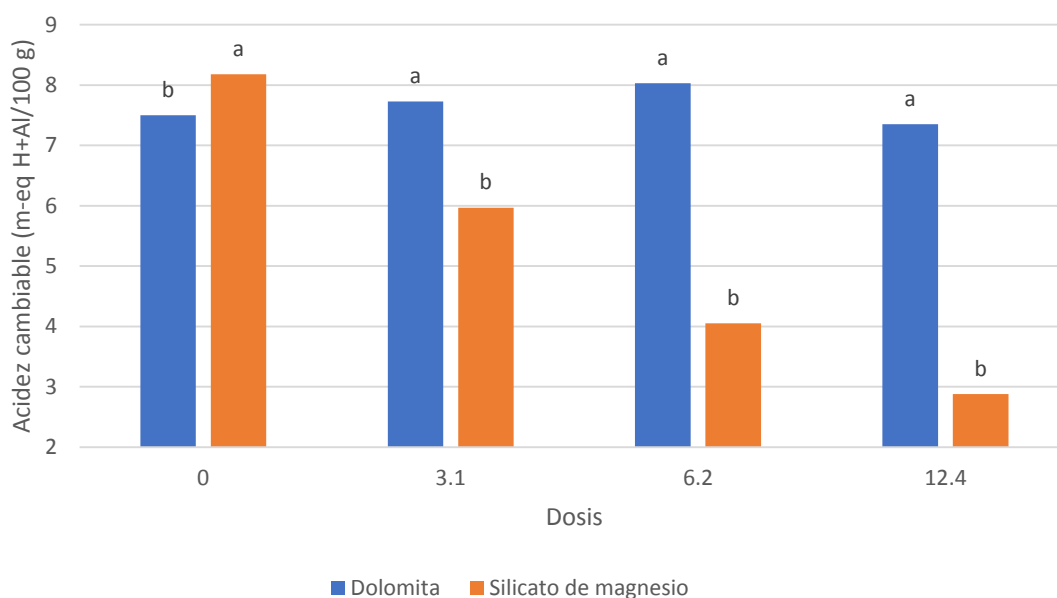


Figura 5: Efecto de la aplicación de silicato de magnesio y dolomita a diferentes dosis de material encalante en la acidez cambiante del suelo.

Estudios llevados a cabo por Carvalho-Pupatto et al. (2004), demostraron que, además de elevar de forma significativa los valores de pH, la fertilización silicatada redujo la acidez potencial (H + Al) del suelo. Además se observa que tratamientos con dolomita presentan los niveles más altos de acidez cambiante, respecto a los tratamientos con silicato de magnesio.

Cuadro 11: Comparaciones de los promedios de acidez cambiante obtenidos entre las diferentes fuentes de fósforo.

Fuente de fósforo	Acidez cambiante (m-eq H+Al /100 g suelo)
FDA	6.66 ^a
ST	6.28 ^b

En el análisis del efecto de la fuente de fósforo en la acidez cambiante, se observan diferencias estadísticas significativas entre el FDA y el ST, siendo este último menor.

4.1.3. Aluminio cambiante

Para el caso de aluminio cambiante, el análisis de varianza arrojó diferencias significativas para las interacciones encalante-dosis y dosis-fuente de fósforo (ANEXO 5).

Cuadro 12: Comparaciones de los promedios de aluminio cambiante obtenidos entre las dosis y evaluadas en los diferentes materiales encalantes.

Encalante	Dosis m-eq /100 g suelo	Aluminio cambiante (m-eq Al /100 g suelo)
Dolomita	0	6.83 ^a
	3.1	5.77 ^b
	6.2	6.78 ^a
	12.4	6.22 ^{ab}
Silicato de magnesio	0	6.65 ^a
	3.1	5.42 ^b
	6.2	3.25 ^c
	12.4	1.72 ^d

En el análisis comparativo de los promedios de aluminio cambiante obtenidos entre las dosis y evaluados en los niveles de material encalante (Cuadro 12, ANEXO 45), se observan diferencias estadísticas significativas en los promedios de aluminio cambiante en las diferentes dosis al aplicar dolomita y silicato de magnesio. En la dolomita no se observa una tendencia muy clara entre los promedios de aluminio cambiante obtenidos en las diferentes dosis. Sin embargo, al aplicar silicato de magnesio, se observa una marcada disminución progresiva del aluminio cambiante a medida que se aumentan las dosis. Esto se puede observar mejor en la Figura 6.

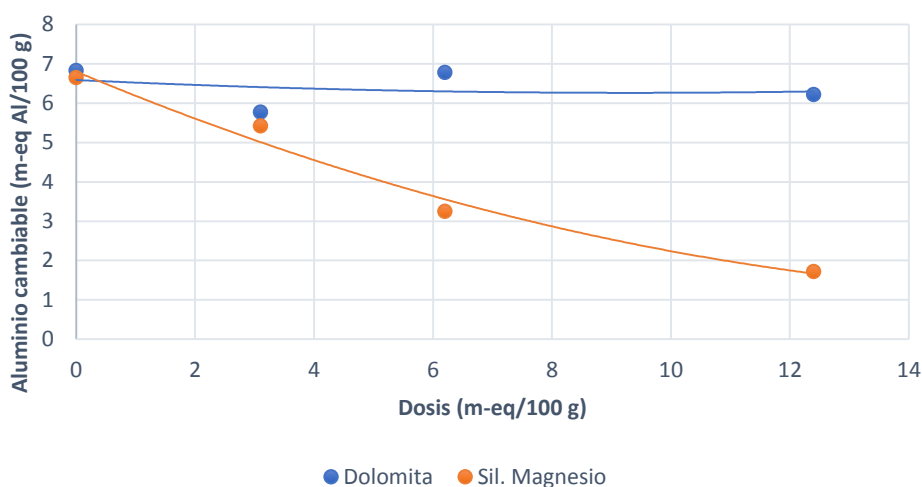


Figura 6: Cambios en el aluminio cambiante después de la aplicación de 4 dosis de silicato de magnesio y dolomita.

Cuadro 13: Comparaciones de los promedios de acidez cambiante obtenidos entre los materiales encalantes y evaluadas en las diferentes dosis.

Encalante	Aluminio cambiante (m-eq/100 g)			
	Dosis m-eq /100 g suelo			
	0	3.1	6.2	12.4
Dolomita	6.83 ^a	5.77 ^a	6.78 ^a	6.22 ^a
Silicato de magnesio	6.65 ^a	5.42 ^a	3.25 ^b	1.72 ^b

En el análisis comparativo de los promedios de aluminio cambiante entre los materiales encalantes y evaluados en los niveles de las dosis (Cuadro 13, Figura 7), se observan diferencias estadísticas significativas en los promedios de aluminio cambiante entre el silicato de magnesio y la dolomita en las dosis 6.2 y 12.4 m-eq/100 g. Dichas diferencias

representan una disminución del 52.06 y 72.35% en los promedios de aluminio cambiante al aplicar silicato de magnesio respecto a la dolomita.

Baylis et al. (1994) mencionan que, cuando el pH de la solución suelo es mayor a 4, especies de hidroxialuminosilicato empiezan a formarse. El silicio soluble, o ácido silícico, puede entonces ayudar a proteger a las plantas de los efectos tóxicos del aluminio mediante la formación de hidroxialuminosilicatos. Los hidroxialuminosilicatos son formados por la reacción de ácido silícico con los grupos hidroxilo adyacentes de los hidróxidos de aluminio y son compuestos extremadamente insolubles.

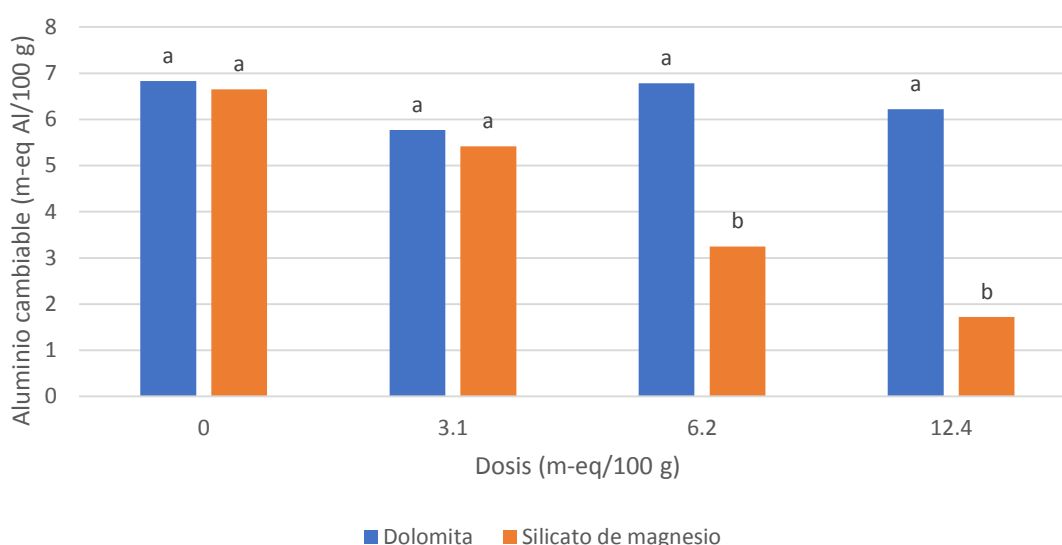


Figura 7: Efecto de la aplicación de silicato de magnesio y dolomita a diferentes dosis de material encalante en el aluminio cambiante del suelo.

Cuadro 14: Comparaciones de los promedios de aluminio cambiante obtenidos entre las dosis y evaluadas en las diferentes fuentes de fósforo.

Dosis (m-eq /100 g suelo)	Fuente de fósforo	
	FDA	ST
	Aluminio cambiante (m-eq Al /100 g suelo)	
0	7.00 ^a	6.48 ^a
3.1	6.24 ^b	5.08 ^b
6.2	4.92 ^c	4.80 ^b
12.4	4.00 ^d	3.93 ^c

Se observan diferencias estadísticas significativas entre los promedios para FDA y ST (Cuadro 14) al realizar la comparación de los promedios de aluminio cambiante entre las dosis y evaluadas en dichas fuentes de fósforo. Tanto para FDA como ST se observa una disminución progresiva en los promedios de aluminio cambiante a medida que aumentan las dosis de material encalante (Figura 8). Para ambas fuentes de fósforo el menor promedio de aluminio cambiante se obtuvo con la dosis de 12.4 m-eq/100 g de material encalante. Dichas diferencias representaron disminuciones del promedio de aluminio cambiante del 42.86 y 39.35%, para FDA y ST, respecto a las obtenidas con la dosis 0.

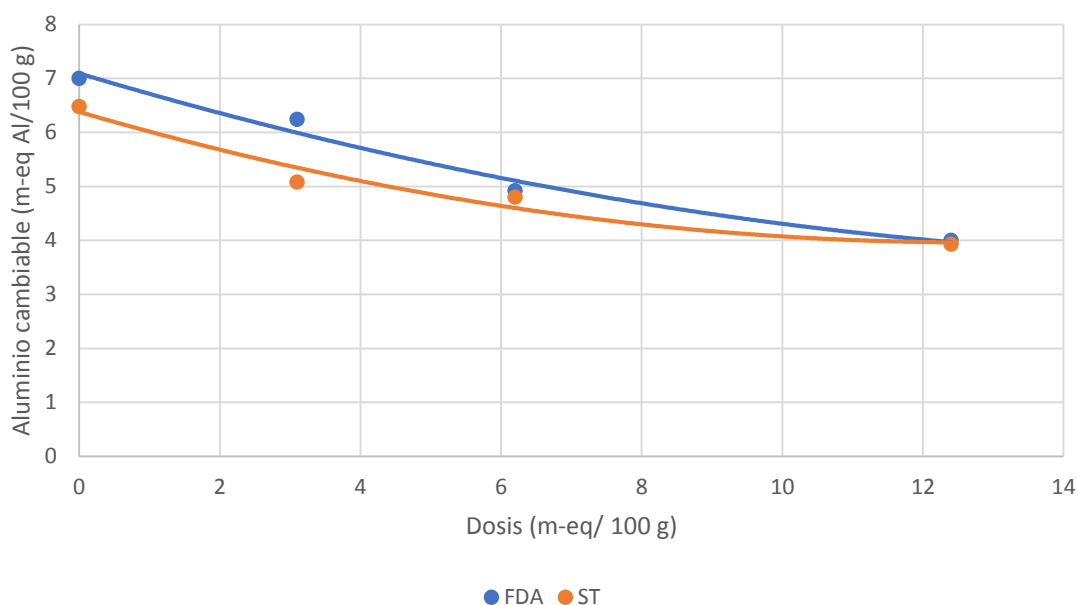


Figura 8: Cambios en el aluminio cambiante después de la aplicación de 4 dosis de material encalante junto con FDA o ST como fuentes de fósforo.

En el análisis comparativo de los promedios de aluminio cambiante entre las diferentes fuentes de fósforo y evaluadas en las diferentes dosis (Cuadro 15, Figura 9) puede observarse que existen diferencias estadísticas significativas en los promedios obtenidos entre el FDA y el ST, obteniéndose los menores promedios de aluminio cambiante al aplicar ST. Esto puede deberse debido a la solubilidad y a los productos de la reacción de solubilidad de las fuentes de fósforo. El ST es más soluble que el FDA, generalmente más del 90% del ST es soluble, mientras que FDA ofrece una solubilidad de 588 g/L. Además, el principal producto de la reacción de solubilidad del ST es el ion fosfato diácido (H_2PO_4^-), mientras que en el caso del FDA es el ion fosfato ácido (HPO_4^{2-}). El ion H_2PO_4^- es el ion de fósforo más abundante a pH ácidos, y es el ion que reaccionará rápidamente con

el aluminio, formándose un producto de baja solubilidad. Es por ello que los promedios de aluminio cambiante han resultado ser menores al aplicar ST en comparación con FDA.

Cuadro 15: Comparaciones de los promedios de aluminio cambiante obtenidos entre las fuentes de fósforo y evaluadas en las diferentes dosis.

Fuente de fósforo	Aluminio cambiante (m-eq/100 g)			
	Dosis m-eq /100 g suelo			
	0	3.1	6.2	12.4
FDA	7.00 ^a	6.24 ^a	4.92 ^a	4.00 ^a
ST	6.48 ^b	5.08 ^b	4.80 ^b	3.93 ^a

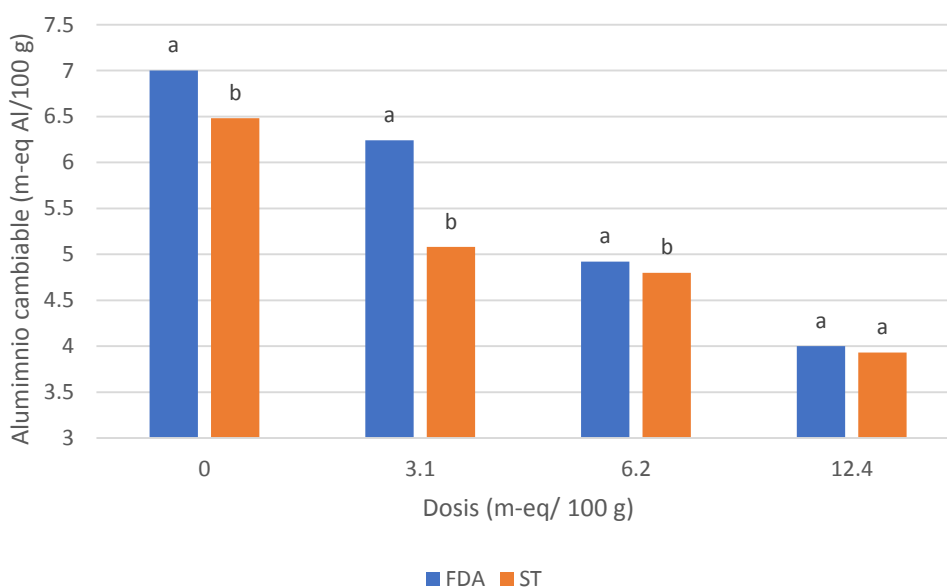


Figura 9: Efecto de la aplicación de FDA y ST a diferentes dosis de material encalante en el aluminio cambiante del suelo.

4.2. Análisis foliar y radicular

4.2.1. Peso seco

Los análisis de varianza para las variables de peso seco de la parte aérea y radicular mostraron diferencias estadísticas significativas en la interacción Material encalante x Dosis x Fuente de fósforo (ANEXOS 12 y 13). Al ser significativa la interacción, se realizó el análisis de los efectos simples simples (ANEXOS 47 y 49).

Cuadro 16: Comparaciones de los promedios de peso seco obtenidos entre las dosis y evaluadas en los diferentes materiales encalantes y fuentes de fósforo.

Encalante	Dosis m-eq /100 g suelo	Fuentes de fósforo			
		FDA	ST	FDA	ST
		Peso seco foliar (g)		Peso seco radicular (g)	
Dolomita	0	1.63 ^a	1.33 ^a	0.29 ^{ab}	0.31 ^{ab}
	3.1	2.46 ^a	0.98 ^a	0.29 ^{ab}	0.14 ^b
	6.2	2.19 ^a	1.25 ^a	0.22 ^b	0.18 ^b
	12.4	1.72 ^a	1.57 ^a	0.45 ^a	0.45 ^a
Silicato de magnesio	0	1.37 ^d	1.24 ^d	0.45 ^d	0.27 ^d
	3.1	8.36 ^c	4.26 ^c	1.40 ^c	0.73 ^c
	6.2	21.74 ^a	20.85 ^a	4.66 ^b	2.26 ^b
	12.4	20.56 ^b	14.95 ^b	5.18 ^a	2.66 ^a

En el análisis comparativo de los promedios de peso seco obtenidos entre las dosis y evaluados en los niveles de material encalante y de fuentes de fósforo (Cuadro 16), se observa que a nivel foliar no existieron diferencias estadísticas significativas en los promedios de producción de peso seco entre las dosis al aplicar dolomita junto con FDA y ST. Sin embargo, a nivel radicular, para la misma condiciones (dosis en dolomita-FDA o ST) se observaron diferencias estadísticas significativas de los promedios de peso seco entre las dosis, pero cuyas diferencias no son bien marcadas y no siguen una tendencia; para ambos casos (dolomita-FDA y dolomita-ST) el mayor promedio de peso seco se obtuvo con la dosis de 12.4 m-eq/100 g.

En la comparación de los promedios de peso seco entre las dosis con el silicato de magnesio como fuente encalante se observan diferencias estadísticas significativas, tanto para FDA como ST, en hoja y raíz. Para el caso de peso seco foliar, el mayor promedio se obtuvo con la dosis de 6.2 m-eq/100 g, tanto para FDA (21.74 g) como ST (20.85 g), representando 14.86 y 15.81 veces más lo producido con la dosis 0, respectivamente. Al usar silicato de magnesio se observa que los promedios de peso seco aumentan progresivamente a medida que crecen las dosis. Esta tendencia se aprecia en las Figuras 10 y 11.

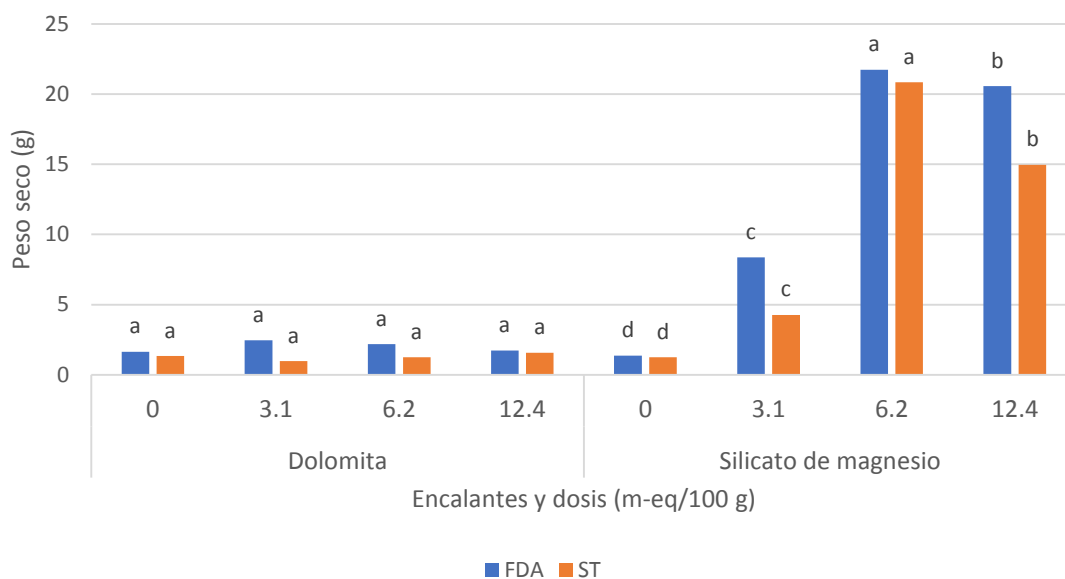


Figura 10: Efecto de la dosis de material encalante en el peso seco foliar en los diferentes materiales encalantes y fuentes de fósforo.

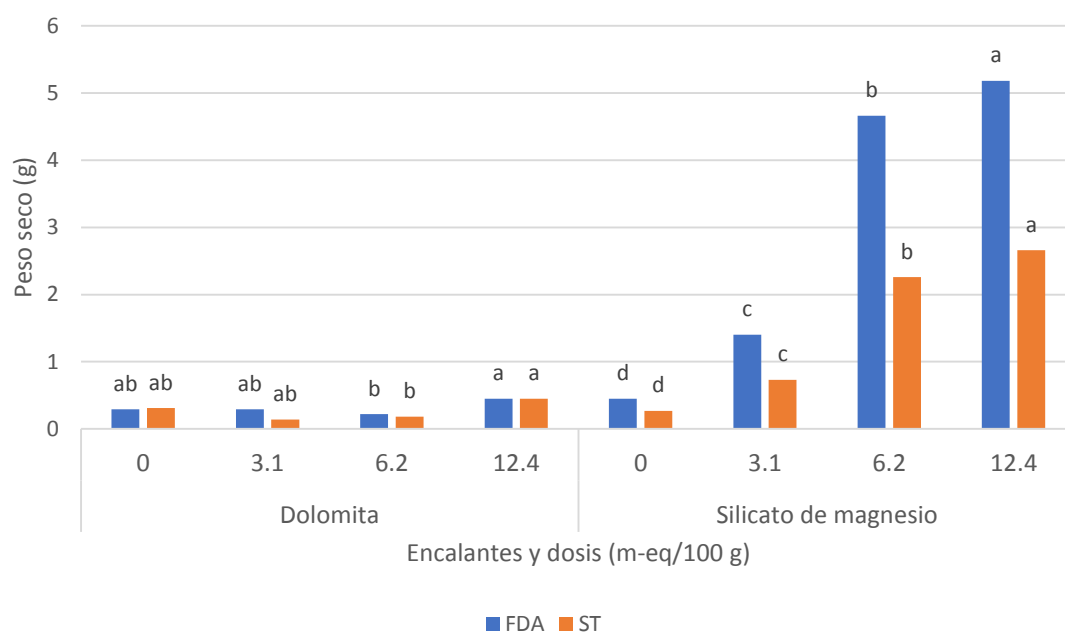


Figura 11: Efecto de la dosis de material encalante en el de peso seco radicular en los diferentes materiales encalantes y fuentes de fósforo.

En el Cuadro 17 se presenta el análisis comparativo de los promedios de peso seco entre los materiales encalantes y evaluados en los niveles de dosis y fuentes de fósforo, a nivel foliar y radicular. Se observan, tanto en hoja como en raíz, la existencia de diferencias estadísticas significativas en los promedios de peso seco a nivel de material encalante, donde el silicato de magnesio presenta los mayores promedios de peso seco, para todas

las dosis y fuentes de fósforo, a excepción de la dosis 0. Con las dosis de 6.2 y 12.4 m-eq/100 g se observaron las mayores diferencias, representando aumentos entre 9 y 11 veces más, aproximadamente, respecto a la dolomita. Estas diferencias marcadas se observan en las Figuras 12 y 13.

Cuadro 17: Comparaciones de los promedios de peso seco obtenidos entre los materiales encalantes y evaluadas en las diferentes dosis y fuentes de fósforo.

Dosis m-eq /100 g suelo	Fuente de fósforo	Encalante			
		Dolomita	Silicato de magnesio	Dolomita	Silicato de magnesio
		Peso seco foliar (g)		Peso seco radicular (g)	
0	FDA	1.63 ^a	1.37 ^a	0.29 ^b	0.45 ^a
	ST	1.33 ^a	1.24 ^a	0.31 ^a	0.27 ^b
3.1	FDA	2.46 ^b	8.36 ^a	0.29 ^b	1.40 ^a
	ST	0.98 ^b	4.26 ^a	0.14 ^b	0.73 ^a
6.2	FDA	2.19 ^b	21.74 ^a	0.22 ^b	4.66 ^a
	ST	1.25 ^b	20.85 ^a	0.18 ^b	2.26 ^a
12.4	FDA	1.72 ^b	20.56 ^a	0.45 ^b	5.18 ^a
	ST	1.57 ^b	14.95 ^a	0.45 ^b	2.66 ^a

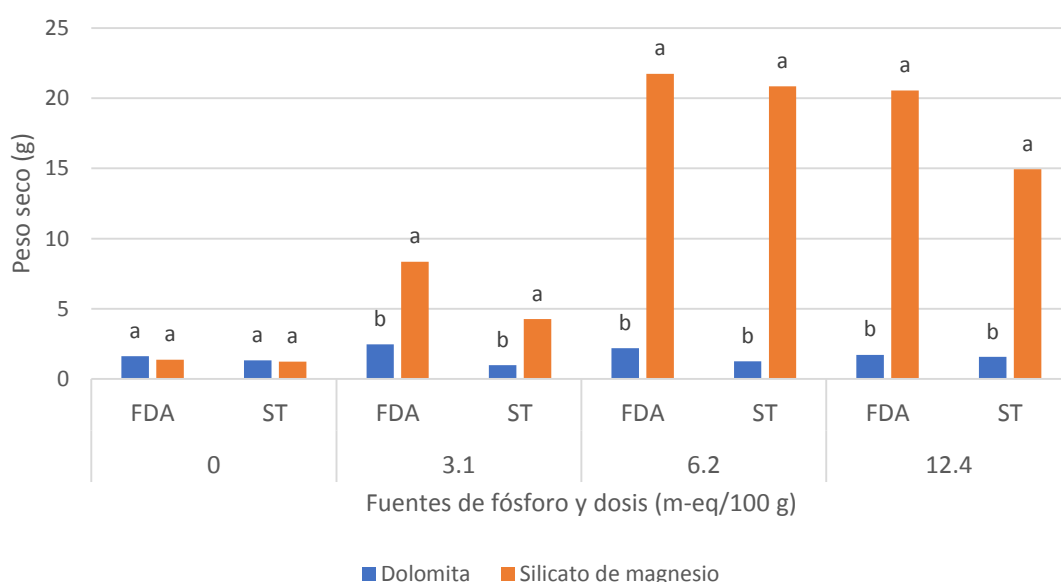


Figura 12: Efecto de los materiales encalantes en el peso seco foliar en las diferentes dosis y fuentes de fósforo.

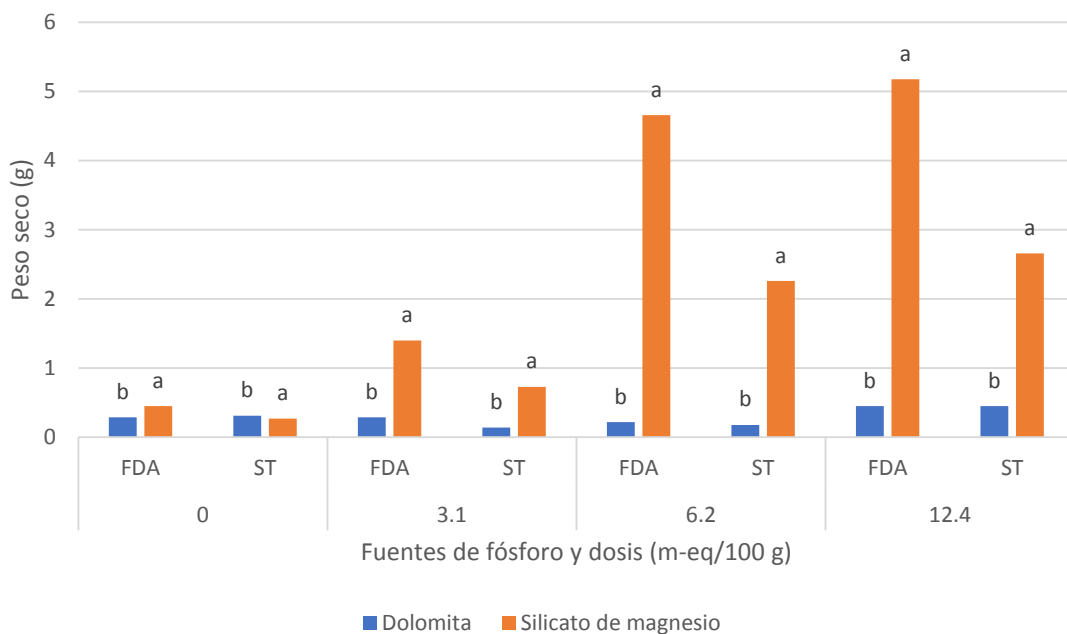


Figura 13: Efecto de los materiales encalantes en la producción de peso seco radicular en las diferentes dosis y fuentes de fósforo.

Estos resultados pueden ser debido a un aumento en el pH del suelo, seguido de una menor toxicidad por aluminio. Los efectos tóxicos del aluminio se han descrito en las angiospermas monocotiledóneas y dicotiledóneas (Foy, 1988) y en las gimnospermas (Schaedle et al., 1989) y, a nivel mundial, la toxicidad por Al limita la producción de cultivos en suelos tropicales y subtropicales (Foy, 1992). Esta toxicidad interfiere en las reacciones enzimáticas, el metabolismo de numerosos elementos y con la permeabilidad de la membrana plasmática (Kochian, 1995). Más aún, el Al inhibe la elongación radicular y la inducción a la síntesis de callosa, la cual aparece después de un corto tiempo de exposición a Al (Horst et al., 1997).

Batista et al. (2013), en un experimento llevado a cabo con maíz en solución nutritiva, indican que la producción de materia seca de la parte aérea y radicular disminuyó con el incremento de la concentración de Al en solución. Los mismos resultados obtuvo Farías et al. (2011), donde niveles crecientes de Al en la solución nutritiva provocaron una disminución en la producción de materia seca de la parte aérea y radicular. Estos experimentos guardan relación con los resultados obtenidos en este trabajo.

Hodson y Sangster (1999) destacan que el efecto del silicio en la mitigación del aluminio tóxico es resultado de la disminución en la concentración de Al en la solución del suelo, por medio de la formación de complejos Al-Si (complejos hidroxialuminosilicatos), aumentando la disponibilidad de nutrientes en el suelo. Es conocido que el silicio puede tener efectos en la disminución de la fitotoxicidad de ciertos metales (Doncheva et al., 2009; Vaculik et al., 2009).

El Cuadro 18 muestra el análisis comparativo de los promedios de peso seco obtenidos entre las diferentes fuentes de fósforo y evaluados en los niveles de material encalante y dosis. Se observa que, para el caso de la dolomita, los promedios de peso seco foliar y radicular, para la mayoría de las dosis, no presentaron diferencias estadísticas significativas entre la aplicación de FDA y ST. Sin embargo, al usar silicato de magnesio como material encalante, se obtuvieron diferencias estadísticas significativas en las dosis 3.1 y 12.4 m-eq/100g, en la parte foliar, y en todas las dosis en la parte radicular. Se aprecian gráficamente los promedios y sus magnitudes en las Figuras 14 y 15.

Cuadro 18: Comparaciones de los promedios de peso seco obtenidos entre las fuentes de fósforo y evaluadas en los diferentes materiales encalantes y dosis.

Encalante	Dosis m-eq /100 g suelo	Fuentes de fósforo			
		FDA	ST	FDA	ST
		Peso seco foliar (g)		Peso seco radicular (g)	
Dolomita	0	1.63 ^a	1.33 ^a	0.29 ^a	0.31 ^a
	3.1	2.46 ^a	0.98 ^b	0.29 ^a	0.14 ^b
	6.2	2.19 ^a	1.25 ^a	0.22 ^a	0.18 ^a
	12.4	1.72 ^a	1.57 ^a	0.45 ^a	0.45 ^a
Silicato de magnesio	0	1.37 ^a	1.24 ^a	0.45 ^a	0.27 ^b
	3.1	8.36 ^a	4.26 ^b	1.40 ^a	0.73 ^b
	6.2	21.74 ^a	20.85 ^a	4.66 ^a	2.26 ^b
	12.4	20.56 ^a	14.95 ^b	5.18 ^a	2.66 ^b

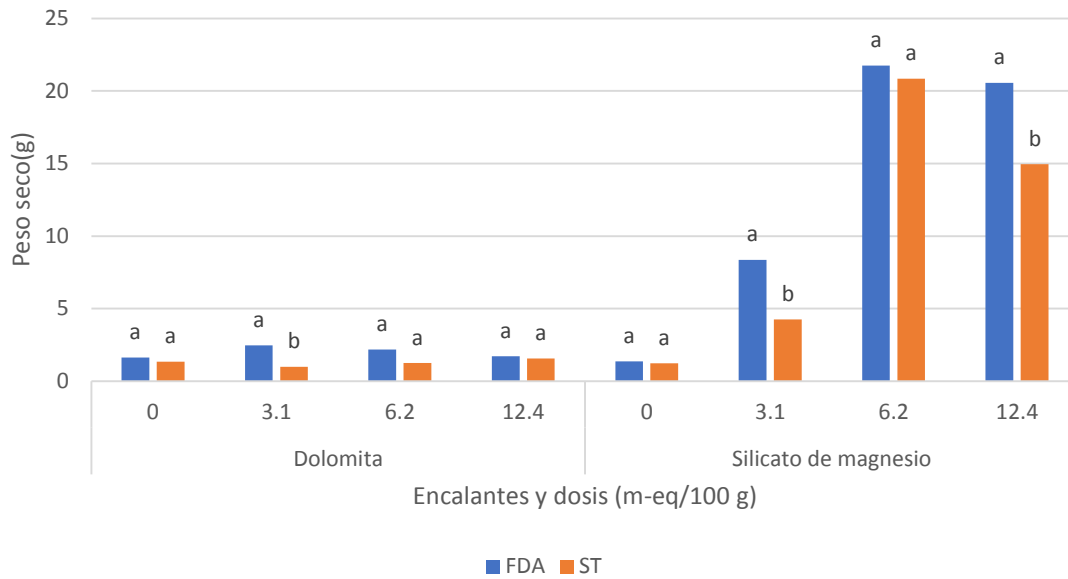


Figura 14: Efecto de las fuentes de fósforo en la producción de peso seco foliar en los diferentes materiales encalantes y dosis.

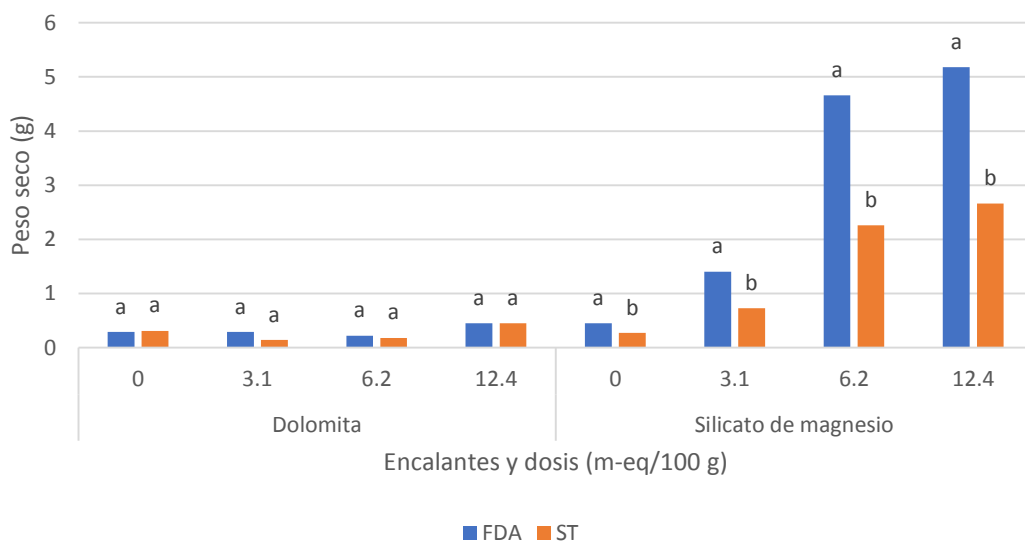


Figura 15: Efecto de las fuentes de fósforo en la producción de peso seco radicular en los diferentes materiales encalantes y dosis.

Estos resultados pueden deberse a la solubilidad de la fuente de fósforo. Mientras que el ST es más soluble que el FDA, esta fuente liberará de forma más rápida el ion fosfato diácido ($H_2PO_4^-$), el cual rápidamente reaccionará con las diferentes especies iónicas de aluminio, las cuales a pH ácidos son las que más abundan, principalmente $[Al^{3+}$, $Al(OH)^{2+}$, $Al(OH)_2^+$], formando compuestos de baja solubilidad, reduciendo la disponibilidad de fósforo, principal nutriente para la planta, debido a su participación

estructural, formando parte de las membranas celulares, y energética, ATP. El FDA, en cambio, al presentar menor solubilidad, la liberación del ion fosfato ácido (HPO_4^{2-}) es menor, y, por lo tanto, no todo el fósforo reaccionará con el aluminio en el tiempo inmediato.

4.2.2. Nitrógeno

Los análisis de varianza para las variables de extracción de nitrógeno de la parte aérea y radicular mostraron diferencias estadísticas significativas en la interacción de segundo orden (Material encalante x Dosis x Fuente de fósforo (ANEXOS 17 y 18). Al ser significativa la interacción, se realizó el análisis de los efectos simples simples (ANEXOS 54 y 56).

Al realizar las comparaciones de los promedios de la extracción de N entre las dosis y en los diferentes materiales encalantes y fuentes de fósforo (Cuadro 19), se observa que a nivel foliar las dosis con aplicación de dolomita como material encalante no presentaron diferencias estadísticas significativas en los promedios de absorciones de N, sea con FDA o ST como fuente de fósforo. En la extracción de N radicular sí se presentaron diferencias estadísticas significativas en los promedios a nivel de dosis, obteniéndose los mayores promedios con la dosis 12.4 m-eq/100 g, sea con FDA o ST. Sin embargo, no existen diferencias marcadas entre los promedios de peso seco obtenidos a diferentes dosis.

Cuadro 19: Comparaciones de los promedios de extracción de N obtenidos entre las dosis y evaluadas en los diferentes materiales encalantes y fuentes de fósforo.

Encalante	Dosis m-eq /100 g suelo	Fuente de fósforo			
		FDA	ST	FDA	ST
		Extracción N foliar (mg/maceta)		Extracción N radicular (mg/maceta)	
Dolomita	0	35.67 ^a	26.67 ^a	5.00 ^{ab}	4.33 ^{ab}
	3.1	49.33 ^a	20.00 ^a	4.67 ^b	2.33 ^b
	6.2	55.33 ^a	36.50 ^a	3.33 ^b	3.00 ^b
	12.4	32.67 ^a	29.33 ^a	7.33 ^a	6.33 ^a
Silicato de magnesio	0	30.00 ^d	24.67 ^d	7.67 ^d	3.67 ^d
	3.1	183.67 ^c	89.33 ^c	21.00 ^c	12.33 ^c
	6.2	317.00 ^a	315.00 ^a	45.00 ^b	27.50 ^b
	12.4	266.67 ^b	232.50 ^b	84.00 ^a	40.33 ^a

Al usar silicato de magnesio como material encalante, se observaron diferencias estadísticas significativas en los promedios obtenidos entre las dosis, tanto para FDA como ST, en la parte foliar y radicular. Para el caso de la parte foliar, la mayor absorción de N se presentó con la dosis de 6.2 m-eq/100 g, en donde con FDA se obtuvo una extracción de 9.6 veces más que la dosis 0, y con ST, 11.76 veces más. Se presenta una tendencia similar a la obtenida en la variable peso seco, donde a mayores dosis de silicato de magnesio, mayores promedios de peso seco producido. En este caso, a mayores dosis de silicato de magnesio, mayor extracción de N (Figura 16).

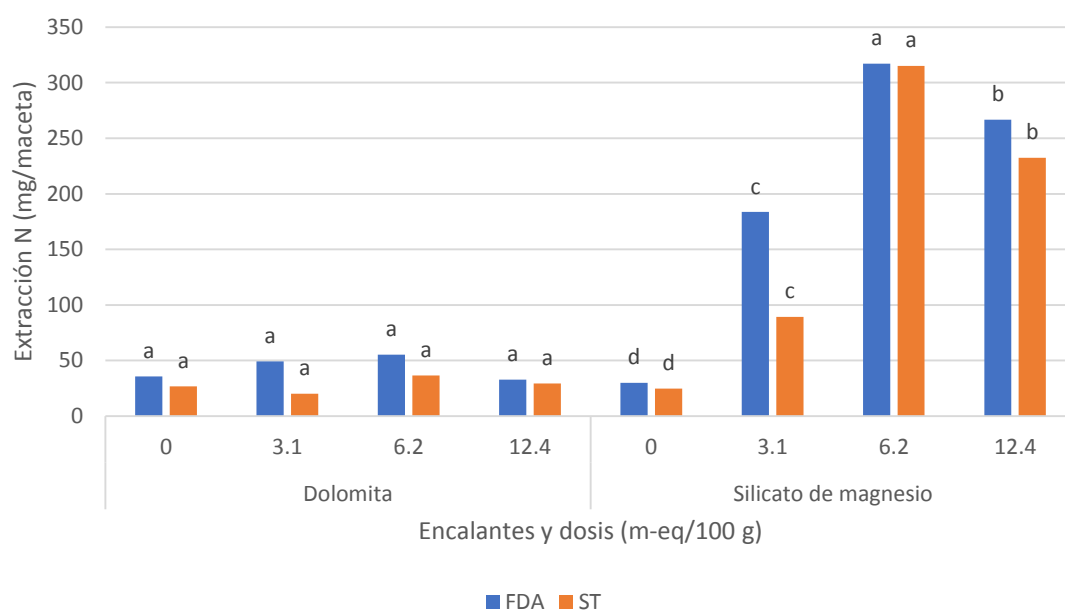


Figura 16: Efecto de las dosis de material encalante en la extracción de nitrógeno foliar en los diferentes materiales encalantes y fuentes de fósforo.

En la parte radicular, la mayor extracción se obtuvo con la dosis de 12.4 m-eq/100 g. Esto tanto con FDA y ST, en donde las extracciones de N representaron cerca de 10 veces más lo extraído con la dosis 0, para ambas fuentes de fosforo. Se observa la tendencia de aumentar las extracciones de N conforme aumentan las dosis de silicato de magnesio, sea junto a FDA o ST. Esto se puede ver con claridad en la Figura 17. Cabe resaltar que esto guarda relación con los aumentos de pH y las disminuciones de las concentraciones de aluminio cambiante en solución.

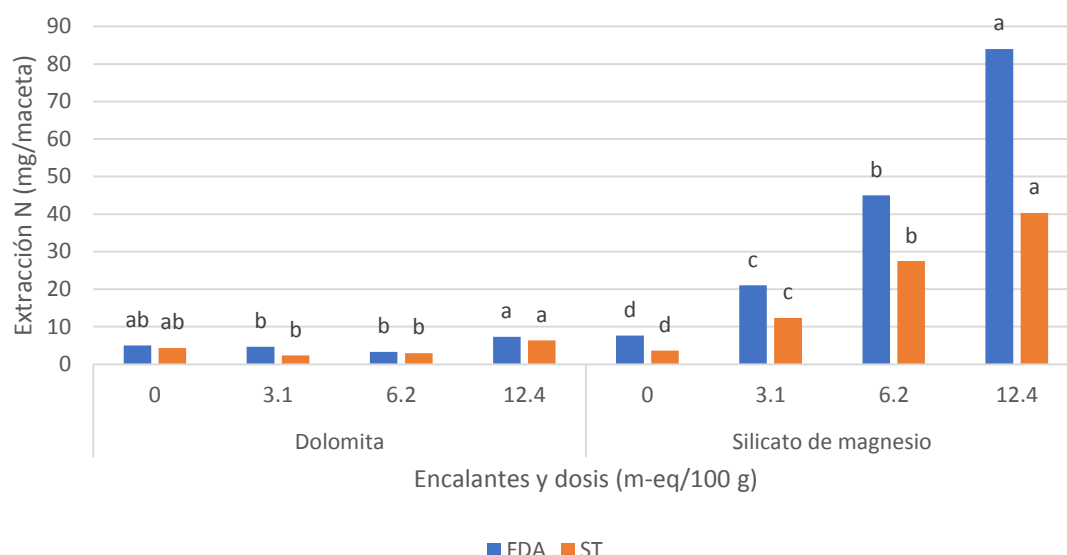


Figura 17: Efecto de las dosis de material encalante en la extracción de nitrógeno radicular en los diferentes materiales encalantes y fuentes de fósforo.

En el Cuadro 20 se observan las comparaciones de los promedios de extracción de N obtenidos entre materiales encalantes evaluados en los diferentes niveles de dosis y fuentes de fósforo.

Cuadro 20: Comparaciones de los promedios de extracción de N obtenidos entre los materiales encalantes y evaluadas en las diferentes dosis y fuentes de fósforo.

Dosis m-eq /100 g suelo	Fuente de fósforo	Encalante			
		Dolomita		Silicato de magnesio	
		Extracción N foliar (mg/maceta)	Extracción N radicular (mg/maceta)	Extracción N foliar (mg/maceta)	Extracción N radicular (mg/maceta)
0	FDA	35.67 ^a	30.00 ^a	5.00 ^b	7.67 ^a
	ST	26.67 ^a	24.67 ^a	4.33 ^a	3.67 ^a
3.1	FDA	49.33 ^b	183.67 ^a	4.67 ^b	21.00 ^a
	ST	20.00 ^b	89.33 ^a	2.33 ^b	12.33 ^a
6.2	FDA	55.33 ^b	317.00 ^a	3.33 ^b	45.00 ^a
	ST	36.50 ^b	315.00 ^a	3.00 ^b	27.50 ^a
12.4	FDA	32.67 ^b	266.67 ^a	7.33 ^b	84.00 ^a
	ST	29.33 ^b	232.50 ^a	6.33 ^b	40.33 ^a

Se puede observar que los mayores promedios de extracción de N se obtuvieron con el uso de silicato de magnesio como enmienda encalante, comparado con la dolomita, tanto con FDA como ST como fuente de fósforo, en las diferentes dosis. Esta tendencia se muestra tanto a nivel foliar como radicular.

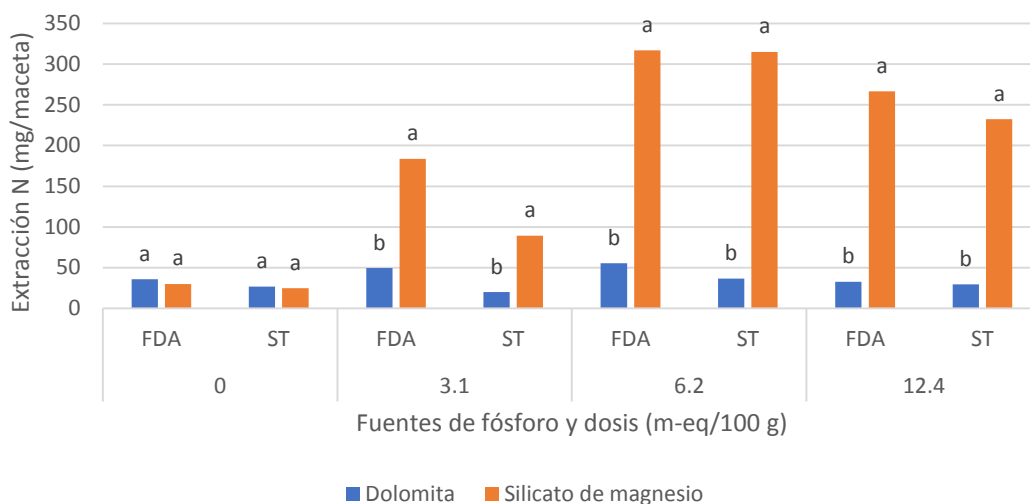


Figura 18: Efecto de los materiales encalantes en la extracción de nitrógeno foliar en las diferentes dosis y fuentes de fósforo.

Dichas diferencias varían en aumentos entre 3.47 y 7.16 veces más lo extraído con silicato de magnesio, comparado con la dolomita. En la parte radicular, el rango es de 4 a 10.5 veces más lo extraído con silicato de magnesio que con dolomita. Las magnitudes de estas diferencias se pueden apreciar en las Figuras 18 y 19.

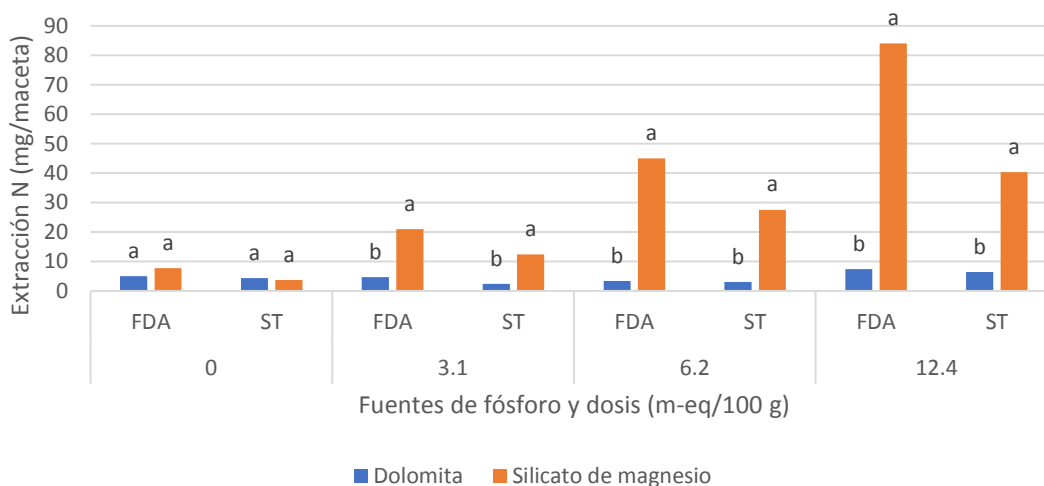


Figura 19: Efecto de los materiales encalantes en la extracción de nitrógeno radicular en las diferentes dosis y fuentes de fósforo.

Estos resultados están asociados a la capacidad del silicato como encalante a las diferentes dosis aplicadas y en las diferentes fuentes de fósforo, comparada con la capacidad encalante de la dolomita. Al ser más efectivo en el aumento de pH, permite una mayor disponibilidad de nutrientes y una mayor actividad microbiana.

Según Moody et al. (1995) y Rosolem et al. (1995), el flujo de N a través de procesos como la mineralización, la nitrificación y la inmovilización microbiana influye en la disponibilidad de N y, por lo tanto, cuando los suelos ácidos se encalan, la absorción de N puede aumentar a través del mejoramiento de la transformación del N del suelo y del crecimiento de la raíz y el brote. La tasa de nitrificación es más baja en suelos ácidos que en suelos neutros a calcáreos (Che et al., 2015), aunque las razones para esto aún no están claras. Según Haynes (1986), las bacterias (en su mayoría autótrofas) que llevan a cabo la nitrificación son sensibles al efecto del medio ambiente, donde el valor de pH del suelo representa uno de los factores limitantes y, en general, se considera que un pH bajo inhibe la actividad de los microbios nitrificantes. Esto conlleva a que se desacelere la nitrificación, debido a que la velocidad de oxidación de $\text{NH}_4\text{-N}$ es mayor que la oxidación de $\text{NO}_2\text{-N}$ (Smith et al., 1997), lo que ocasiona una acumulación de nitritos (Black, 1968). Un alto nivel de nitrógeno amoniacal en el suelo puede inhibir la actividad de *Nitrobacter*, con la consecuente acumulación de nitritos en el suelo (Burns et al., 1996), y, aunque en pequeñas cantidades, los nitritos pueden ocasionar toxicidad en la planta y en algunos microorganismos (Black, 1968; Shen et al., 2003). Los niveles más altos de Al soluble a menudo son concomitantes con un pH más bajo del suelo, y la mayoría de los microorganismos son muy sensibles al Al (Piña y Cervantes, 1996), mientras que los hongos son relativamente más tolerantes que las bacterias al Al y a los ácidos (Zhao et al., 2013, 2017). Zhao y Shen (2018), a partir de experimentos llevados a cabo por Rousk et al. (2010), Aciego Petri y Brookes (2008) y Hu et al. (2013), mencionan que el crecimiento microbiano se limitaba en un pH del suelo inferior a 5.4 cuando el Al se volvió soluble, pero estaba limitado por un bajo pH, en lugar de por la toxicidad de Al, a un pH que oscilaba entre 6.5 y 5.4. Estos análisis sugirieron que la inhibición de la nitrificación del suelo que transformó NH_4^+ en NO_3^- se debió al estrés ácido en lugar de a la toxicidad por Al, cuando el pH del suelo disminuyó de 6.5 a 5.4 (Zhao y Shen, 2018), y cuando el pH es menor de 5.4 es debido a la toxicidad por Al.

La exposición a Al_3^+ puede reducir la absorción de NO_3^- por las plantas (Jarvis y Hatch, 1986; Durieux et al., 1993; Calba y Jaillard, 1997; Watanabe et al., 1998; Jerzykiewicz, 2001; Pal'ove-Balang y Mistrík, 2007; Zhou et al., 2016). Si bien no se ha establecido el mecanismo exacto, el Al_3^+ soluble en el suelo puede interferir con la actividad de la H^+ -ATPasa de la membrana celular, lo que reduce la capacidad de la célula para bombear H^+ (Zhou et al., 2016). Esto reduciría en gran medida la capacidad de la célula para transportar NO_3^- a través de la membrana celular, ya que los co-transportadores de NO_3^- requieren 2 H^+ por NO_3^- transportado (Britto y Kronzucker, 2005). Por lo tanto, el resultado podría ser un cambio en la captación relativa de las formas de N mineral, hacia una mayor captación de NH_4^+ y una captación reducida de NO_3^- (Cumming, 1990).

Cuadro 21: Comparaciones de los promedios de extracción de N obtenidos entre las fuentes de fósforo y evaluadas en los diferentes materiales encalantes y dosis.

Encalante	Dosis m-eq /100 g suelo	Fuentes de fósforo			
		FDA	ST	FDA	ST
		Extracción N foliar (mg/maceta)		Extracción N radicular (mg/maceta)	
Dolomita	0	35.67 ^a	26.67 ^a	5.00 ^a	4.33 ^a
	3.1	49.33 ^a	20.00 ^b	4.67 ^a	2.33 ^a
	6.2	55.33 ^a	36.50 ^a	3.33 ^a	3.00 ^a
	12.4	32.67 ^a	29.33 ^a	7.33 ^a	6.33 ^a
Silicato de magnesio	0	30.00 ^a	24.67 ^a	7.67 ^a	3.67 ^b
	3.1	183.67 ^a	89.33 ^b	21.00 ^a	12.33 ^b
	6.2	317.00 ^a	315.00 ^a	45.00 ^a	27.50 ^b
	12.4	266.67 ^a	232.50 ^b	84.00 ^a	40.33 ^b

En el Cuadro 21 se presentan las comparaciones de la absorción de nitrógeno según la fuente de fósforo, en los diferentes niveles de material encalante y dosis. A nivel foliar, los promedios de absorción de N obtenidos presentaron diferencias estadísticas significativas entre las fuentes de fósforo al aplicar 3.1 m-eq/100 g de dolomita, y 3.1 y 6.2 m-eq/100 g de silicato de magnesio, siendo el FDA la fuente de fósforo con la cual se obtuvieron las mayores absorciones de nitrógeno. En la raíz, al aplicar dolomita en las dosis evaluadas, los promedios de absorción de N no presentaron diferencias estadísticas significativas entre las fuentes de fósforo. Sin embargo, al aplicar silicato de magnesio,

las extracciones de nitrógeno, para todas las dosis, resultaron ser estadísticamente diferentes y mayores al usar FDA como fuente de fósforo. Esto se puede observar con mayor amplitud en las Figuras 20 y 21.

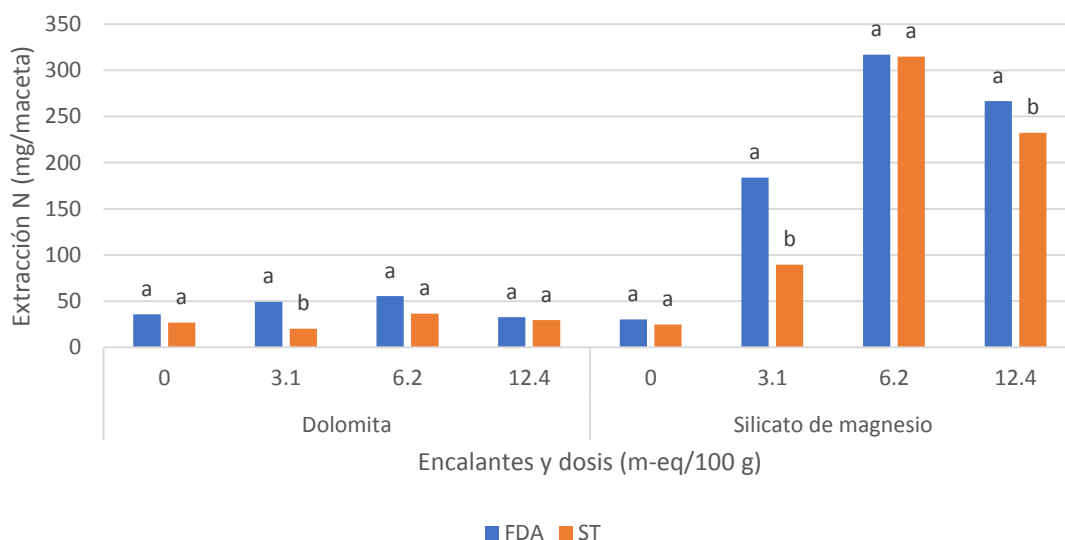


Figura 20: Efecto de las fuentes de fósforo en la extracción de nitrógeno foliar en los diferentes materiales encalantes y dosis.

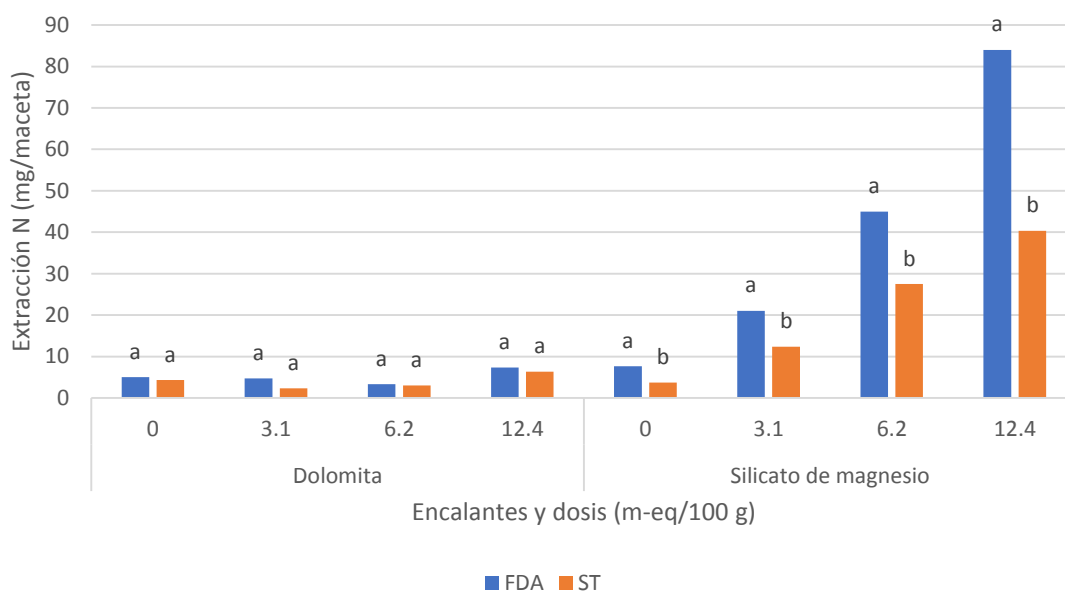


Figura 21: Efecto de las fuentes de fósforo en la extracción de nitrógeno radicular en los diferentes materiales encalantes y dosis.

Se observa además que con FDA, como se expuso anteriormente, se obtiene una mayor disponibilidad de fósforo, comparado con el ST, y por lo tanto, un mayor desarrollo a nivel energético y estructural, lo cual permite una mayor absorción de nitrógeno.

4.2.3. Fósforo

Los análisis de varianza para las variables de extracción de fósforo en hoja y raíz mostraron diferencias estadísticas significativas en la interacción Material encalante x Dosis x Fuente de fósforo (ANEXOS 22 y 23). Al ser significativa la interacción, se realizó el análisis de los efectos simples simples (ANEXOS 61 y 63).

Los promedios de extracción de P entre las dosis de material encalante, evaluadas en los diferentes niveles de material encalante y fuente de fósforo se observan en el Cuadro 22. Al aplicar dolomita, a nivel foliar, los promedios de absorción de P obtenidos entre las dosis no mostraron diferencias estadísticas significativas, sea junto con FDA o ST como fuente de fósforo. Sin embargo, a nivel radicular, los promedios de absorción de P sí presentaron diferencias estadísticas, aunque sin una tendencia clara respecto a las dosis aplicadas.

Cuadro 22: Comparaciones de los promedios de extracción de P obtenidos entre las dosis y evaluadas en los diferentes materiales encalantes y fuentes de fósforo.

Encalante	Dosis m-eq /100 g suelo	Fuente de fósforo			
		FDA	ST	FDA	ST
		Extracción P foliar (mg/maceta)		Extracción P radicular (mg/maceta)	
Dolomita	0	1.30 ^a	0.90 ^a	0.22 ^{bc}	0.27 ^a
	3.1	1.50 ^a	0.67 ^a	0.37 ^a	0.06 ^b
	6.2	1.93 ^a	0.97 ^a	0.12 ^c	0.09 ^b
	12.4	1.20 ^a	1.37 ^a	0.36 ^{ab}	0.32 ^a
Silicato de magnesio	0	1.10 ^d	0.87 ^d	0.35 ^d	0.23 ^d
	3.1	9.27 ^c	4.37 ^c	1.12 ^c	0.54 ^c
	6.2	15.95 ^b	14.80 ^b	3.01 ^b	1.41 ^b
	12.4	21.80 ^a	20.40 ^a	4.34 ^a	3.28 ^a

Al aplicar silicato de magnesio, se observa, tanto a nivel foliar como radicular, diferencias estadísticas significativas en los promedios de extracciones de P entre las dosis, para las diferentes combinaciones con FDA y ST. Existe una tendencia, como en otras variables, de aumentar las absorciones de fósforo a medida que crecen progresivamente las dosis de

material encalante, lo que se observa en mayor amplitud en las Figuras 22 y 23. Se observa que las mayores extracciones de fósforo se obtuvieron con la dosis 12.4 m-eq/100 g de silicato de magnesio, tanto para FDA como ST, en la parte foliar y radicular.

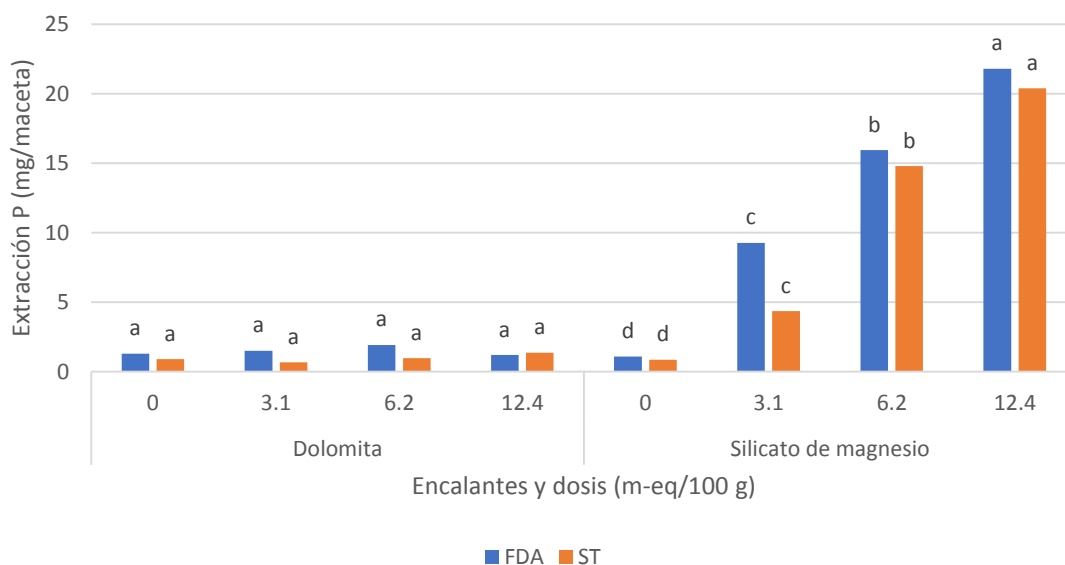


Figura 22: Efecto de las dosis de material encalante en la extracción de fósforo foliar en los diferentes materiales encalantes y fuentes de fósforo.

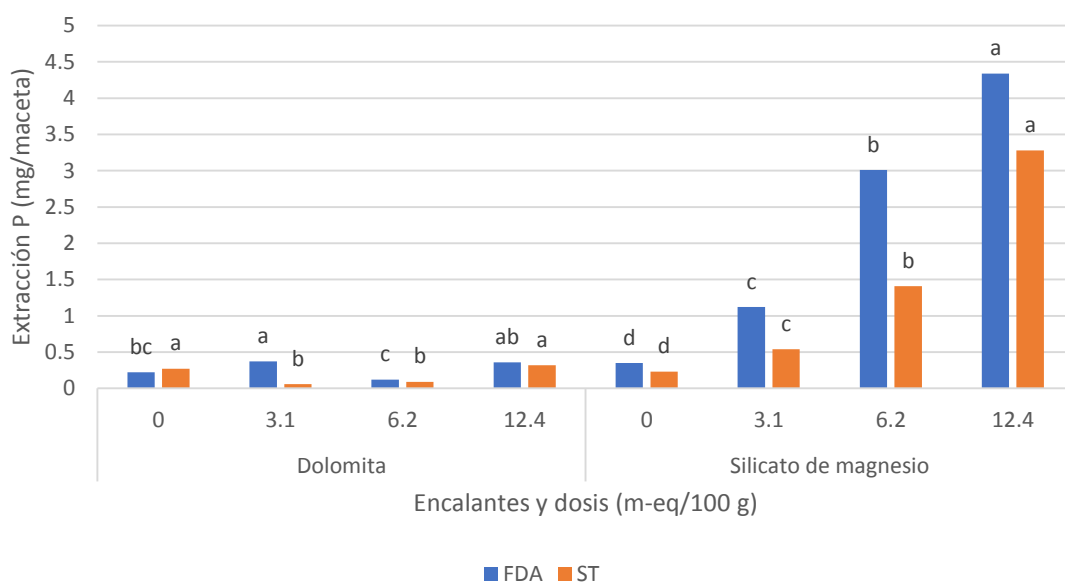


Figura 23: Efecto de las dosis de material encalante en la extracción de fósforo radicular en los diferentes materiales encalantes y fuentes de fósforo.

Cuadro 23: Comparaciones de los promedios de extracción de P obtenidos entre los materiales encalantes y evaluadas en las diferentes dosis y fuentes de fósforo.

Dosis m-eq /100 g suelo	Fuente de fósforo	Encalante			
		Dolomita	Silicato de magnesio	Dolomita	Silicato de magnesio
		Extracción P foliar (mg/maceta)		Extracción P radicular (mg/maceta)	
0	FDA	1.30 ^a	1.10 ^a	0.22 ^b	0.35 ^a
	ST	0.90 ^a	0.87 ^a	0.27 ^a	0.23 ^a
3.1	FDA	1.50 ^b	9.27 ^a	0.37 ^b	1.12 ^a
	ST	0.67 ^b	4.37 ^a	0.06 ^b	0.54 ^a
6.2	FDA	1.93 ^b	15.95 ^a	0.12 ^b	3.01 ^a
	ST	0.97 ^b	14.80 ^a	0.09 ^b	1.41 ^a
12.4	FDA	1.20 ^b	21.80 ^a	0.36 ^b	4.34 ^a
	ST	1.37 ^b	20.40 ^a	0.32 ^b	3.28 ^a

En el análisis comparativo de los promedios de extracción de P obtenidos entre los materiales encalantes, evaluados en los niveles de dosis y fuentes de fósforo (Cuadro 23), se observa que existen diferencias estadísticas significativas en los promedios de absorción de P entre los materiales encalantes. Tanto a nivel foliar como radicular, las mayores absorciones se obtuvieron al aplicar silicato de magnesio, donde, para todas las dosis a excepción de la dosis 0, resultaron ser mayores y estadísticamente diferentes a las extracciones obtenidas con dolomita. A nivel foliar, las absorciones obtenidas con silicato de magnesio representaron entre 5.52 y 17.17 veces más que lo obtenido con dolomita. A nivel radicular, la variación fue entre 8 y 11.06 veces más. Esto se puede observar con mayor amplitud en las Figuras 24 y 25.

Sánchez (1981) menciona que el uso del silicio disminuye la fijación de fósforo y aumenta la absorción de este elemento por los cultivos. Uno de los resultados que se obtienen al encalar suelos ácidos es la liberación de P de los óxidos de Al y Fe, los cuales son responsables de la fijación de P, para la absorción de la planta; este efecto se suele denominar "efecto de rebote de P" de la cal (Bolan et al., 2003; Fageria, 1989). Bolan et al. (2003) informaron que en suelos ricos en Al intercambiables y solubles, el encalado podría aumentar la absorción de P de la planta al disminuir el Al, en lugar de aumentar la disponibilidad de P en sí. Esto puede deberse a un mejor crecimiento de la raíz donde se

alivia la toxicidad de Al, lo que permite explorar un mayor volumen de suelo (Friesen et al., 1980). Mansell et al. (1984) y Edmeades y Perrott (2004) informaron que, en suelos ácidos de Nueva Zelanda, el beneficio primario del encalado se produce a través de un aumento en la disponibilidad de P al disminuir la adsorción de P y estimular la mineralización de P orgánico.

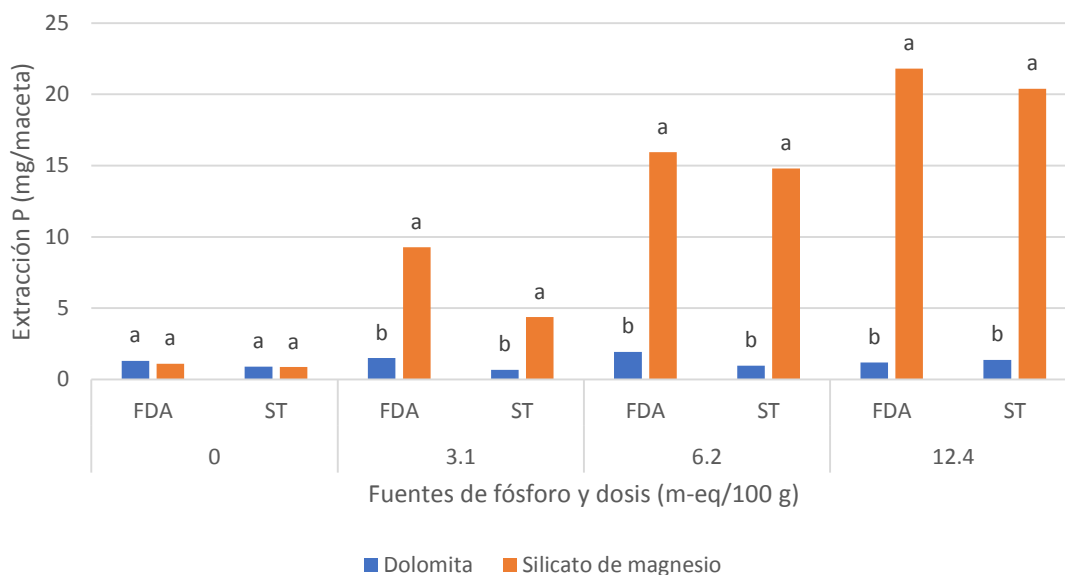


Figura 24: Efecto de los materiales encalantes en la extracción de fósforo foliar en las diferentes dosis y fuentes de fósforo.

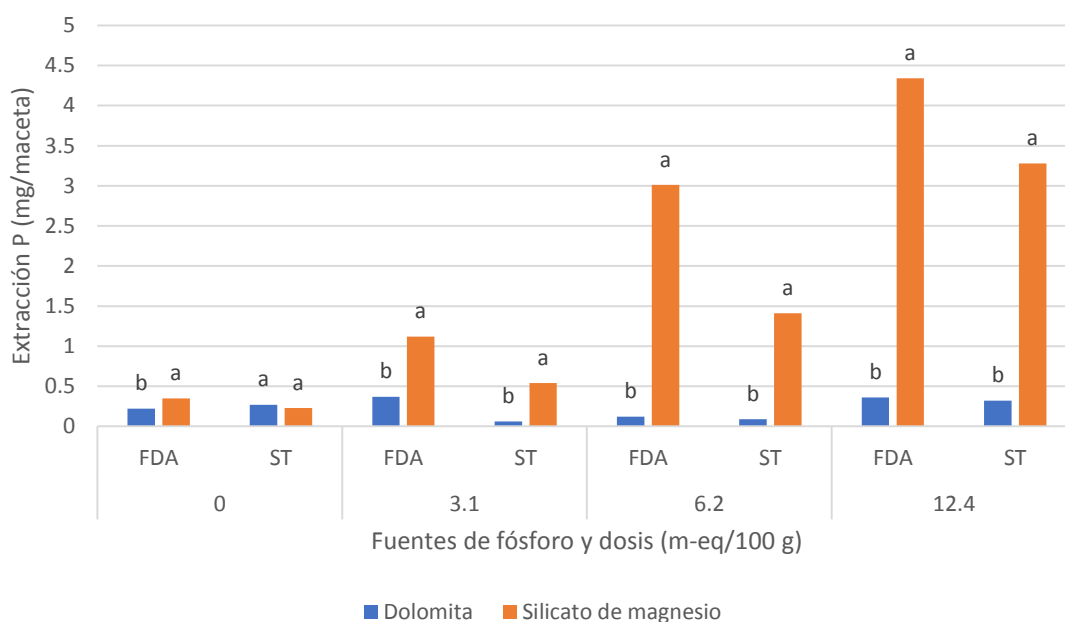


Figura 25: Efecto de los materiales encalantes en la extracción de fósforo radicular en las diferentes dosis y fuentes de fósforo.

Cuadro 24: Comparaciones de los promedios de extracción de P obtenidos entre las fuentes de fósforo y evaluadas en los diferentes materiales encalantes y dosis.

Encalante	Dosis m-eq /100 g suelo	Fuentes de fósforo			
		FDA	ST	FDA	ST
		Extracción P foliar (mg/maceta)		Extracción P radicular (mg/maceta)	
Dolomita	0	1.30 ^a	0.90 ^a	0.22 ^a	0.27 ^a
	3.1	1.50 ^a	0.67 ^a	0.37 ^a	0.06 ^b
	6.2	1.93 ^a	0.97 ^a	0.12 ^a	0.09 ^a
	12.4	1.20 ^a	1.37 ^a	0.36 ^a	0.32 ^a
Silicato de magnesio	0	1.10 ^a	0.87 ^a	0.35 ^a	0.23 ^a
	3.1	9.27 ^a	4.37 ^b	1.12 ^a	0.54 ^b
	6.2	15.95 ^a	14.80 ^b	3.01 ^a	1.41 ^b
	12.4	21.80 ^a	20.40 ^b	4.34 ^a	3.28 ^b

En las comparaciones realizadas de los promedios de extracción de P entre las fuentes de fósforo y en los niveles de material encalante y dosis (Cuadro 24), a nivel foliar, se observa que existen diferencias estadísticas significativas en los promedios de las absorciones de P, entre las fuentes de fósforo, al aplicar 3.1 y 6.2 m-eq/100 g de silicato de magnesio. En ambas dosis, la mayor absorción de fósforo se obtuvo al aplicar FDA.

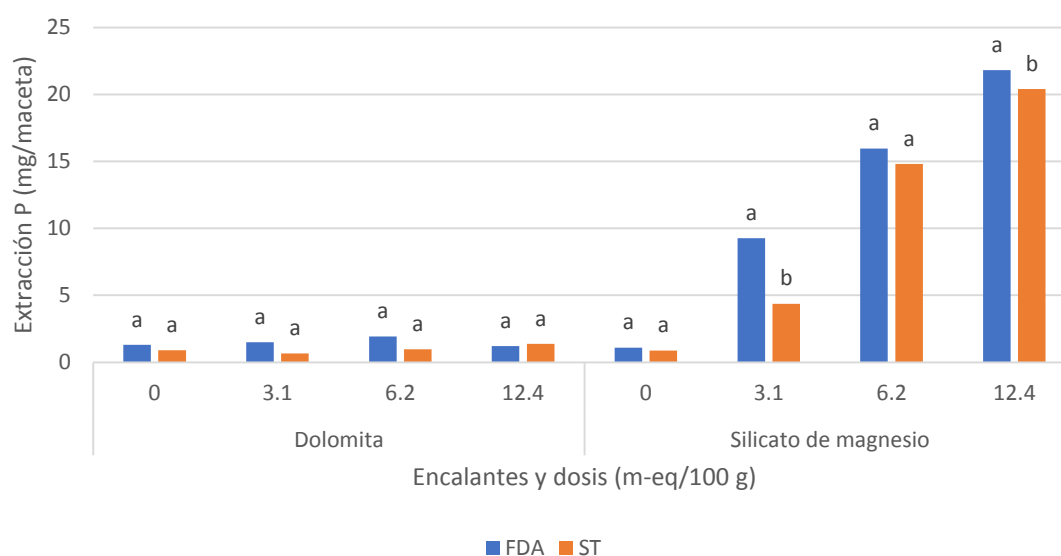


Figura 26: Efecto de las fuentes de fósforo en la extracción de fósforo foliar en los diferentes materiales encalantes y dosis.

En cuanto a la extracción de fósforo radicular, los promedios de extracción de P obtenidos con las dosis de 3.1 m-eq/100 g de dolomita y 3.1, 6.2 y 12.4 m-eq/100 g de silicato de magnesio resultaron ser estadísticamente diferentes, siendo los promedios de las extracciones obtenidas con FDA mayores respecto a las obtenidas con ST. Estas diferencias se pueden apreciar también en las Figuras 26 y 27.

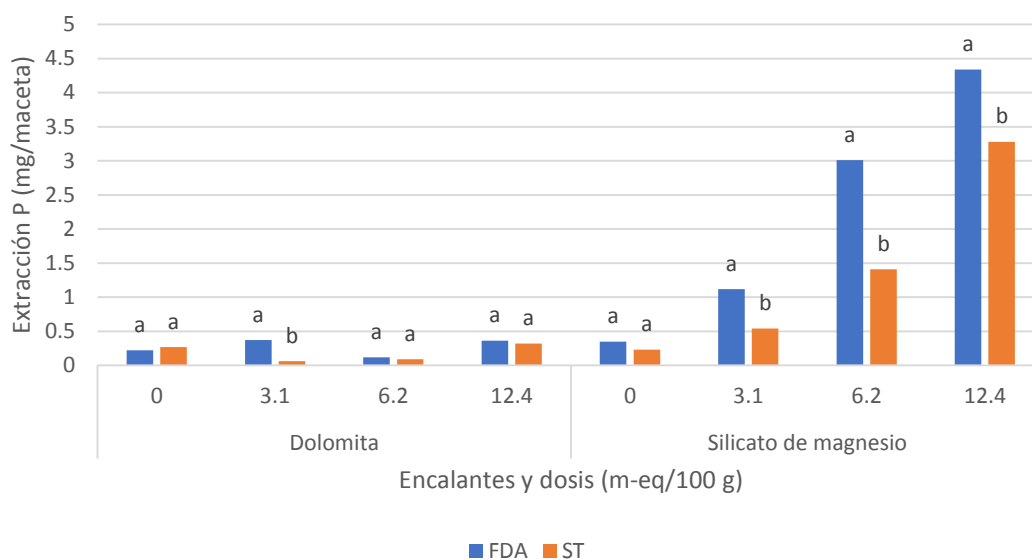


Figura 27: Efecto de las fuentes de fósforo en la extracción de fósforo radicular en los diferentes materiales encalantes y dosis.

4.2.4. Potasio

Los resultados obtenidos al evaluar la absorción de potasio, tanto de la parte aérea como radicular, fueron sometidos a la prueba de análisis de varianza (ANEXOS 27 y 28), que arrojó la existencia de diferencias estadísticas significativas para la interacción Material encalante x Dosis x Fuente de fósforo. Al ser significativa la interacción, se procedió a realizar el análisis de los efectos simples simples (ANEXOS 68 y 70).

En el Cuadro 25 se observa la comparación de los promedios obtenidos en la absorción de potasio foliar y radicular entre las dosis de material encalante y evaluadas en los niveles de material encalante y fuentes de fósforo. En el análisis foliar, los promedios de extracción de K presentaron diferencias estadísticas significativas en las diferentes dosis, salvo para las dosis de dolomita con ST. Los promedios de extracción de K obtenidos con las dosis de dolomita junto con FDA fueron estadísticamente diferentes, pero no mostraron una tendencia clara respecto a las dosis. La mayor absorción de K se obtuvo con la dosis de 3.1 m-eq/100 g de dolomita.

Cuadro 25: Comparaciones de los promedios de extracción de K obtenidos entre las dosis y evaluadas en los diferentes materiales encalantes y fuentes de fósforo.

Encalante	Dosis m-eq /100 g suelo	Fuente de fósforo			
		FDA	ST	FDA	ST
		Extracción K foliar (mg/maceta)		Extracción K radicular (mg/maceta)	
Dolomita	0	31.43 ^{bc}	21.73 ^a	0.78 ^{bc}	0.92 ^{ab}
	3.1	53.53 ^a	11.57 ^a	1.49 ^a	0.40 ^b
	6.2	50.53 ^{ab}	13.50 ^a	0.58 ^c	0.68 ^b
	12.4	28.73 ^c	21.07 ^a	1.16 ^{ab}	1.43 ^a
Silicato de magnesio	0	26.10 ^c	20.23 ^c	1.17 ^d	0.78 ^d
	3.1	145.10 ^b	40.75 ^c	4.75 ^c	1.98 ^c
	6.2	339.45 ^a	356.90 ^a	13.40 ^b	8.00 ^b
	12.4	331.0 ^a	290.83 ^b	21.20 ^a	11.37 ^a

Para el caso de silicato de magnesio, los promedios de extracción de K fueron estadísticamente diferentes entre las dosis aplicadas, tanto con FDA y ST. En ambos casos, la mayor extracción de K se presentó con la dosis de 6.2 m-eq/100 g. A nivel radicular, los promedios de absorción de K presentaron diferencias estadísticas significativas entre las dosis, tanto para dolomita y silicato de magnesio, con las diferentes combinaciones con FDA y ST. Para el caso del uso de dolomita como material encalante, se obtuvo la mayor absorción de K con la dosis de 3.1 m-eq/100 g, junto con FDA como fuente de fósforo, y con 12.4 m-eq/100 g al usar ST. No se presenta una tendencia clara en los promedios de absorción de K respecto a las dosis. Al usar silicato de magnesio, la mayor absorción de potasio se presentó con la dosis de 12.4 m-eq/100 g, sea junto con FDA o ST. En ambos casos sí se observa un aumento progresivo en las absorciones de K respecto a las dosis. Esto se observa en mayor amplitud en las Figuras 28 y 29.

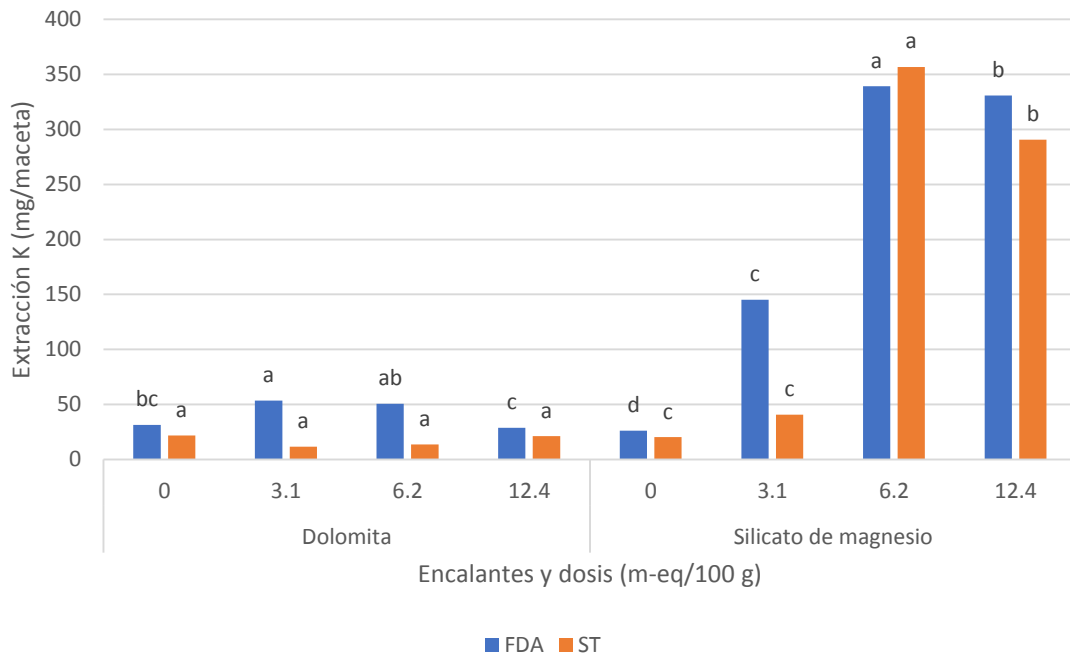


Figura 28: Efecto de las dosis de material encalante en la extracción de potasio foliar en los diferentes materiales encalantes y fuentes de fósforo.

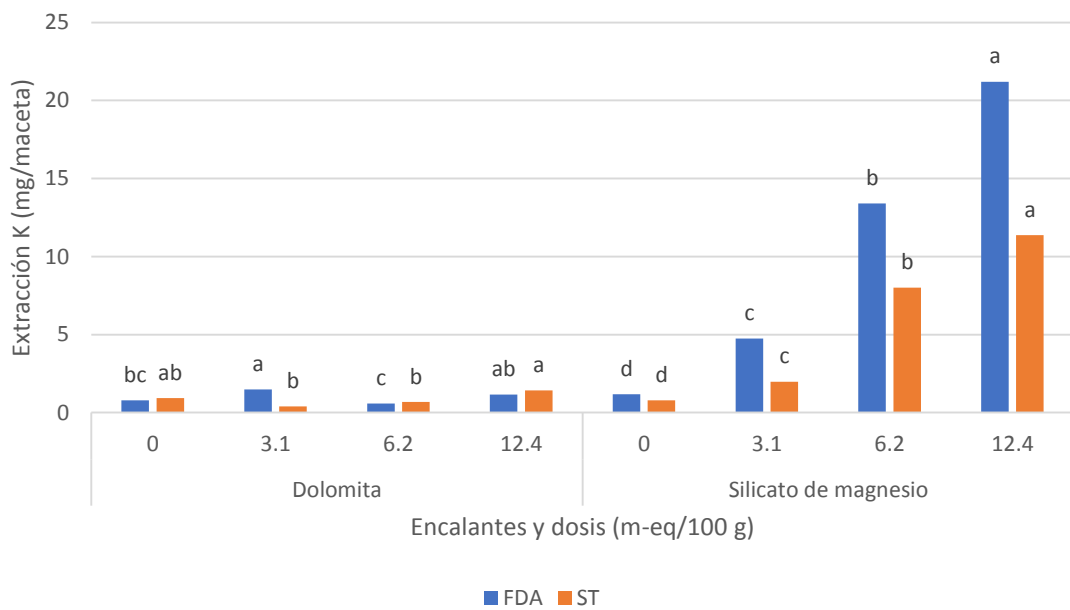


Figura 29: Efecto de las dosis de material encalante en la extracción de potasio radicular en los diferentes materiales encalantes y fuentes de fósforo.

Cuadro 26: Comparaciones de los promedios de extracción de K obtenidos entre los materiales encalantes y evaluadas en las diferentes dosis y fuentes de fósforo.

Dosis m-eq /100 g suelo	Fuente de fósforo	Encalante			
		Dolomita	Silicato de magnesio	Dolomita	Silicato de magnesio
		Extracción K foliar (mg/maceta)		Extracción K radicular (mg/maceta)	
0	FDA	31.43 ^a	26.10 ^a	0.78 ^a	1.17 ^a
	ST	21.73 ^a	20.23 ^a	0.92 ^a	0.78 ^a
3.1	FDA	53.53 ^b	145.10 ^a	1.49 ^b	4.75 ^a
	ST	11.57 ^b	40.75 ^a	0.40 ^b	1.98 ^a
6.2	FDA	50.53 ^b	339.45 ^a	0.58 ^b	13.40 ^a
	ST	13.50 ^b	356.90 ^a	0.68 ^b	8.00 ^a
12.4	FDA	28.73 ^b	331.00 ^a	1.16 ^b	21.20 ^a
	ST	21.07 ^b	290.83 ^a	1.43 ^b	11.37 ^a

En el Cuadro 26 se observan los promedios de absorción de K obtenidos entre los materiales encalantes y evaluados en las diferentes dosis y fuentes de fósforo. Tanto a nivel foliar como radicular, se observa que, a excepción de la dosis 0, existen diferencias estadísticas significativas entre los niveles de material encalante, encontrándose los mayores promedios de absorción de K al aplicar silicato de magnesio como fuente encalante. A nivel foliar, la diferencia entre los promedios de absorción de K obtenidos con silicato de magnesio y dolomita variaron entre 2.52 y 25.37 veces más. A nivel radicular, el rango fue de entre 3.95 y 17.28 veces más. Dichas diferencias se pueden observar mejor en las Figuras 30 y 31.

El encalado, junto con el manejo integrado de nutrientes, a menudo se recomienda para aumentar la fitodisponibilidad de nutrientes esenciales y superar las otras restricciones de fertilidad inducidas por la acidez en los suelos (Haynes, 1984; Manoj-Kumar et al., 2012). Según Chimdi et al. (2012), el aumento en el pH del suelo debido a la aplicación de encalantes también es responsable del aumento en el contenido de K en el suelo, esto debido a que a medida que el pH es menor, la disponibilidad de nutrientes, como el P y K, disminuye. A menudo, en las regiones tropicales, el exceso de lluvia elimina cantidades apreciables de iones básicos intercambiables como calcio (Ca), magnesio (Mg), sodio (Na) y potasio (K) de la superficie del suelo. Su gravedad es extremadamente

variable debido a los efectos de los materiales parentales, la forma de la tierra, la vegetación y el patrón climático (Rowell, 1994).

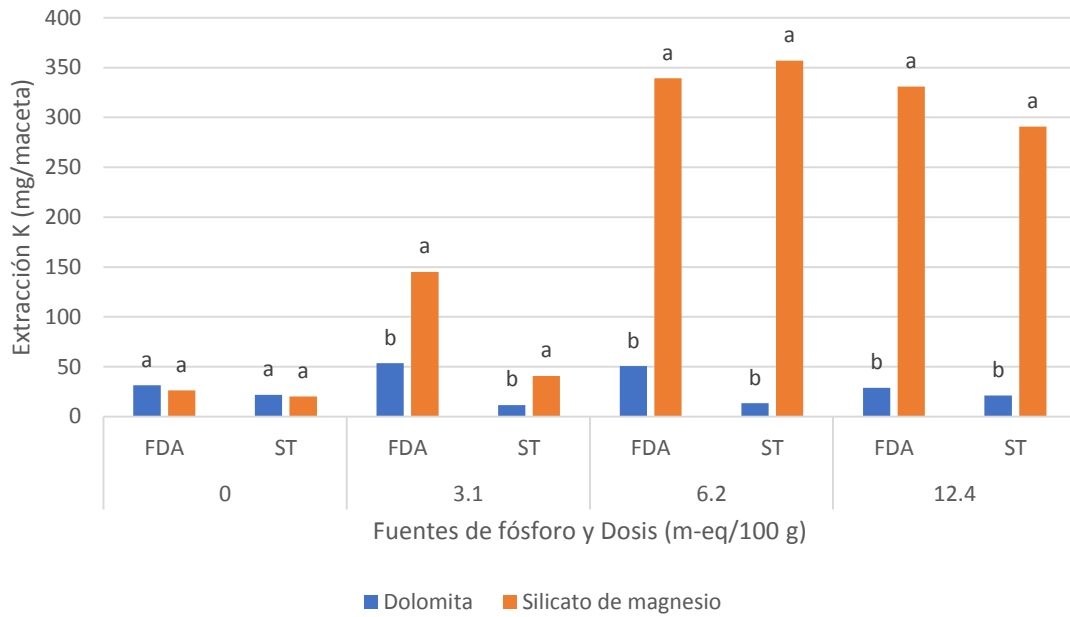


Figura 30: Efecto de los materiales encalantes en la extracción de potasio foliar en las diferentes dosis y fuentes de fósforo.

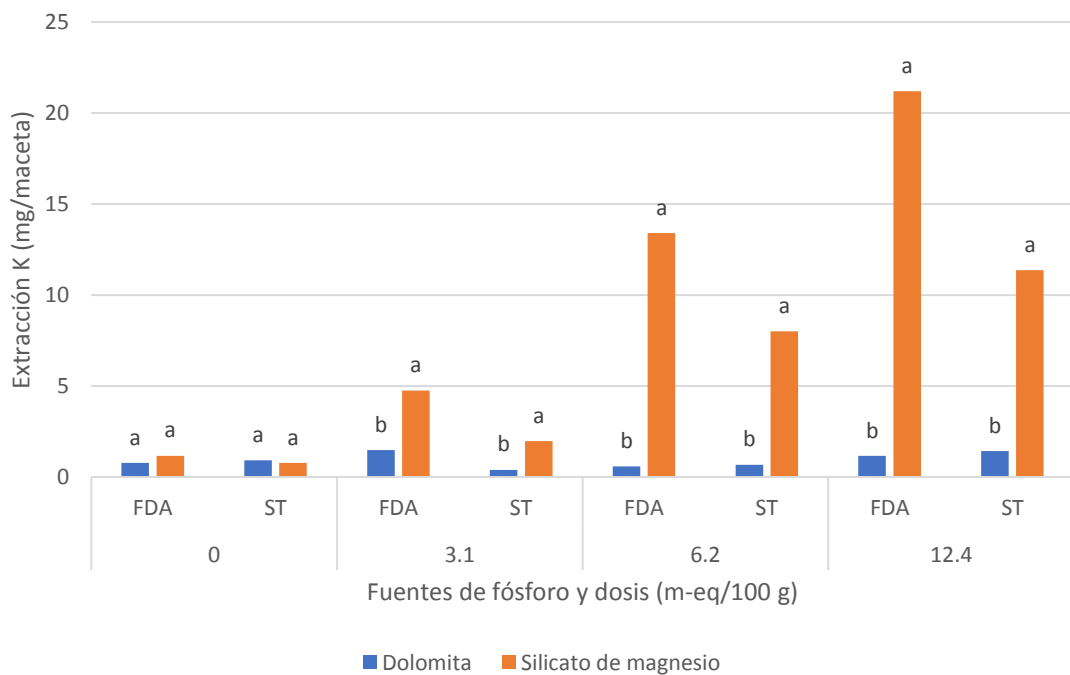


Figura 31: Efecto de los materiales encalantes en la extracción de potasio radicular en las diferentes dosis y fuentes de fósforo.

En un estudio llevado a cabo por Dinkecha y Tsegaye (2017), se obtuvo un aumento en la concentración de sodio intercambiable de 0.12 a 10.6 ppm, y de potasio intercambiable, de 5.67 a 14.58 ppm, para antes y después del encalado, lo que produce una diferencia significativa que indica que la acidez del suelo afecta la disponibilidad de sodio y potasio, debido a la insolubilidad del Na⁺ y K⁺ a pH bajo, además que ambos cationes se lixivian fácilmente por la lluvia alta y se reemplazan por H⁺ soluble y Al³⁺ en solución acuosa.

Cuadro 27: Comparaciones de los promedios de extracción de K obtenidos entre las fuentes de fósforo y evaluadas en los diferentes materiales encalantes y dosis.

Encalante	Dosis m-eq /100 g suelo	Fuentes de fósforo			
		FDA	ST	FDA	ST
		Extracción K foliar (mg/maceta)		Extracción K radicular (mg/maceta)	
Dolomita	0	31.43 ^a	21.73 ^a	0.78 ^a	0.92 ^a
	3.1	53.53 ^a	11.57 ^b	1.49 ^a	0.40 ^b
	6.2	50.53 ^a	13.50 ^b	0.58 ^a	0.68 ^a
	12.4	28.73 ^a	21.07 ^a	1.16 ^a	1.43 ^a
Silicato de magnesio	0	26.10 ^a	20.23 ^a	1.17 ^a	0.78 ^a
	3.1	145.10 ^a	40.75 ^b	4.75 ^a	1.98 ^b
	6.2	339.45 ^a	356.90 ^a	13.40 ^a	8.00 ^b
	12.4	331.0 ^a	290.83 ^b	21.20 ^a	11.37 ^b

En el Cuadro 27 se observan los promedios de absorción de K obtenidos entre las fuentes de fósforo y evaluados en los diferentes materiales encalantes y dosis. Se observan diferencias estadísticas significativas en los promedios de absorción de K entre las fuentes de fósforo en el tratamiento de 3.1 y 6.2 m-eq/100 g de dolomita y 3.1 y 12.4 m-eq/100 g de silicato de magnesio. En dichos tratamientos las mayores absorciones de K se obtuvieron al aplicar FDA como fuente de fósforo. A nivel radicular, los promedios de absorción de K obtenidos en los tratamientos de 3.1 m-eq/100 g de dolomita y 3.1, 6.2 y 12.4 m-eq/100 g de silicato de magnesio fueron mayores, y estadísticamente diferentes, al usar FDA. Gráficamente, las diferencias de los promedios de absorción de K entre las diferentes fuentes de fósforo se pueden apreciar en las Figuras 32 y 33.

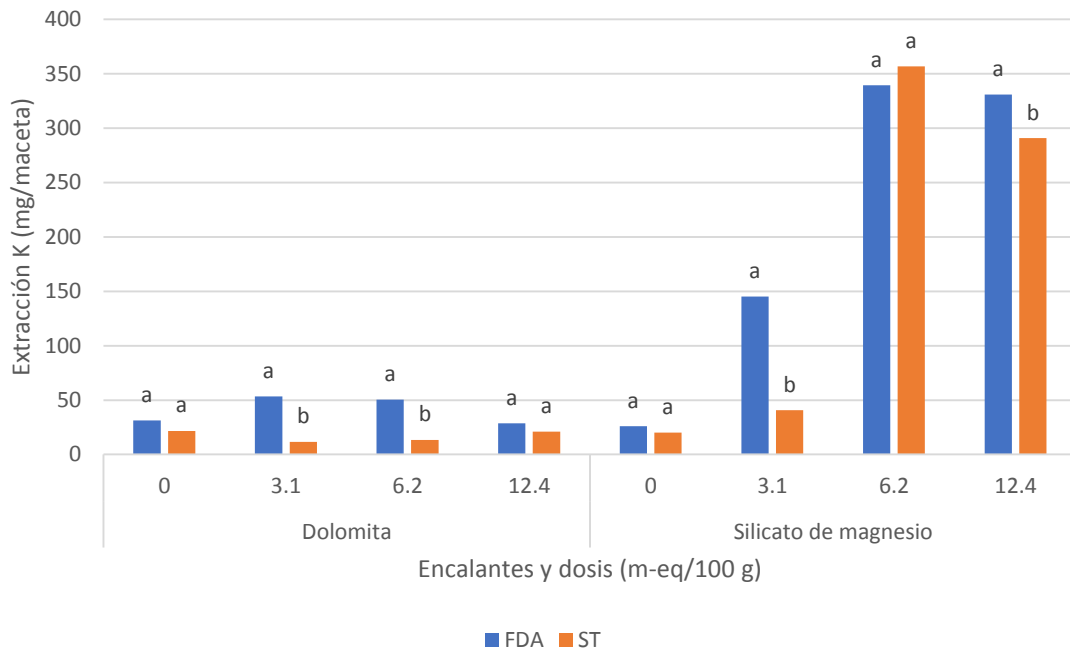


Figura 32: Efecto de las fuentes de fósforo en la extracción de potasio foliar en los diferentes materiales encalantes y dosis.

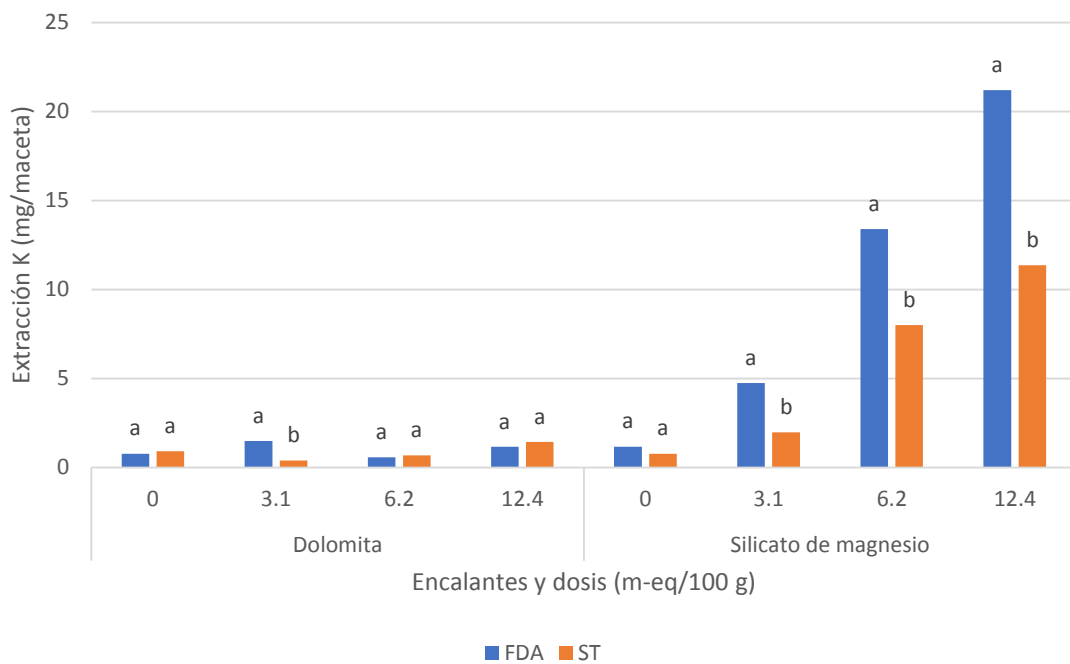


Figura 33: Efecto de las fuentes de fósforo en la extracción de potasio radicular en los diferentes materiales encalantes y dosis.

4.2.5. Magnesio

Los resultados obtenidos al evaluar la absorción de magnesio (hojas y raíces) fueron sometidos a la prueba de análisis de varianza, que arrojó la existencia de diferencias estadísticas significativas para la interacción Material encalante x Dosis x Fuente de fósforo (ANEXOS 32 y 33). Al existir diferencias significativas en la interacción de segundo orden, se procedió a realizar el análisis de los efectos simples simples.

En el Cuadro 28 se presenta la comparación de los promedios obtenidos en la absorción de magnesio foliar y radicular entre las dosis de material encalante y evaluados en los niveles de material encalante y fuentes de fósforo. A nivel foliar, los promedios de absorción de Mg fueron estadísticamente similares entre las dosis de dolomita junto con ST. Sin embargo, al usar FDA como fuente de fósforo, los promedios de absorción fueron estadísticamente diferentes, obteniéndose la mayor absorción de Mg con la dosis de 3.1 m-eq/100 g. No se observa una tendencia clara en la absorción de Mg respecto al aumento progresivo de las dosis de dolomita. En la raíz, tanto para FDA como ST, los promedios de absorción de Mg obtenidos a diferentes dosis fueron estadísticamente diferentes, obteniéndose la mayor absorción de Mg con las dosis de 12.4 y 3.1 m-eq/100 g de dolomita con FDA, y 12.4 m-eq/100 g con ST.

Cuadro 28: Comparaciones de los promedios de extracción de Mg obtenidos entre las dosis y evaluadas en los diferentes materiales encalantes y fuentes de fósforo.

Encalante	Dosis m-eq /100 g suelo	Fuente de fósforo			
		FDA	ST	FDA	ST
		Extracción Mg foliar (mg/maceta)		Extracción Mg radicular (mg/maceta)	
Dolomita	0	5.07 ^b	4.33 ^a	0.27 ^b	0.34 ^b
	3.1	10.07 ^a	4.16 ^a	0.49 ^a	0.15 ^b
	6.2	8.57 ^{ab}	4.83 ^a	0.18 ^b	0.32 ^b
	12.4	8.43 ^{ab}	6.13 ^a	0.53 ^a	0.58 ^a
Silicato de magnesio	0	4.26 ^d	4.03 ^d	0.43 ^d	0.29 ^d
	3.1	32.40 ^c	21.97 ^c	1.61 ^c	0.93 ^c
	6.2	77.07 ^b	83.55 ^a	4.44 ^b	2.84 ^b
	12.4	121.57 ^a	71.00 ^b	7.27 ^a	4.96 ^a

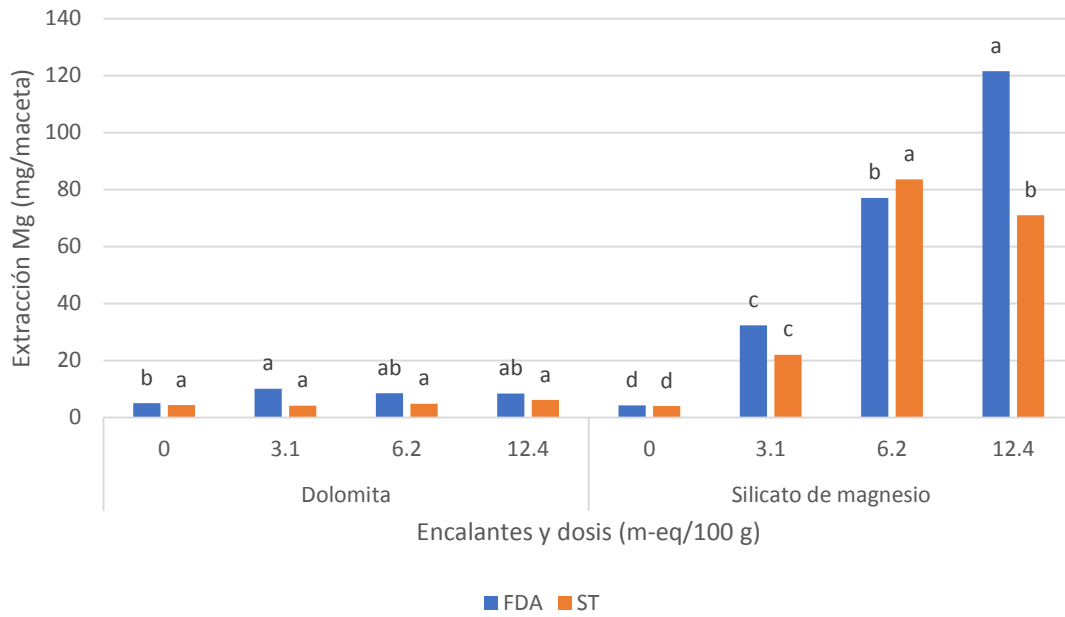


Figura 34: Efecto de las dosis de material encalante en la extracción de magnesio foliar en los diferentes materiales encalantes y fuentes de fósforo.

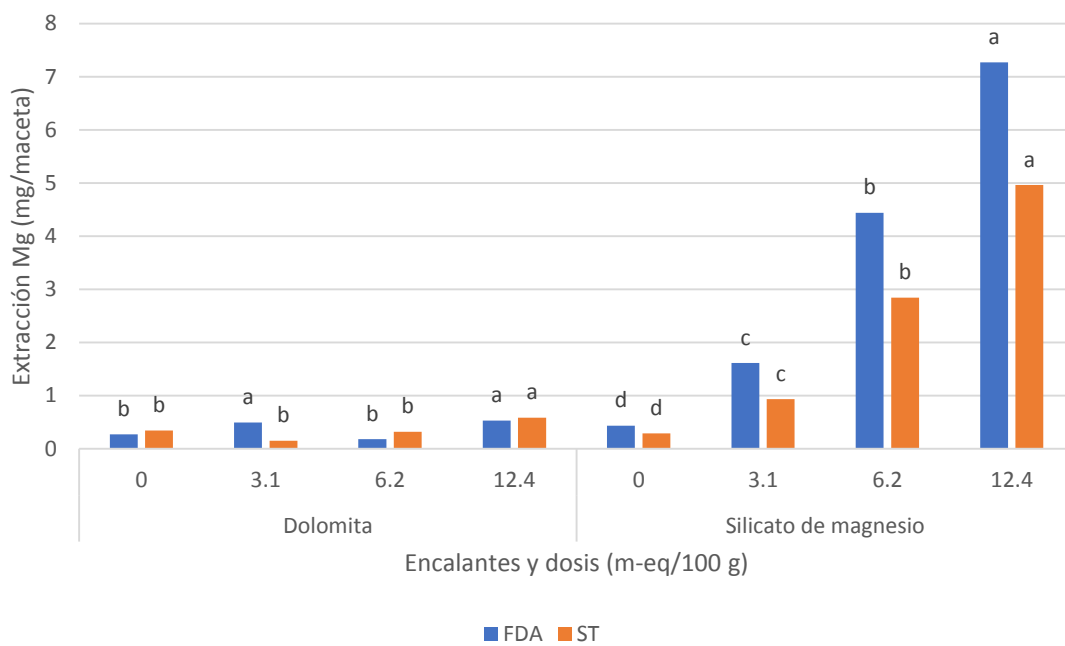


Figura 35: Efecto de las dosis de material encalante en la extracción de magnesio radicular en los diferentes materiales encalantes y fuentes de fósforo.

Al usar silicato de magnesio como fuente encalante, los promedios de absorción de Mg obtenidos en las diferentes dosis fueron estadísticamente diferentes, sea junto a FDA como ST. Los mayores promedios se obtuvieron con la dosis de 12.4 m-eq/100 g, a excepción de la interacción con ST, cuyo promedio más alto se obtuvo con la dosis de 6.2 m-eq/100 g. Al usar silicato de magnesio como fuente encalante se observa una tendencia marcada de aumentar las absorciones de magnesio a medida que aumentan las dosis de material encalante. Dicha tendencia se puede observar gráficamente en las Figuras 34 y 35.

Cuadro 29: Comparaciones de los promedios de extracción de Mg obtenidos entre los materiales encalantes y evaluadas en las diferentes dosis y fuentes de fósforo.

Dosis m-eq /100 g suelo	Fuente de fósforo	Encalante			
		Dolomita	Silicato de magnesio	Dolomita	Silicato de magnesio
		Extracción Mg foliar (mg/maceta)		Extracción Mg radicular (mg/maceta)	
0	FDA	5.07 ^a	4.26 ^a	0.27 ^a	0.43 ^a
	ST	4.33 ^a	4.03 ^a	0.34 ^a	0.29 ^a
3.1	FDA	10.07 ^b	32.40 ^a	0.49 ^b	1.61 ^a
	ST	4.16 ^b	21.97 ^a	0.15 ^b	0.93 ^a
6.2	FDA	8.57 ^b	77.07 ^a	0.18 ^b	4.44 ^a
	ST	4.83 ^b	83.55 ^a	0.32 ^b	2.84 ^a
12.4	FDA	8.43 ^b	121.57 ^a	0.53 ^b	7.27 ^a
	ST	6.13 ^b	71.00 ^a	0.58 ^b	4.96 ^a

En la comparación de los promedios de la extracción de Mg entre los materiales encalantes y evaluados en los niveles de dosis y fuentes de fósforo (Cuadro 29) se observan diferencias estadísticas significativas en los promedios de absorción de Mg entre los materiales encalantes, obteniéndose mayores absorciones al usar silicato de magnesio. Esto sucede tanto a nivel foliar como radicular, a excepción de la dosis 0. Los aumentos en la absorción de Mg representaron entre 8.28 a 13.42 veces más lo obtenido con silicato de magnesio comparado con la dolomita, a nivel foliar. Así mismo, en la raíz, los aumentos variaron entre 5.2 y 12.72 veces más. Dichas diferencias se pueden observar gráficamente en las Figuras 36 y 37.

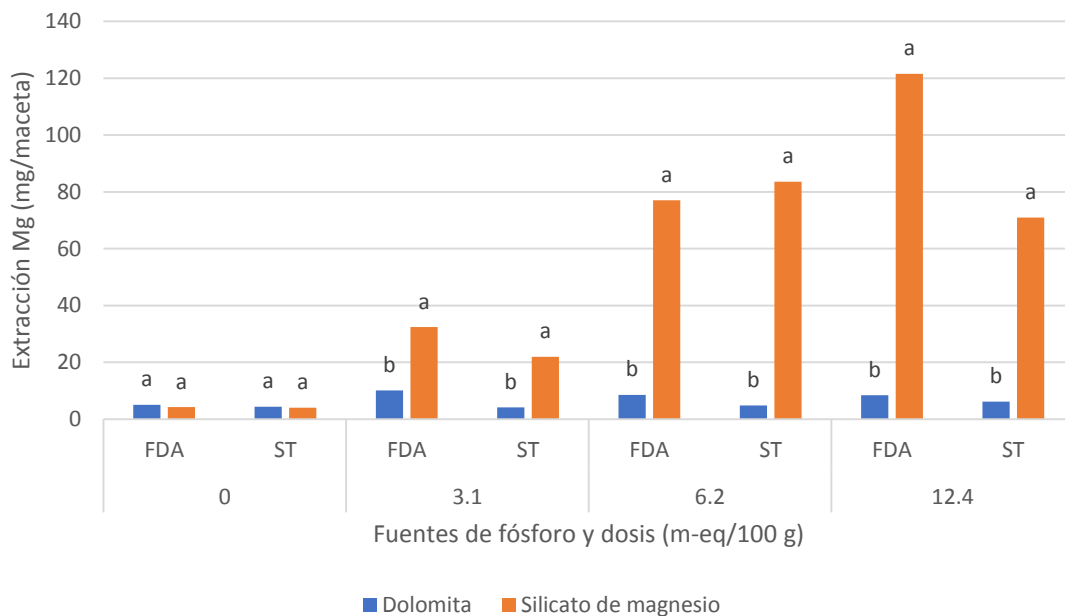


Figura 36: Efecto de los materiales encalantes en la extracción de magnesio foliar en las diferentes dosis y fuentes de fósforo.

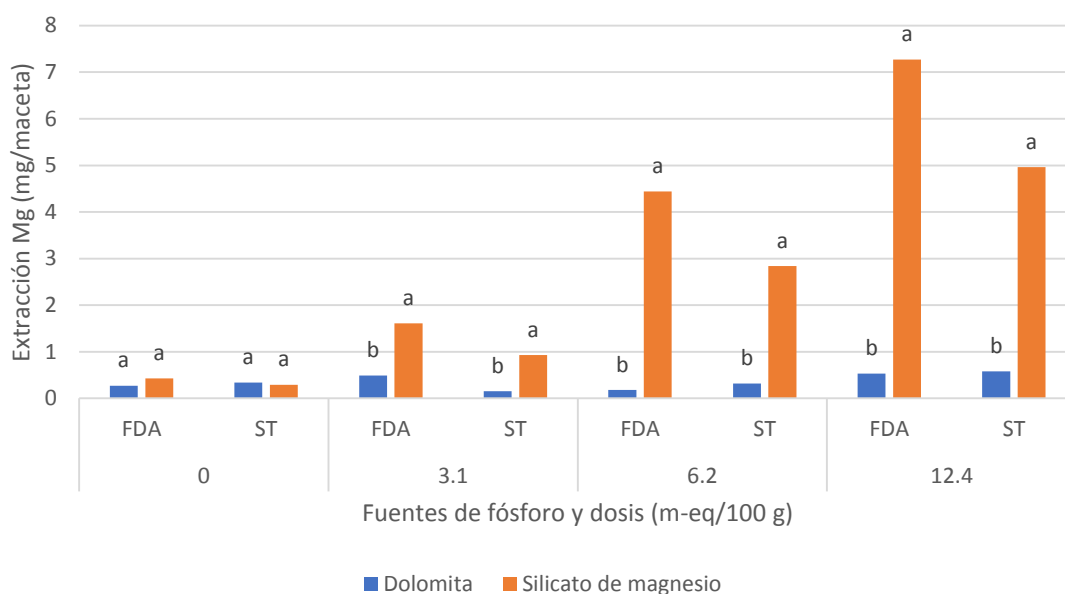


Figura 37: Efecto de los materiales encalantes en la extracción de magnesio radicular en las diferentes dosis y fuentes de fósforo.

Si bien es cierto, tanto la dolomita como el silicato de magnesio aportan magnesio, mayores absorciones, tanto en la parte radicular como aérea, se obtuvieron al aplicar silicato de magnesio, debido a su efecto en la disminución de la toxicidad por aluminio, lo que permitió un mejor desarrollo de la parte radicular. Lo expuesto coincide con Marschner (1995), Clark (1984), Fageria y Stone (2004) y Fageria y Baligar (2008)

quienes mencionan que la mejora del crecimiento de las plantas en suelos ácidos no se debe a la adición de cationes básicos (Ca, Mg), sino debido a que el aumento del pH reduce la toxicidad de los niveles fitotóxicos de Al y Mn.

Cuadro 30: Comparaciones de los promedios de extracción de Mg obtenidos entre las fuentes de fósforo y evaluadas en los diferentes materiales encalantes y dosis.

Encalante	Dosis m-eq /100 g suelo	Fuentes de fósforo			
		FDA		ST	
		Extracción Mg foliar (mg/maceta)		Extracción Mg radicular (mg/maceta)	
Dolomita	0	5.07 ^a	4.33 ^a	0.27 ^a	0.34 ^a
	3.1	10.07 ^a	4.16 ^b	0.49 ^a	0.15 ^b
	6.2	8.57 ^a	4.83 ^a	0.18 ^a	0.32 ^a
	12.4	8.43 ^a	6.13 ^a	0.53 ^a	0.58 ^a
Silicato de magnesio	0	4.26 ^a	4.03 ^a	0.43 ^a	0.29 ^a
	3.1	32.40 ^a	21.97 ^b	1.61 ^a	0.93 ^b
	6.2	77.07 ^b	83.55 ^a	4.44 ^a	2.84 ^b
	12.4	121.57 ^a	71.00 ^b	7.27 ^a	4.96 ^b

En el Cuadro 30 se presentan los promedios de absorción de Mg obtenidos entre las diferentes fuentes de fósforo y evaluados en los niveles de material encalante y dosis. A nivel radicular se observa que los promedios de absorción de Mg fueron estadísticamente diferentes entre las fuentes de fósforo para las dosis de 3.1 m-eq/100 g de dolomita y 3.1, 6.2 y 12.4 m-eq/100 g de silicato de magnesio. A excepción de la dosis de 6.2 m-eq/100 g de silicato de magnesio, en los tratamientos mencionados, la mayor absorción de Mg se presentó al aplicar FDA como fuente de fósforo. A nivel radicular, se presentaron diferencias significativas en los promedios de absorciones de Mg en los mismos tratamientos mencionados a nivel foliar, con la diferencia que los mayores promedios de absorción se obtuvieron al usar FDA como fuente de fósforo en todos los tratamientos. Las Figuras 38 y 39 grafican las diferencias a nivel de fuente de fósforo.

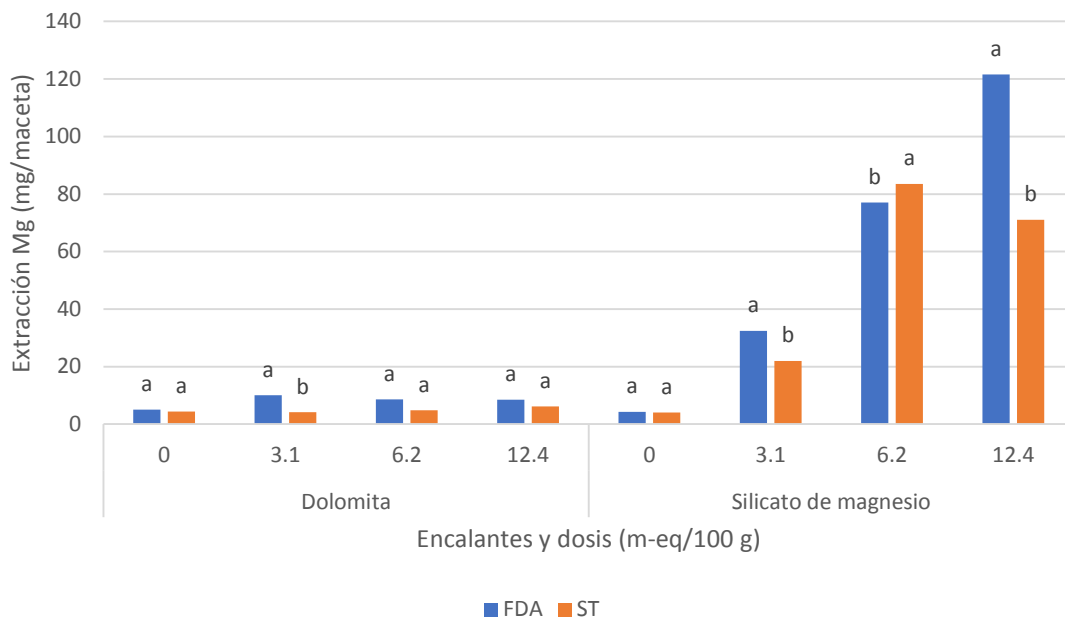


Figura 38: Efecto de las fuentes de fósforo en la extracción de magnesio foliar en los diferentes materiales encalantes y dosis.

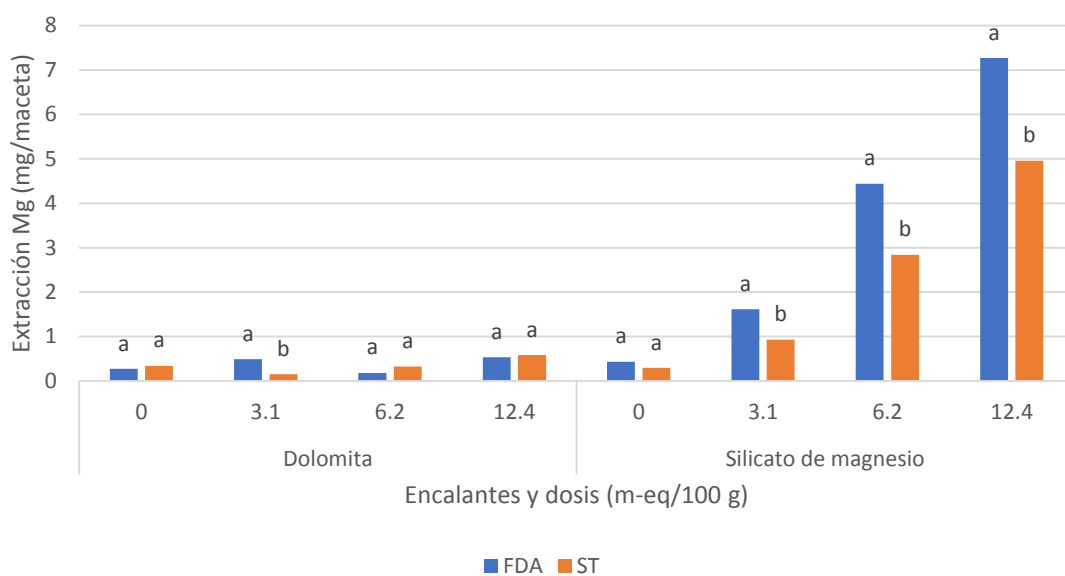


Figura 39: Efecto de las fuentes de fósforo en la extracción de magnesio radicular en los diferentes materiales encalantes y dosis.

4.2.6. Calcio

A partir del análisis de varianza para la variable absorción de calcio (ANEXOS 37 y 38), se observa que las interacciones Encalante x Dosis y Dosis x Fuente de fósforo resultaron significativas, a nivel foliar, y la interacción Material encalante x Dosis x Fuente de fósforo a nivel radicular. Debido a ello, se procedió a realizar el análisis de efectos simples para la absorción de Ca foliar (ANEXO 81) y el análisis de efectos simples para la absorción de Ca radicular (ANEXO 83).

Cuadro 31: Comparación de los promedios de extracción de Ca foliar obtenidos entre las dosis y evaluadas en los diferentes materiales encalantes.

Encalante	Dosis m-eq /100 g suelo	Extracción Ca foliar (mg/maceta)
Dolomita	0	18.15 ^a
	3.1	21.08 ^a
	6.2	19.82 ^a
	12.4	19.33 ^a
Silicato de magnesio	0	15.88 ^d
	3.1	44.83 ^c
	6.2	112.95 ^a
	12.4	102.88 ^b

Al realizar la comparación de los promedios de extracción de Ca entre las dosis y evaluados en los niveles de material encalante (Cuadro 31), se observa que los promedios de absorción de Ca entre las diferentes dosis de dolomita fueron estadísticamente similares. Con el silicato de magnesio, en cambio, si se presentaron diferencias estadísticas significativas entre las dosis, obteniéndose la mayor absorción de Ca con la dosis de 6.2 m-eq/100 g. Al evaluar las diferencias de los promedios de absorción obtenidos entre los diferentes materiales encalantes y comparados a nivel de dosis (Cuadro 32), se observa que, en todas las dosis (a excepción de la dosis 0), la mayor absorción de Ca se obtuvo con el silicato de magnesio, en comparación con la dolomita.

Cuadro 32: Comparación de los promedios de extracción de Ca foliar obtenidos entre los materiales encalantes y evaluadas en las diferentes dosis.

Encalante	Dosis m-eq /100 g suelo			
	Extracción Ca foliar (mg/maceta)			
	0	3.1	6.2	12.4
Dolomita	18.15 ^a	21.08 ^b	19.82 ^b	19.33 ^b
Silicato de magnesio	15.88 ^a	44.83 ^a	112.95 ^a	102.88 ^a

Al comparar los promedios de absorción de Ca obtenidos a diferentes dosis de material encalante y evaluados en las fuentes de fósforo (Cuadro 33), se observa que existen diferencias significativas entre los mismos, tanto con FDA como ST. Las mayores absorciones de Ca, para ambos casos, se obtuvieron con las dosis 6.2 y 12.4 m-eq/100 g. Los promedios obtenidos para ambas dosis fueron estadísticamente similares. A medida que se aumentan las dosis, las absorciones de Ca también aumentan. En la comparación de los promedios de absorción de Ca entre las diferentes fuentes de fósforo en las dosis, se observa que las mayores absorciones se obtuvieron la usar FDA como fuente de fósforo (Cuadro 34).

Cuadro 33: Comparación de los promedios de extracción de Ca foliar obtenidos entre las dosis y evaluadas en las diferentes fuentes de fósforo.

Dosis (m-eq /100 g suelo)	Fuente de fósforo	
	FDA	ST
	Extracción Ca foliar (mg/maceta)	
0	16.62 ^c	17.42 ^b
3.1	39.64 ^b	21.52 ^b
6.2	70.00 ^a	62.77 ^a
12.4	68.10 ^a	54.12 ^a

Cuadro 34: Comparación de los promedios de extracción de Ca foliar obtenidos entre las fuentes de fósforo y evaluadas en las diferentes dosis.

Fuente de fósforo	Extracción Ca (mg/maceta)			
	Dosis m-eq /100 g suelo			
	0	3.1	6.2	12.4
FDA	16.62 ^a	39.64 ^a	70.00 ^a	68.10 ^a
ST	17.42 ^a	21.52 ^b	62.77 ^b	54.12 ^b

En el Cuadro 35 se presentan las absorciones de calcio en la raíz, siendo comparadas entre las diferentes dosis y evaluadas en los niveles de material encalante y fuente de fósforo. Al aplicar dolomita, tanto en FDA como en ST, los promedios de absorción de Ca obtenidos fueron estadísticamente diferentes. Las mayores absorciones se obtuvieron con la dosis de 3.1 y 12.4 m-eq/100 g para FDA, y de 12.4 m-eq/100 g para ST. Para el caso del silicato de magnesio, los promedios de absorción de Ca fueron estadísticamente diferentes, tanto para FDA como ST, y la mayor absorción se obtuvo con la dosis de 12.4 m-eq/100 g. Existe una tendencia creciente en las absorciones de Ca a medida que aumentan las dosis de silicato de magnesio. Esto se comprueba con la Figura 40.

Cuadro 35: Comparaciones de los promedios de extracción de Ca radicular obtenidos entre las dosis y evaluadas en los diferentes materiales encalantes y fuentes de fósforo.

Encalante	Dosis m-eq /100 g suelo	Fuente de fósforo	
		FDA	ST
		Extracción Ca (mg/maceta)	
Dolomita	0	0.69 ^b	0.75 ^b
	3.1	1.58 ^a	0.45 ^b
	6.2	0.95 ^b	0.83 ^b
	12.4	1.54 ^a	1.44 ^a
Silicato de magnesio	0	1.09 ^d	0.63 ^d
	3.1	5.18 ^c	2.50 ^c
	6.2	14.25 ^b	9.21 ^b
	12.4	14.85 ^a	10.33 ^a

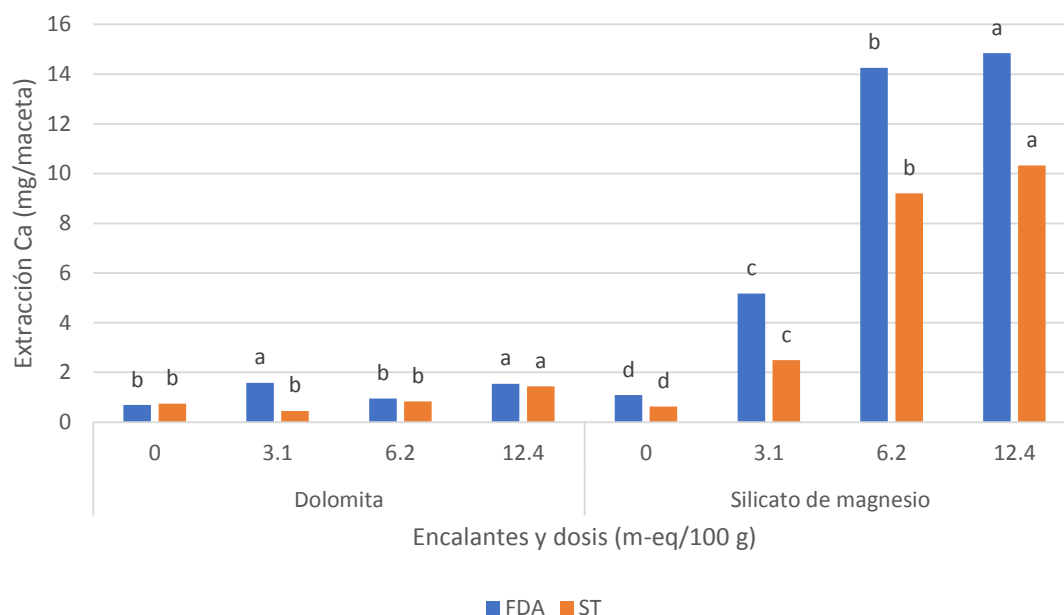


Figura 40: Efecto de las dosis de material encalante en la extracción de calcio radicular en los diferentes materiales encalantes y fuentes de fósforo.

Cuadro 36: Comparaciones de los promedios de extracción de Ca radicular obtenidos entre los materiales encalantes y evaluadas en las diferentes dosis y fuentes de fósforo.

Dosis m-eq /100 g suelo	Fuente de fósforo	Encalante	
		Dolomita	Silicato de magnesio
Extracción Ca (mg/maceta)			
0	FDA	0.69 ^a	1.09 ^a
	ST	0.75 ^a	0.63 ^a
3.1	FDA	1.58 ^b	5.18 ^a
	ST	0.45 ^b	2.50 ^a
6.2	FDA	0.95 ^b	14.25 ^a
	ST	0.83 ^b	9.21 ^a
12.4	FDA	1.54 ^b	14.85 ^a
	ST	1.44 ^b	10.33 ^a

En el Cuadro 36 se observan los promedios de absorción de Ca obtenidos entre las diferentes fuentes de material encalante y comparados en los diferentes niveles de dosis y fuentes de fósforo. Se observa que las mayores absorciones de Ca se obtuvieron con el uso de silicato de magnesio como material encalante. La diferencia de los promedios de

las absorciones de Ca con el silicato de magnesio varían entre 4.55 a 14 veces más lo obtenido con dolomita. Dichas diferencias se pueden observar en la Figura 41.

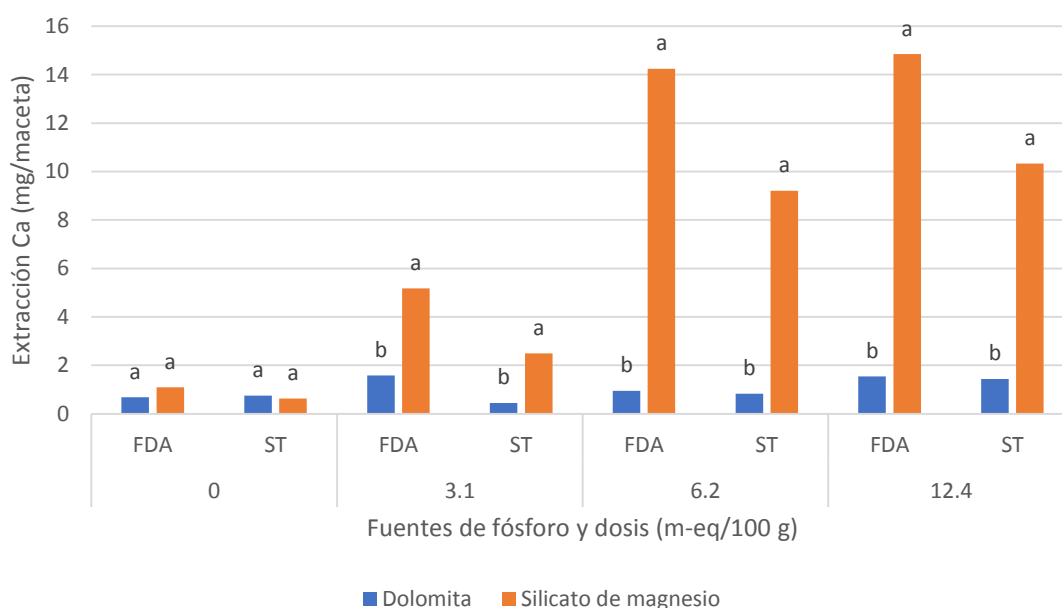


Figura 41: Efecto de los materiales encalantes en la extracción de calcio radicular en las diferentes dosis y fuentes de fósforo.

Cuadro 37: Comparaciones de los promedios de extracción de Ca radicular obtenidos entre las fuentes de fósforo y evaluadas en los diferentes materiales encalantes y dosis.

Encalante	Dosis m-eq /100 g suelo	Fuente de fósforo	
		FDA	ST
Extracción Ca (mg/maceta)			
Dolomita	0	0.69 ^a	0.75 ^a
	3.1	1.58 ^a	0.45 ^b
	6.2	0.95 ^a	0.83 ^a
	12.4	1.54 ^a	1.44 ^a
Silicato de magnesio	0	1.09 ^a	0.63 ^a
	3.1	5.18 ^a	2.50 ^b
	6.2	14.25 ^a	9.21 ^b
	12.4	14.85 ^a	10.33 ^b

En el Cuadro 37 se observan los promedios de absorción de Ca obtenidos entre las diferentes fuentes de fósforo y comparados en los diferentes niveles material encalante y dosis. Se puede observar que existen diferencias significativas entre los promedios de absorción de Ca obtenidos en las dosis de 3.1 m-eq/100 g de dolomita y 3.1, 6.2 y 12.4 m-eq/100 g de silicato de magnesio, en donde los mayores valores de absorción de Ca se obtuvieron al utilizar FDA como fuente de fósforo. Aunque a nivel de dolomita las diferencias entre los promedios obtenidos con FDA y ST no fueron marcadas, para el caso de silicato de magnesio las diferencias de los promedios de absorción entre las fuentes de fósforo sí lo fueron, y esto se observa en la Figura 42.

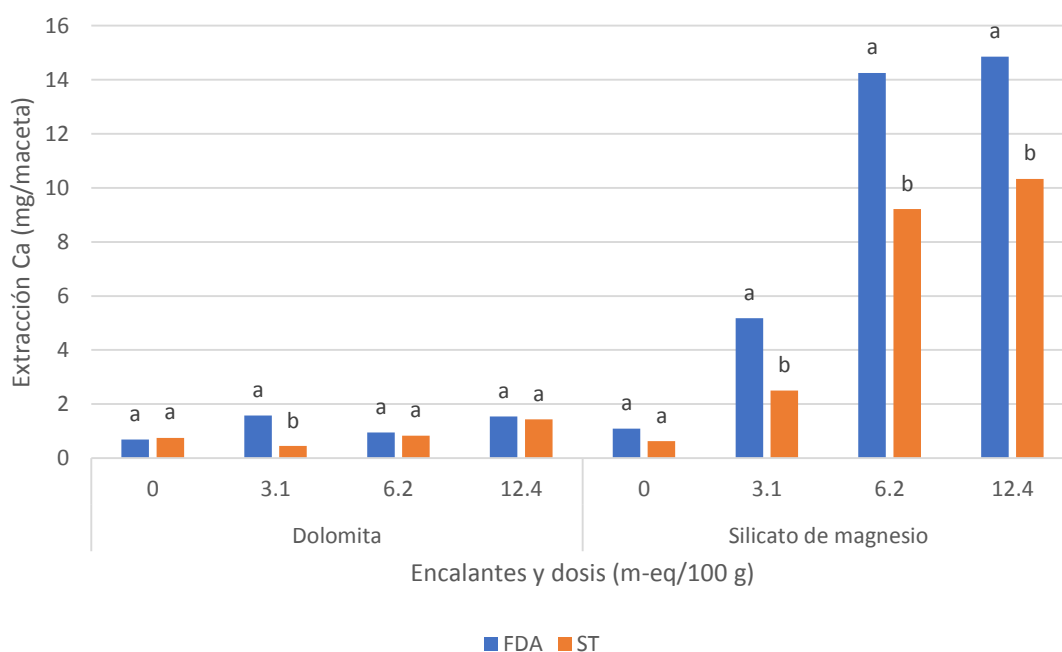


Figura 42: Efecto de las fuentes de fósforo en la extracción de calcio radicular en los diferentes materiales encalantes y dosis.

V. CONCLUSIONES

Los resultados experimentales obtenidos permiten extraer las siguientes conclusiones:

1. El mayor incremento en el pH y disminución del contenido de acidez cambiante y aluminio cambiante se logró al aplicar 12.4 m-eq/100 g de silicato de magnesio. A medida que se aumentaron las dosis de silicato de magnesio se produjeron mayores reducciones en el contenido de acidez cambiante y aluminio cambiante, así como aumentos en el pH del suelo.
2. El aumento del pH y la disminución de la acidez cambiante y el aluminio cambiante producido por el incremento en las dosis de silicato de magnesio favoreció la formación de biomasa.
3. A nivel foliar, la aplicación de silicato de magnesio, a dosis de 6.2 m-eq/100 g, junto con FDA, permitió mayor producción de peso seco. La producción de peso seco a nivel radicular fue mayor con 12.4 m-eq/100 de silicato de magnesio junto con FDA.
4. Así mismo, las extracciones de N, P, K, Mg y Ca aumentaron a medida que las dosis de silicato de magnesio aumentaban progresivamente.
5. En la extracción de N, a nivel foliar se obtuvo la mayor extracción al aplicar 6.2 m-eq/100 g de silicato de magnesio junto con FDA; a nivel radicular, al aplicar 12.4 m-eq/100 de silicato de magnesio y FDA se logró la mayor extracción de N.
6. En la extracción de P, K y Mg, tanto a nivel foliar como radicular, la mayor extracción se alcanzó al aplicar 12.4 m-eq/100 g de silicato de magnesio con FDA.
7. La extracción de Ca foliar fue mayor al aplicar 6.2 m-eq/100 g de silicato de magnesio. Al aplicar 12.4 m-eq/100 g de material encalante, junto con FDA, se logró una mayor extracción de Ca. A nivel radicular, la mayor absorción de Ca se alcanzó con 12.4 m-eq/100 g de silicato de magnesio con FDA.
8. El uso de FDA como fuente de fósforo permitió un mejor desarrollo en la planta, produciendo las mayores absorciones de N, P, K, Mg y Ca, lo que a su vez permitió una mayor formación de biomasa.

VI. RECOMENDACIONES

1. La mezcla de sustrato es clave para la elaboración de trabajos experimentales en invernadero. Por ello, la homogenización del material de suelo, y su mezcla con los materiales a evaluar (enmiendas, fertilizantes, etc.), es importante. Se debe asegurar que cualquier muestra del sustrato, después de homogenizar, comparta las mismas características físico-químicas que el sustrato en su conjunto.
2. Para evaluar materiales encalantes, se debe tener en consideración el tamaño de partículas, ya que esta característica determinará cuán reactivo puede ser el material encalante. A menor tamaño, presentará mayor superficie específica, y por lo tanto, mayor reactividad. A mayor tamaño sucede todo lo contrario.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aciego Pietri, JC; Brookes, PC. 2008. Relationships between soil pH and microbial properties in a UK arable soil. *Soil Biol. Biochem.* 40, 1856–1861.
2. Adnan, A., D. S. Mavinic, and F. A. Koch. 2003. Pilot-scale study of phosphorus recovery through struvite crystallization- examining to process feasibility. *Journal of Environmental Engineering and Science* 2:315–24.
3. Alcarde, JA; Rodella, AA. 2003. Quality and legislations of fertilizer and acidity correction sources. In: Curi, N; Marques, JJ; Guilherme, LRG; Lima, JM; Lopes, AS; Álvares, VH. (Eds.). *Topics in Soil Science*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, pp. 291–334 (in Portuguese).
4. Alcarde, JC. 1992. *Corretivo de acidez do solo: características e interpretações*. São Paulo: Associação Nacional para Difusão de Adubos e Corretivos Agrícolas. (Boletim técnico, 6).
5. Alewell, C. 2003. Acid Inputs into the Soils from Acid Rain. In: Rengel, Z. (Ed) *Handbook of Soil Acidity*. CRC Press. 512 pp.
6. Álvarez, C; Osorio, W. 2014. *Silicio Agronómicamente Esencial*. Medellín, CO, Universidad Nacional de Colombia. 102 p.
7. Barcelo, J; Poschenrieder, C. 2002. Fast root growth responses, root exudates, and internal detoxification as clues to the mechanisms of aluminium toxicity and resistance: a review. *Environ. Exp. Bot.* 48, 75–92.
8. Batista, MF; Moscheta, IS; Bonato, CM; Batista, MA; Almeida, OJ; Inoue, TT. 2013. Aluminum in corn plants: Influence on growth and morpho-anatomy of root and leaf. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37(1), 177-187
9. Baylis, AD; Gragopoulou, C; Davidson, KJ; Birchall, JD. 1994. Effects of silicon on the toxicity of aluminum to soybean. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 25:537–546.
10. Black, CA. 1968. *Soil-plant relationships*. 2nd edition. Wiley. 800 pp
11. Blake, L. 2004. Acid Rain and Soil Acidification. In: Hillel, D. (Ed) *Encyclopedia of Soils in the Environment*. Academic Press. 2200 pp.

12. Bohn, H. McNeal, B. O'Connor, G. 2001. Soil Chemistry. 3rd edition. Wiley. 320 pp
13. Bolan, NS; Adriano, DC; Curtin, D. 2003. Soil acidification and liming interactions with nutrient and heavy metal transformation and bioavailability. *Adv. Agron.* 78, 215–272.
14. Bolan, NS; Curtin, D; Adriano, DC. 2004. Acidity. In: Hillel, D. (Ed) *Encyclopedia of Soils in the Environment*. Academic Press. 2200 pp.
15. Boschetti, NG; Quintero, GC; Benavidez, AR. 1998. Caracterização do fator capacidade de fósforo em solos de Entre Ríos, Argentina. *R. Bras. Ci. Solo.* 22: 95-99.
16. Braga, G. 2006. Eficiência de fosfatos com solubilidade variável em água em solos com capacidade de fixação de fósforo induzida. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. 82p. (Tese de Mestrado).
17. Britto, DT; Kronzucker, HJ. 2005. Nitrogen acquisition, PEP carboxylase, and cellular pH homeostasis: new views on old paradigms. *Plant Cell Environ* 28:1396–1409.
18. Cabral, N; Venancio, R; Silva, MH; de Brito, J; Carbone, MA; Seron, H. 2008. Formas de Aplicação de Silicato de Cálcio e Magnésio na Cultura do Sorgo em neossolo quartzarênico de cerrado. *Pesquisa Agropecuária Tropical* v. 38, n. 4, p. 290-296
19. Calba, H; Jaillard, B. 1997. Effect of aluminum on ion uptake and H⁺ release by maize. *New Phytol* 137:607–616
20. Camargo, MS; Pereira, HS; Korndorfer, GH; Queiroz, AA; dos Reis, CB. 2007. Reação do solo e absorção de silício pelo arroz. *Scientia agricola*, Piracicaba, v. 64, n. 2, p. 176-180.
21. Carvalho-Pupatto, JG; Bull, LT; Crusciol, CAC. 2004. Atributos químicos do solo, crescimento radicular e produtividade do arroz de acordo com a aplicação de escórias. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, DF, v. 39, n. 12, p. 1213-1218.
22. Castro, GSA; Crusciol, CAC. 2013. Effects of superficial liming and silicate application on soil fertility and crop yield under rotation. *Geoderma* 195-196, 234–242.
23. Chadwick, OA; Hendriks, DM; Nettleton, WD. 1987. Silica in durick soil. *Soil Science Society of America Journal* 51: 975-982.

24. Che, J; Zhao, XQ; Zhou, X; Jia, ZJ; Shen, RF. 2015. High pH-enhanced soil nitrification was associated with ammonia-oxidizing bacteria rather than archaea in acidic soils. *Appl. Soil Ecol.* 85, 21–29.
25. Chen, D; Lan, Z; Bai, X; Grace, JB; 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. *J. Ecol.* 101, 1322–1334.
26. Chesworth, W. 1992. Weathering systems. In: Martini, IP; Chesworth, W (Eds.) *Weathering, Soils y Paleosols*. Elsevier, pp. 19–39.
27. Chimdi, A; Gebrekidan, V; Kibret, K; Tadesse, A. 2012. Effects of liming on acidity related chemical properties of soils of different land use systems in Western Oromia, Ethiopia. *World Journal of Agricultural Sciences.* 8:560-567.
28. Clark, RB. 1984. Physiological aspects of calcium and magnesium, and molybdenum deficiencies in plants. In: Adams, F. (ed.) *Soil Acidity and Liming*. 2nd Ed. pp. 99–170. ASA-CSSA-SSSA, Madison, Wisconsin.
29. Cowling, EB. 1980. Acid precipitation and its effects on terrestrial and aquatic ecosystems. In: Kneip, TJ; Lioy, PJ (Eds) *Aerosols: Anthropogenic and natural, sources and transport*. *Annals of the New York Academy of Sciences.* 338(1):540-555.
30. Cumming, JR. 1990. Nitrogen source effects on Al toxicity in nonmycorrhizal and mycorrhizal pitch pine (*Pinus rigida*) seedlings. II. Nitrate reduction and NO_3^- uptake. *Can J Bot* 68:2653–2659
31. Dai, Z; Zhang, X; Tang, C; Muhammad, N; Wu, J; Brookes, PC; Xu, J. 2017. Potential role of biochars in decreasing soil acidification - A critical review. *Science of The Total Environment* 581–582, 601-611.
32. Dinkecha, K; Tsegaye, D. 2017. Effects of Liming on Physicochemical Properties and Nutrient Availability of Acidic Soils in Welmera Woreda, Central Highlands of Ethiopia. *Biochemistry and Molecular Biology*, 2(6): 102-109
33. Doncheva, S; Poschenrieder, C; Stoyanova, Z; Georgieva, K; Velichkova, M; Barcelo, J. 2009. Silicon amelioration of manganese toxicity in Mn-sensitive and Mn tolerant maize varieties. *Environ. Exp. Bot.* 65, 189–197.
34. Durieux, R; Jackson, W; Kamprath, E; Moll, R. 1993. Inhibition of nitrate uptake by aluminum in maize. *Plant Soil* 151:97–104

35. Edmeades, DC; Perrott, KW. 2004. The calcium requirements of pastures in New Zealand: A review. *N. Z. J. Agric. Res.* 47, 11–21.
36. Essington, M. 2003. *Soil and Water Chemistry. An Integrative Approach*. First edition. CRC Press. 552 pp.
37. Fageria, NK. 1989. *Tropical Soils and Physiological Aspects of Crops*. EMBRAPA-CNPAP, Brasilia, Goiânia, Brazil.
38. Fageria, NK; Baligar, VC. 2008. Ameliorating Soil Acidity of Tropical Oxisols by Liming For Sustainable Crop Production. In: Sparks, D. (Ed.), *Advances in Agronomy* 99:345-389. Academic Press.
39. Fageria, NK; Baligar, VC; Edwards, DG. 1990. Soil–plant nutrient relationships at low pH stress. In: Baligar, VC; Duncan, RR. (Eds.) *Crop as Enhancers of Nutrient Use*. Academic Press, San Diego, California, pp. 475–507.
40. Fageria, NK; Nascente, AS. 2014. Management of Soil Acidity of South American Soils for Sustainable Crop Production. In: Sparks, D. (ed.) *Advances in Agronomy*, 128:221-275
41. Fageria, NK; Stone, LF. 2004. Yield of common bean in no-tillage system with application of lime and zinc. *Pesq. Agropec. Braas*, 73-78.
42. Farias, EST; Pintro, JC; Da Silva, MAG; Muniz, AS; Marchetti, ME; Nolla, A; Noemi, P. 2011. Aluminum toxicity in corn plants cultivated with low and high ionic strength nutrient solutions. *J. Plant Nutr.* 34:465-475.
43. Fassbender, H. 1984. *Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina*. San José, CR, IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura). 422 p.
44. Fenn, ME; Huntington, TG; McLaughlin, SB; Eagar, C; Gómez, A; Cook, RB. 2006. Status of soil acidification in North America. *Journal of Forest Science (Prague)* 52, 3-13.
45. Fontes, MPF; Weed, SB. 1996. Phosphate adsorption by clays from Brazilian Oxisols: relationships with specific surface area and mineralogy. *Geoderma*, 72:37-51.
46. Foy, C.D., 1992. Soil chemical factors limiting plant root growth: advances in soil science. In: Hatfield, J.L., Stewart, B.A. (Eds.), *Limitations to Plant Root Growth*. Springer-Verlag, New York, pp. 97–149.

47. Foy, CD. 1984. Physiological effects of hydrogen, aluminium, and manganese toxicities in acid soil p. 57-97. In: Adams, F. (Ed.). *Soil Acidity and Liming*. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin.
48. Foy, CD. 1988. Plant adaptation to acid, aluminum-toxic soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 19, 959–987.
49. Friesen, DK; Miller, MH; Juo, ASR. 1980. Lime and lime-phosphate-zinc interactions in two Nigerian Ultisols. II. Effects on maize root and shoot growth. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 1227–1232
50. Goldberg, S; Sposito, G. 1985. On the mechanism of specific phosphate adsorption by hydroxylated mineral surfaces: A review. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 16(8):801-821.
51. Guntzer, F; Keller, C; Meunier, J. 2011. Benefits of plant silicon for crops: a review. *Agron. Sustain. Dev.* 32, 201–213.
52. Havlin, JL; Beaton, JD; Tisdale, SL; Nelson, WL. 1999. *Soil Fertility and Fertilizers. An Introduction to Nutrient Management*. 6th edition. Pearson. 499 pp.
53. Hawkesford, M; Horst, W; Kichey, T; Lambers, H; Schjoerring, J; Moller, SI; White, P. 2012. Functions of macronutrients. In: Marschner, P. (Ed.). *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. New York: Elsevier pp. 135-189
54. Haynes, RJ. 1982. Effects of liming on phosphate availability in acid soils. A critical review. *Plant and Soil* 68, 289-308
55. Haynes, RJ. 1984. Lime and phosphate in the soil-plant system. *Adv. Agron.* 37:249-315.
56. Haynes, RJ. 1986. Nitrification. In: Kozlowski, TT. (Ed.) *Mineral nitrogen in the plant-soil system*. Academic press, Madison, Wisconsin. 127-157.
57. Hedley, MJ; Hussin, A; Bolan, NS. 1990. New Approaches to Phosphorus Fertilization. In: *Symposium of Phosphorus Requirements for Sustainable Agriculture in Asia and Oceania, 1, Los Banos. Proceedings..*, Manila: IRRI. 125-142 p.
58. Helyar, KR; Porter, WM. 1989. Soil Acidification, its Measurement and the Processes Involved. In: Robson, AD (Ed). *Soil Acidity and Plant Growth*. Academic Press. 318 pp.
59. Hodson, MJ; Sangster, AG. 1999. Aluminum/silicon interactions in conifers. *Journal of Inorganic Biochemistry*, Chicago, v. 76, n. 2, p. 89-98

60. Horst, WJ; Puschel, AK; Schomhl, N. 1997. Induction of callose formation is a sensitive marker for genotypic aluminum sensitivity in maize. *Plant Soil*, 192:23-30.
61. Hsu, PH. 1965. Fixation of phosphate by aluminum and iron in acidic soils. *Soil Science* 99(6): 398-402.
62. Hu, HW; Zhang, LM; Dai, Y; Di, HJ; He, JZ. 2013. pH-dependent distribution of soil ammonia oxidizers across a large geographical scale as revealed by high-throughput pyrosequencing. *J. Soil Sediment* 13, 1439–1449.
63. Iler, RK. 1979. *The chemistry of silica*. Wiley. 896 p
64. Jarvis, SC; Hatch, DJ. 1986. The effects of low concentrations of aluminum on the growth and uptake of nitrate-N by white clover. *Plant Soil* 95:43–55
65. Jerzykiewicz, J. 2001. Aluminum effect on nitrate assimilation in cucumber (*Cucumis sativus* L.) roots. *Acta Physiologiae Plant* 23:213–219
66. Johnson, CE. 2002. Cation exchange properties of acid forest soils of the northeastern USA. *Eur. J. Soil Sci* 53, 271–282
67. Jones, J. B. J. 1991. *Kjeldahl method for nitrogen determination*. Athens, GA: Micro-Macro Publishing Inc.
68. Kaminski, J; dos Santos, DR; Gatiboni, LC; Brunetto, G; da Silva, LS. 2005. Eficiência da calagem superficial e incorpora da precedendo o sistema plantio direto em um argissolo sob pastagem natural. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 29, 573–580.
69. Kamprath, EJ. 1972. Phosphorus. In: Sánchez, P (Ed) *A review of soil research in tropical latin America*. Soil Science Department. North Carolina State University at Raleigh. 263 p
70. Kochian, LV. 1995. Cellular mechanisms of aluminum toxicity and resistance in plants. *Ann. Rev. Plant Phys.*, 46:237-260.
71. Kochian, LV; Hoekenga, OA; Pineros, MA. 2004. How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorous efficiency. *Annu. Rev. Plant Biol.* 55, 459–493.
72. Korndörfer, GH; Lepsch, I. 2001. Effect of silicon on plant growth and crop yield. In: Datnoff, LE; Korndörfer, GHS. (Eds.), *Silicon in agriculture (Studies in plant science)* vol. 8. Elsevier, pp. 133–147.

73. Kumar, M; Khan, MH; Singh, P; Ngachan, SV; Rajkhowa, DJ; Kumar, A; Devi, MH. 2012. Variable lime requirement based on differences in organic matter content of iso-acidic soils. *Indian J Hill Farm* 25(1):26-3
74. Liang, YC; Ma, TS; Li, FJ; Feng, YJ. 1994. Silicon availability and response of rice and wheat to silicon in calcareous soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 25, 2285–2297.
75. Lindsay, W. 1979. *Chemical Equilibria in Soils*. Wiley. 449 p.
76. Loeppert, RH; Suarez, DL. 1996. Carbonate and gypsum. In: *Methods of soil analysis, Part III*; Sparks, DL; Page, AL; Helmke, PA; Loeppert, RH; Soltanpour, PN; Tabatabai, MA. (Eds.). pp: 437-474. *Chemical Methods*. Soil Sci Soc Am, Madison, WI, USA.
77. Logan, KAB; Floate, MJS; Ironside, AD. 1985. Determination of exchangeable acidity and exchangeable aluminium in hill soils part 1 exchangeable acidity. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 16(3), 301–308.
78. Malavolta, E. 1985. *Adubos e Adubação fosfatada*. Fertilizantes Mitsui. São Paulo. 61 pp.
79. Mansell, GP; Pringle, R.M; Edmeades, DC; Shannon, PW. 1984. Effects of lime on pasture production on soils in the North Island of New Zealand. III. Interaction of lime with phosphorus. *N. Z. J. Agric. Res.* 27, 363–369.
80. Marschner, H. 1995. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. 2nd ed. Academic Press,
81. Matichenkov, BB; Bocharnikova, EA. 2001. The relationship between silicon and soil physical and chemical properties. In: Datnoff, LE; Snyder, GH; Korndörfer, GH (Eds). *Studies in Plant Science: Silicon in Agriculture*. Elsevier. 8: 209-219.
82. Matichenkov, V. 2008. Deficiencia y funcionalidad del sílice en suelos, cosechas y alimentos. (en línea). Consultado 23 Mar 2018. Disponible en http://soilace.com/pdf/pon2008/d28/Cas/21_Matichenkov.pdf
83. Matichenkov, VV; Pinsky, DL; Bocharnikova, EA. 1995. Influence of mechanical compaction of soils on the state and form of available silicon. *Eurasian Soil Science* 27: 58-67.
84. McBride, M.B. 1994 *Environmental chemistry of soils*. New York, Oxford University Press. 406p.
85. Mengel, K; Kirby, EA. 2001. *Principles of Plant Nutrition*. 5th edition. Kluwer Academic Publishers. 849 pp.

86. Moody, PW; Aitken, RL; Dickson, T. 1995. Diagnosis of maize yield response to lime in some weathered acidic soils. In: Date, RA; Grundon, NJ; Rayment, GE; Probert, ME. (Eds.). Plant Soil Interactions at Low pH: Principles and Management. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
87. Moreno, R; Garcia, T; Stroch, JM; Muñoz, M; Yañez, E; Perez, E. 2011. Fertilización y corrección edáfica de suelos agrícolas con productos orgánicos (en línea). Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. 9. Consultado 28 Mar 2018. Disponible en <http://www.uax.es/publicacion/fertilizacion-y-correccion-edafica-de-suelos-agricolas-con-productos-organicos.pdf>
88. Naidu, R; Syers, JK; Tillman, RW; Kirkman, JH. 1990. Effect of liming and added phosphate on charge characteristics of acid soils. J. Soil Sci. 41, 157–164.
89. Navarro, G; Navarro, S. 2013. Química Agrícola: Química del suelo y de nutrientes esenciales para las plantas. 3 ed. Madrid, ES, Mundi-Prensa. 508 p.
90. New York.
91. Nortcliff, S. 1989. A review of soil and soil-related constraints to development in Amazonia. Applied Geography 9, 147- 160
92. Novais, RF; Alvarez, VH; De Barros, NF; Fontes, RL; Cantarutti, RB; Neves, JC. 2007. Fertilidade do Solo. Viçosa, Minas Gerais. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 1017 p.
93. Novais, RF; Neves, JCL; Barros, NF. 1991. Aspectos físicoquímicos envolvidos na fixação do fósforo no solo. In: Encontro Nacional de Rocha Fosfática, 5, 1991. São Paulo. Anais... São Paulo: p. 133-177.
94. Olego, MA; Visconti, F; Quiroga, MJ; Paz, JM De; 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).
95. Osorio, N. 2014. Manejo de nutrientes en suelos del trópico. Medellín, CO, Universidad Nacional de Colombia. 416 p.
96. Owino-Gerroh, C; Gascho, GJ. 2005. Effect of Silicon on Low pH Soil Phosphorus Sorption and on Uptake and Growth of Maize. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 35(15-16), 2369–2378.
97. Pal'ove-Balang, P; Mistrík, I. 2007. Impact of low pH and aluminium on nitrogen uptake and metabolism in roots of Lotus japonicus. Biologia (Bratisl) 62:715–719.

98. Parker, DR; Kinraide, TB; Zelazny, LW. 1988. Aluminum speciation and phytotoxicity in dilute hydroxy-aluminum solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52, 438–444.
99. Parker, DR; Kinraide, TB; Zelazny, LW. 1989. On the phytotoxicity of polynuclear hydroxy-aluminum complexes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53, 789–796.
100. Peregrina, FA; 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 Sci. Soc. Am. J.* 72, 402–411.
101. Piña, RG; Cervantes, C. 1996. Microbial interactions with aluminium. *Biometals* 9, 311–316.
102. Prado, RM; Fernandes, FM. 2000. Escória de siderurgia e calcário na correção da acidez do solo cultivado com cana-de-açúcar em vaso. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v. 57, n. 4, p. 739-744.
103. Quero, E. 2008. La biosilificación proceso biológico fundamental en la productividad vegetal. Consultado 7 Abr 2018. Disponible en http://api.ning.com/files/2ZKVfghWByMzbsJpkRBWftqFOGvEi*oUgtoXIVRLrsiP*IxI6nIvSKIfLHqDIILgp*4fBDrfBhMoItnc03nCtKrC7gj8u/2008quero03.pdf
104. Rahman, ZA; Gikonyo, E; Silek, B; Goh, KJ; Soltangheis, A. 2014. Evaluation of phosphate rock sources and rate of application on oil palm yield grown on peat soils of Sarawak, Malaysia. *Agronomy Journal* 13 (1):12–22.
105. Riise, G; van Hees, P; Lundstrom, US; Strand, LT. 2000. Mobility of different size fractions of organic carbon, Al, Fe, Mn and Si in podzols. *Geoderma* 94, 237–247.
106. Rosolem, CA; Bicudo, SJ; Marubayashi, OM. 1995. Soybean yield and root growth as affected by lime rate and quality. In: Date, RA; Grundon, NJ; Rayment, GE; Probert, ME. (Eds.) *Plant Soil Interactions at Low pH: Principles and Management*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
107. Ross, DS; Matschonat, G; Skyllberg, U. 2008. Cation exchange in forest soils: the need for a new perspective. *Eur. J. Soil Sci.* 59, 1141–1159.
108. Rousk, J; Brookes, PC; Bååth, E. 2010. Investigating the mechanisms for the opposing pH relationships of fungal and bacterial growth in soil. *Soil Biol. Biochem.* 42, 926–934.

109. Rowell, DL. 1994. *Soil Science: Methods and Application*, Addison Wesley Longman, Limited England. 360 pp.
110. Runge-Metzger, A. 1995. Closing the cycle: Obstacles to efficient P management for improved global security. In: Tiessen, H. (ed.) *Phosphorus in the Global Environment: Transfers, Cycles, and Management*. New York. Wiley. Pp 27–42
111. Sample, EC. 1972. Factors affecting phosphate retention parameters derived using the Langmuir adsorption equation. North Carolina State University at Raleigh. Tesis de doctorado. 110 p.
112. Sánchez, PA; Salinas, JG. 1983. *Suelos ácidos: Estrategias para su manejo con bajos insumos en America Tropical*. Bogotá, La Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. 93p.
113. Sanyal, S.K., De Datta, S.K. 1991. Chemistry of phosphorus transformations in soil. In: Stewart, BA (ed.) *Springer. Advances in Soil Science* 16:1-120.
114. Schaedle, M; Thornton, FC; Raynal, DJ; Tepper, HB. 1989. Response of tree seedlings to aluminum. *Tree Physiol.* 5, 337–356.
115. Schindler, PW; Furst, B; Dick, R; Wolf, PO. 1976. Ligand properties of surface silanol groups. I. Surface complex formation with Fe^{3+} , Cu^{2+} , Cd^{3+} and Pb^{2+} . *Journal of Colloid and Interface Science* 55: 469-475
116. Schulthess, CP; Tokunaga, Y. 1996. Metal and pH effects on adsorption of poly (vinilalcohol) by silicon oxide. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60:92.
117. Shen, QR; Ran, W; Cao, ZH. 2003. Mechanisms of nitrite accumulation occurring in soil nitrification. *Chemosphere* 50, 747-753
118. Shi, R; Liu, Z; Li, Y; Jiang, T; Xu, M; Li, J. 2019. Mechanisms for increasing soil resistance to acidification by long-term manure application. *Soil & Tillage Research* 185(November 2017):77-84.
119. Smith, RV; Doyle, RM; Burns, LC; Stevens, RJ. 1997. A model for nitrite accumulation in soils. *Soil Biol. Biochem.* 29, 1241-1247.
120. Soil Survey Staff. 2014. *Claves para la taxonomía de suelos*, 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC. (trad. al español)
121. Sparks, D. 2003. *Environmental Soil Chemistry*. 2nd Ed. Academic Press. 352 p
122. Snyder, G; Matichenkov, V; Datnoff, L. 2006. Silicon. In: Barker, AV; Pilbeam, DJ. *Handbook of Plant Nutrition*. Taylor & Francis. 551-562 pp.
123. Tan, K. 2011. *Principles of Soil Chemistry*. 4th edition. CRC Press. 390 p.

124. Thomas, GW; Hargrove, WL. 1984. The Chemistry of Soil Acidity. In: Adams, F (Ed) Soil Acidity and Liming. 2nd edition. American Society of Agronomy. 380 pp.
125. Vaculik, M; Lux, A; Luxova, M; Tanimoto, E; Lichtscheidl, I. 2009. Silicon mitigates cadmium inhibitory effects in young maize plants. *Environ. Exp. Bot.* 67, 52–58.
126. Watanabe, T; Osaki, M; Tadano, T. 1998. Effects of nitrogen source and aluminum on growth of tropical tree seedlings adapted to low pH soils. *Soil Sci Plant Nutr* 44:655–666.
127. Weirich Neto, PH; Caires, EF; Justino, A; Dias, J. 2000. Correção da acidez do solo em função de modos de incorporação de calcário. *Ciência Rural* 30, 257–261.
128. Wonisch, H; Gerard, F; Dietzel, M; Jaffrain, J; Nestroy, O; Boudot, J.-P. 2008. Occurrence of polymerized silicic acid and aluminium species in two forest soil solutions with different acidity. *Geoderma* 144, 435–445.
129. Yi, H; Xu, G; Cheng, H; Wang, J; Wan, Y; Chen, H. 2012. An overview of utilization of steel slag. *Procedia Environ. Sci.* 16, 791–801
130. Zapata, R. 2004. La química de la acidez del suelo. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. 207p.
131. Zasoski, R. J., y Burau, R. G. 1977. A rapid nitric-perchloric acid digestion method for multi-element tissue analysis. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 8: 425-436.
132. Zhao, XQ; Aizawa, T; Schneider, J; Wang, C; Shen, RF; Sunairi, M. 2013. Complete mitochondrial genome of the aluminum-tolerant fungus *Rhodotorula taiwanensis* RS1 and comparative analysis of Basidiomycota mitochondrial genomes. *Microbiologyopen* 2, 308–317.
133. Zhao, XQ; Bao, XM; Wang, C; Xiao, ZY; Hu, ZM; Zheng, CL; Shen, RF. 2017. Hydroxy-Al and cell-surface negativity are responsible for the enhanced sensitivity of *Rhodotorula taiwanensis* to aluminum by increased medium pH. *Arch. Microbiol.* 199, 1185–1194.
134. Zhao, XQ; Shen, RF. 2018. Aluminum–Nitrogen Interactions in the Soil–Plant System. *Front. Plant Sci.* 9:807.
135. Zhou, X; Gu, Z; Xu, H; Chen, L; Tao, G; Yu, Y; Li, K. 2016. The effects of exogenous ascorbic acid on the mechanism of physiological and biochemical

responses to nitrate uptake in two rice cultivars (*Oryza sativa* L.) under aluminum stress. *J Plant Growth Regul* 35:1013–1024.

VIII. ANEXOS

Anexo 1: Análisis de varianza y análisis de los supuestos para el pH del suelo después de incubación.

Fuente de variabilidad	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrática	
Encalante (E)	1	1.0770	1.1014	**
Dosis (D)	3	1.6982	0.5661	**
Fuente de fósforo (F)	1	0.0151	0.0151	n.s.
E*D	3	1.0649	0.3550	**
E*F	1	0.0540	0.0540	*
D*F	3	0.0201	0.0067	n.s.
E*D*F	3	0.0368	0.0123	n.s.
Residuales	32	0.2684	0.0084	

Coefficiente de variabilidad 2.29

Prueba de normalidad de errores Shapiro-Wilk normality test
p-value = 0.09229

Prueba de homogeneidad de varianzas Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
p = 0.9786

Anexo 2: Análisis de varianza y análisis de los supuestos para la acidez cambiante del suelo.

Fuente de variabilidad	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrática	
Encalante (E)	1	68.88	68.88	**
Dosis (D)	3	49.32	16.44	**
Fuente de fósforo (F)	1	1.73	1.73	*
ExD	3	49.14	16.38	**
ExF	1	0.09	0.09	n.s.
DxF	3	1.68	0.56	n.s.
ExDxF	3	0.45	0.15	n.s.
Error	32	6.393	0.2	

Coefficiente de variabilidad 6.91

Prueba de normalidad de errores Shapiro-Wilk normality test
p-value = 0.1783

Prueba de homogeneidad de varianzas Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
p = 0.7872

Anexo 3: Efecto del material encalante en la acidez cambiante del material de suelo.

Encalante	Acidez cambiante (m-eq H+Al /100 g suelo)
Dolomita	7.67 ^a
Silicato de magnesio	5.27 ^b

Anexo 4: Efecto de las dosis en la acidez cambiante del material de suelo.

Dosis m-eq /100 g suelo	Acidez cambiante (m-eq H+Al /100 g suelo)
0	7.87 ^a
3.1	6.85 ^b
6.2	6.04 ^c
12.4	5.12 ^d

Anexo 5: Análisis de varianza y análisis de los supuestos para el aluminio cambiante del suelo.

Fuente de variabilidad	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrática	
Encalante (E)	1	54.35	54.35	**
Dosis (D)	3	48.09	16.03	**
Fuente de fósforo (F)	1	2.39	2.39	**
ExD	3	43.11	14.37	**
ExF	1	0.04	0.04	n.s.
DxF	3	1.61	0.54	*
ExDxF	3	0.65	0.22	n.s.
Error	30	2.72	0.0907	

Datos eliminados

2

Coefficiente de variabilidad

5.69

Prueba de normalidad de errores

Shapiro-Wilk normality test
p-value = 0.1749

Prueba de homogeneidad de varianzas

Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
p = 0.7372

Anexo 6: Efecto del material encalante en el aluminio cambiante del material de suelo.

Encalante	Aluminio cambiante (m-eq Al /100 g suelo)
Dolomita	6.38 ^a
Silicato de magnesio	4.21 ^b

Anexo 7: Efecto de la dosis en el aluminio cambiante del material de suelo.

Dosis m-eq /100 g suelo	Aluminio cambiante (m-eq Al /100 g suelo)
0	6.74 ^a
3.1	5.61 ^b
6.2	4.85 ^c
12.4	3.97 ^d

Anexo 8: Efecto de la fuente de fósforo en el aluminio cambiante del material de suelo.

Fuente de fósforo	Aluminio cambiante (m-eq Al /100 g suelo)
FDA	5.54 ^a
ST	5.08 ^b

Anexo 9: Análisis de varianza y análisis de los supuestos para el pH del suelo después de cosecha.

Fuente de variabilidad	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrática	
Encalante (E)	1	0.4524	0.4524	**
Dosis (D)	3	0.8205	0.2735	**
Fuente de fósforo (F)	1	0.0243	0.0243	**
ExD	3	0.4524	0.1508	**
ExF	1	$8.092 \cdot 10^{-6}$	$8.092 \cdot 10^{-6}$	n.s.
DxF	3	0.0050	0.0017	n.s.
ExDxF	3	0.0029	0.0010	n.s.
Error	32	0.0185	0.000578	

Coefficiente de variabilidad 0.64

Prueba de normalidad de errores Shapiro-Wilk normality test
p-value = 0.07005

Prueba de homogeneidad de varianzas Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
p = 0.5348

Anexo 10: Efecto del material encalante en el pH del material de suelo.

Enmienda encalante	pH	
	Después de incubación	Después de cosecha
Dolomita	3.86 ^b	3.65 ^b
Silicato de magnesio	4.16 ^a	3.84 ^a

Anexo 11: Efecto de las dosis de material encalante en el pH del material de suelo.

Dosis m-eq /100 g suelo	pH	
	Después de incubación	Después de cosecha
0	3.83 ^c	3.62 ^d
3.1	3.86 ^c	3.66 ^c
6.2	4.04 ^b	3.74 ^b
12.4	4.30 ^a	3.96 ^a

Anexo 12: Análisis de varianza y análisis de los supuestos para el peso seco de la parte foliar.

Fuente de variabilidad	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrática	
Encalante (E)	1	839.2	839.2	**
Dosis (D)	3	614.7	204.9	**
Fuente de fósforo (F)	1	22.2	22.2	**
ExD	3	720.6	240.2	**
ExF	1	10.4	10.4	**
DxF	3	13.2	4.4	**
ExDxF	3	15.7	5.2	**
Error	29	7.58	0.2614	

Unidades perdidas y/o eliminadas

3

Coefficiente de variabilidad

9.04

Prueba de normalidad de errores

Shapiro-Wilk normality test
p-value = 0.0502

Prueba de homogeneidad de varianzas

Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
p = 0.8907

Anexo 13: Análisis de varianza y análisis de los supuestos para el peso seco de la parte radicular.

Fuente de variabilidad	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrática	
Encalante (E)	1	36.03	36.03	**
Dosis (D)	3	24.74	8.25	**
Fuente de fósforo (F)	1	4.92	4.92	**
ExD	3	25.09	8.36	**
ExF	1	4.71	4.71	**
DxF	3	2.65	0.88	**
ExDxF	3	3.08	1.03	**
Error	30	0.16	0.00533	

Unidades perdidas y/o eliminadas

2

Coefficiente de variabilidad

6.38

Prueba de normalidad de errores

Shapiro-Wilk normality test
p-value = 0.4567

Prueba de homogeneidad de varianzas

Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
p = 0.7826

Anexo 14: Efecto del material encalante en la producción de peso seco en hoja y raíz.

Encalante	Peso seco (g)	
	Parte foliar	Parte radicular
Dolomita	1.62 ^b	0.29 ^b
Silicato de magnesio	10.27 ^a	2.06 ^a

Anexo 15: Efecto de la dosis de material encalante en la producción de peso seco en hoja y raíz.

Dosis m-eq /100 g suelo	Peso seco (g)	
	Parte foliar	Parte radicular
0	1.39 ^d	0.33 ^d
3.1	3.86 ^c	0.64 ^c
6.2	9.49 ^a	1.79 ^b
12.4	8.79 ^b	1.91 ^a

Anexo 16: Efecto de la fuente de fósforo en la producción de peso seco en hoja y raíz.

Fuente de fósforo	Peso seco (g)	
	Parte foliar	Parte radicular
FDA	6.19 ^a	1.46 ^a
ST	5.15 ^b	0.81 ^b

Anexo 17: Análisis de varianza y análisis de los supuestos para absorción de nitrógeno de la parte foliar.

Fuente de variabilidad	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrática	
Encalante (E)	1	215361	215361	**
Dosis (D)	3	144819	48273	**
Fuente de fósforo (F)	1	8114	8114	**
ExD	3	124837	41612	**
ExF	1	1199	1199	**
DxF	3	5659	1886	**
ExDxF	3	2831	944	**
Error	29	3328	114.759	

Unidades perdidas y/o eliminadas 3

Coefficiente de variabilidad 10.37

Prueba de normalidad de errores Shapiro-Wilk normality test
p-value = 0.9757

Prueba de homogeneidad de varianzas Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
p = 0.947

Anexo 18: Análisis de varianza y análisis de los supuestos para absorción de nitrógeno de la parte radicular.

Fuente de variabilidad	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrática	
Encalante (E)	1	6243	6243	**
Dosis (D)	3	4510	1503	**
Fuente de fósforo (F)	1	780	780	**
ExD	3	4321	1440	**
ExF	1	730	730	**
DxF	3	550	183	**
ExDxF	3	664	221	**
Error	30	37.2	1.24	

Unidades perdidas y/o eliminadas

2

Coefficiente de variabilidad

7.09

Prueba de normalidad de errores

Shapiro-Wilk normality test
p-value = 0.2872

Prueba de homogeneidad de varianzas

Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
p = 0.8135

Anexo 19: Efecto del material encalante en la extracción de nitrógeno en hoja y raíz.

Encalante	Extracción de N (mg/maceta)	
	Parte foliar	Parte radicular
Dolomita	35.65 ^b	4.54 ^b
Silicato de magnesio	174.05 ^a	27.86 ^a

Anexo 20: Efecto de la dosis de material encalante en la extracción de nitrógeno en hoja y raíz.

Dosis m-eq /100 g suelo	Extracción de N (mg/maceta)	
	Parte foliar	Parte radicular
0	29.25 ^d	5.17 ^d
3.1	85.58 ^c	10.08 ^c
6.2	182.00 ^a	19.00 ^b
12.4	131.91 ^b	30.00 ^a

Anexo 21: Efecto de la fuente de fósforo en la extracción de nitrógeno en hoja y raíz.

Fuente de fósforo	Extracción de N (mg/maceta)	
	Parte aérea	Parte radicular
FDA	121.29 ^a	19.57 ^a
ST	82.76 ^b	11.83 ^b

Anexo 22: Análisis de varianza y análisis de los supuestos para absorción de fósforo de la parte foliar.

Fuente de variabilidad	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrática	
Encalante (E)	1	890.8	890.8	**
Dosis (D)	3	615.7	205.2	**
Fuente de fósforo (F)	1	10.3	10.3	**
ExD	3	655.3	218.4	**
ExF	1	6.4	6.4	**
DxF	3	11.6	3.9	**
ExDxF	3	8.1	2.7	**
Error	29	5.73	0.19759	

Unidades perdidas y/o eliminadas	3
Coefficiente de variabilidad	8.25
Prueba de normalidad de errores	Shapiro-Wilk normality test p-value = 0.2955
Prueba de homogeneidad de varianzas	Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median) p = 0.6014

Anexo 23: Análisis de varianza y análisis de los supuestos para absorción de fósforo de la parte radicular.

Fuente de variabilidad	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrática	
Encalante (E)	1	31.131	31.131	**
Dosis (D)	3	21.986	7.329	**
Fuente de fósforo (F)	1	2.408	2.408	**
ExD	3	20.827	6.942	**
ExF	1	1.751	1.751	**
DxF	3	0.943	0.314	**
ExDxF	3	0.954	0.318	**
Error	30	0.122	0.004	

Unidades perdidas y/o eliminadas 2

Coefficiente de variabilidad 6.29

Prueba de normalidad de errores Shapiro-Wilk normality test
p-value = 0.5416

Prueba de homogeneidad de varianzas Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
p = 0.2324

Anexo 24: Efecto del material encalante en la extracción de fósforo en hoja y raíz.

Encalante	Extracción P (mg/maceta)	
	Parte foliar	Parte radicular
Dolomita	1.23 ^b	0.27 ^b
Silicato de magnesio	10.15 ^a	1.87 ^a

Anexo 25: Efecto de la dosis de material encalante en la extracción de fósforo en hoja y raíz.

Dosis m-eq /100 g suelo	Extracción P (mg/maceta)	
	Parte foliar	Parte radicular
0	1.04 ^d	0.27 ^d
3.1	3.95 ^c	0.46 ^c
6.2	7.02 ^b	1.16 ^b
12.4	10.23 ^a	2.08 ^a

Anexo 26: Efecto de la fuente de fósforo en la extracción de fósforo en hoja y raíz.

Fuente de fósforo	Extracción P (mg/maceta)	
	Parte aérea	Parte radicular
FDA	5.65 ^a	1.24 ^a
ST	5.14 ^b	0.78 ^b

Anexo 27: Análisis de varianza y análisis de los supuestos para absorción de potasio de la parte foliar.

Fuente de variabilidad	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrática	
Encalante (E)	1	314058	314058	**
Dosis (D)	3	200669	66890	**
Fuente de fósforo (F)	1	5836	5836	**
ExD	3	221051	73684	**
ExF	1	76	76	n.s.
DxF	3	5769	1923	**
ExDxF	3	4932	1644	**
Error	29	2610	90	

Unidades perdidas y/o eliminadas 3

Coefficiente de variabilidad 8.85

Prueba de normalidad de errores Shapiro-Wilk normality test
p-value = 0.2341

Prueba de homogeneidad de varianzas Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
p = 0.2908

Anexo 28: Análisis de varianza y análisis de los supuestos para absorción de potasio de la parte radicular.

Fuente de variabilidad	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrática	
Encalante (E)	1	423.2	423.2	**
Dosis (D)	3	338.2	112.7	**
Fuente de fósforo (F)	1	40.4	40.4	**
ExD	3	359.6	119.9	**
ExF	1	48.7	48.7	**
DxF	3	27.1	9.0	**
ExDxF	3	38.7	12.9	**
Error	29	1.62	0.0559	

Unidades perdidas y/o eliminadas	3
Coefficiente de variabilidad	6.23
Prueba de normalidad de errores	Shapiro-Wilk normality test p-value = 0.8195
Prueba de homogeneidad de varianzas	Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median) p = 0.5381

Anexo 29: Efecto de enmiendas encalantes en la extracción de potasio en hoja y raíz.

Encalante	Extracción K (mg/maceta)	
	Parte foliar	Parte radicular
Dolomita	29.01 ^b	0.93 ^b
Silicato de magnesio	196.47 ^a	7.08 ^a

Anexo 30: Efecto de las dosis de las enmiendas encalantes en la extracción de potasio en hoja y raíz.

Dosis m-eq /100 g suelo	Extracción K (mg/maceta)	
	Parte foliar	Parte radicular
0	24.88 ^d	0.91 ^d
3.1	56.70 ^c	1.92 ^c
6.2	176.52 ^a	4.96 ^b
12.4	167.91 ^a	7.66 ^a

Anexo 31: Efecto de las fuentes de fósforo en la extracción de potasio en hoja y raíz.

Fuente de fósforo	Extracción K (mg/maceta)	
	Parte foliar	Parte radicular
FDA	115.14 ^a	4.49 ^a
ST	99.52 ^b	3.19 ^b

Anexo 32: Análisis de varianza y análisis de los supuestos para absorción de magnesio de la parte foliar.

Fuente de variabilidad	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrática	
Encalante (E)	1	21737	21737	**
Dosis (D)	3	16298	5433	**
Fuente de fósforo (F)	1	1139	1139	**
ExD	3	16268	5423	**
ExF	1	261	261	**
DxF	3	1072	357	**
ExDxF	3	1351	450	**
Error	29	101	3.483	

Unidades perdidas y/o eliminadas	3
Coefficiente de variabilidad	6.90
Prueba de normalidad de errores	Shapiro-Wilk normality test p-value = 0.2107
Prueba de homogeneidad de varianzas	Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median) p = 0.7993

Anexo 33: Análisis de varianza y análisis de los supuestos para absorción de magnesio de la parte radicular.

Fuente de variabilidad	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrática	
Encalante (E)	1	66.09	66.09	**
Dosis (D)	3	49.34	16.45	**
Fuente de fósforo (F)	1	2.58	2.58	**
ExD	3	48.72	16.24	**
ExF	1	3.69	3.69	**
DxF	3	1.57	0.52	**
ExDxF	3	2.31	0.77	**
Error	29	0.229	0.007897	

Unidades perdidas y/o eliminadas	3
Coefficiente de variabilidad	5.96
Prueba de normalidad de errores	Shapiro-Wilk normality test p-value = 0.2707
Prueba de homogeneidad de varianzas	Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median) p = 0.6999

Anexo 34: Efecto del material encalante en la extracción de magnesio en hoja y raíz.

Encalante	Extracción Mg (mg/maceta)	
	Parte foliar	Parte radicular
Dolomita	6.45 ^b	0.36 ^b
Silicato de magnesio	50.50 ^a	2.79 ^a

Anexo 35: Efecto de la dosis de material encalante en la extracción de magnesio en hoja y raíz.

Dosis m-eq /100 g suelo	Extracción Mg (mg/maceta)	
	Parte foliar	Parte radicular
0	4.43 ^d	0.33 ^d
3.1	15.76 ^c	0.70 ^c
6.2	39.86 ^b	1.94 ^b
12.4	50.04 ^a	2.98 ^a

Anexo 36: Efecto de la fuente de fósforo en la extracción de magnesio en hoja y raíz.

Fuente de fósforo	Extracción Mg (mg/maceta)	
	Parte foliar	Parte radicular
FDA	33.47 ^a	1.67 ^a
ST	20.25 ^b	1.32 ^b

Anexo 37: Análisis de varianza y análisis de los supuestos para absorción de calcio de la parte foliar.

Fuente de variabilidad	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrática	
Encalante (E)	1	30739	30739	**
Dosis (D)	3	18850	6283	**
Fuente de fósforo (F)	1	987	987	**
ExD	3	18799	6266	**
ExF	1	66	66	n.s.
DxF	3	603	201	**
ExDxF	3	126	42	n.s.
Error	30	627	20.9	

Unidades perdidas y/o eliminadas

2

Coefficiente de variabilidad

10.31

Prueba de normalidad de errores

Shapiro-Wilk normality test
p-value = 0.04981

Prueba de homogeneidad de varianzas

Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
p = 0.4394

Anexo 38: Análisis de varianza y análisis de los supuestos para absorción de calcio de la parte radicular.

Fuente de variabilidad	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrática	
Encalante (E)	1	378.5	378.5	**
Dosis (D)	3	280.2	93.4	**
Fuente de fósforo (F)	1	30.5	30.5	**
ExD	3	265.6	88.5	**
ExF	1	21.4	21.4	**
DxF	3	9.7	3.2	**
ExDxF	3	10.0	3.3	**
Error	30	1.43	0.04767	

Unidades perdidas y/o eliminadas 2

Coefficiente de variabilidad 5.78

Prueba de normalidad de errores Shapiro-Wilk normality test
p-value = 0.07773

Prueba de homogeneidad de varianzas Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
p = 0.9329

Anexo 39: Efecto del material encalante en la absorción de calcio en hoja y raíz.

Encalante	Extracción Ca (mg/maceta)	
	Parte foliar	Parte radicular
Dolomita	19.60 ^b	1.03 ^b
Silicato de magnesio	71.35 ^a	6.77 ^a

Anexo 40: Efecto de la dosis de material encalante en la absorción de calcio en hoja y raíz.

Dosis m-eq /100 g suelo	Extracción Ca (mg/maceta)	
	Parte foliar	Parte radicular
0	17.02 ^d	0.79 ^d
3.1	30.58 ^c	2.43 ^c
6.2	66.38 ^a	6.31 ^a
12.4	61.11 ^b	5.93 ^b

Anexo 41: Efecto de la fuente de fósforo en la absorción de calcio en hoja y raíz.

Fuente de fósforo	Extracción Ca (mg/maceta)	
	Parte aérea	Parte radicular
FDA	48.98 ^a	4.59 ^a
ST	39.71 ^b	2.96 ^b

Anexo 42: Análisis de efectos simples de la variable pH del material del suelo después de incubación

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	
Efectos simples				
Dosis en Encalante				
Dosis en Dolomita	3	0.04985	0.01662	n.s.
Dosis en Sil. Mg	3	2.58370	0.86123	**
Encalante en Dosis				
Encalante en 0	1	0.01707	0.01707	n.s.
Encalante en 3.1	1	0.01156	0.01156	n.s.
Encalante en 6.2	1	0.20782	0.20782	**
Encalante en 12.4	1	1.67834	1.67834	**
Encalante en Fuente de Fósforo				
Encalante en FDA	1	0.30401	0.30401	**
Encalante en ST	1	0.73178	0.73178	**
Fuente de fósforo en Encalante				
F.Fósforo en Dolomita	1	0.005067	0.005067	n.s.
F.Fósforo en Sil. Mg	1	0.056471	0.056471	*
Error	28	0.2644	0.0094	

Anexo 43: Análisis de efectos simples de la variable pH del material del suelo después de cosecha

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	
Efectos simples				
Dosis en Encalante				
Dosis en Dolomita	3	0.04225	0.01408	**
Dosis en Sil. Mg	3	1.23065	0.41022	**
Encalante en Dosis				
Encalante en 0	1	0.00001	0.00001	n.s.
Encalante en 3.1	1	0.04941	0.04941	**
Encalante en 6.2	1	0.04941	0.04941	**
Encalante en 12.4	1	0.80601	0.80601	**
Error	32	0.0185	0.000578	

Anexo 44: Análisis de efectos simples de la variable acidez cambiante del material del suelo.

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	
Efectos simples				
Dosis en Encalante				
Dosis en Dolomita	3	1.517	0.50567	n.s.
Dosis en Sil. Mg	3	96.945	32.315	**
Encalante en Dosis				
Encalante en 0	1	1.203	1.203	*
Encalante en 3.1	1	9.363	9.363	**
Encalante en 6.2	1	47.601	47.601	**
Encalante en 12.4	1	59.853	59.853	**
Error	32	6.393	0.2	

Anexo 45: Análisis de efectos simples de la variable aluminio cambiante del material del suelo.

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	
Efectos simples				
Encalante en dosis				
Encalante en 0	1	0.101	0.101	n.s.
Encalante en 3.1	1	0.156	0.156	n.s.
Encalante en 6.2	1	35.042	35.042	**
Encalante en 12.4	1	60.750	60.750	**
Dosis en encalante				
Dosis en dolomita	3	4.818	1.606	**
Dosis en Sil. Mg	3	86.849	28.9497	**
Fuente de fósforo en dosis				
F. Fósforo en 0	1	0.8008	0.8008	*
F. Fósforo en 3.1	1	3.3750	3.3750	**
F. Fósforo en 6.2	1	0.7350	0.7350	*
F. Fósforo en 12.4	1	0.0133	0.0133	n.s.
Dosis en fuente de fósforo				
Dosis en FDA	3	29.2519	9.75063	**
Dosis en ST	3	20.1750	6.725	**
Error	30	2.72	0.0907	

Anexo 46: Análisis de efectos simples de la variable peso seco foliar

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	
Efectos simples				
Encalante en dosis				
Encalante en 0	1	0.1	0.1	n.s.
Encalante en 3.1	1	54.81	54.81	**
Encalante en 6.2	1	927.80	927.80	**
Encalante en 12.4	1	710.58	710.58	**
Dosis en encalante				
Dosis en dolomita	3	0.18	0.06	n.s.
Dosis en Sil. Mg	3	1362.47	454.1567	**
Fuente de Fósforo en Dosis				
F. Fósforo en 0	1	0.1411	0.1411	n.s.
F. Fósforo en 3.1	1	18.2904	18.2904	**
F. Fósforo en 6.2	1	1.6577	1.6577	*
F. Fósforo en 12.4	1	25.5413	25.5413	**
Dosis en fuente de fósforo				
Dosis en FDA	3	408.49	136.163	**
Dosis en ST	3	349.64	116.55	**
Encalante en Fuente de Fósforo				
Encalante en FDA	1	645.34	645.34	**
Encalante en ST	1	461.56	461.56	**
Error	29	7.58	0.2614	

Anexo 47: Análisis de efectos simples simples de la variable peso seco foliar

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	
Efectos simples simples				
Encalante en niveles de dosis y fuente de fósforo				
Encalante en 0-FDA	1	0.1	0.1	n.s.
Encalante en 3.1-FDA	1	41.63	41.63	**
Encalante en 6.2-FDA	1	466.95	466.95	**
Encalante en 12.4-FDA	1	445.49	445.49	**
Encalante en 0-ST	1	0.01	0.01	n.s.
Encalante en 3.1-ST	1	16.14	16.14	**
Encalante en 6.2-ST	1	460.87	460.87	**
Encalante en 12.4-ST	1	268.54	268.54	**
Fuente de fósforo en niveles de encalante y dosis				
F. fósforo en Dolomita-0	1	0.136	0.136	n.s.
F. fósforo en S.Magnesio-0	1	0.027	0.027	n.s.
F.fósforo en Dolomita-3.1	1	3.263	3.263	**
F.fósforo en S.Magnesio-3.1	1	17.992	17.992	**
F.fósforo en Dolomita-6.2	1	0.882	0.882	n.s.
F.fósforo en S.Magnesio-6.2	1	0.802	0.802	n.s.
F.fósforo en Dolomita-12.4	1	0.034	0.034	n.s.
F.fósforo en S.Magnesio-12.4	1	43.759	43.759	**
Dosis en niveles de encalante y fuente de fósforo				
Dosis en Dolomita-FDA	3	1.25	0.41667	n.s.
Dosis en S.Magnesio-FDA	3	739.87	246.623	**
Dosis en Dolomita-ST	3	0.53	0.17667	n.s.
Dosis en S.Magnesio-ST	3	633.43	211.143	**
Error	29	7.58	0.26138	

Anexo 48: Análisis de efectos simples de la variable peso seco radicular.

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	
Efectos simples				
Encalante en dosis				
Encalante en 0	1	0.010	0.010	n.s.
Encalante en 3.1	1	2.167	2.167	**
Encalante en 6.2	1	28.327	28.327	**
Encalante en 12.4	1	32.168	32.168	**
Dosis en encalante				
Dosis en dolomita	3	0.228	0.076	**
Dosis en Sil. Mg	3	49.326	16.442	**
Fuente de Fósforo en Dosis				
F. Fósforo en 0	1	0.0175	0.0175	n.s.
F. Fósforo en 3.1	1	0.5088	0.5088	**
F. Fósforo en 6.2	1	3.9436	3.9436	**
F. Fósforo en 12.4	1	4.2616	4.2616	**
Dosis en fuente de fósforo				
Dosis en FDA	3	23.7943	7.9314	**
Dosis en ST	3	6.5299	2.1766	**
Encalante en Fuente de Fósforo				
Encalante en FDA	1	38.480	38.480	**
Encalante en ST	1	8.265	8.265	**
Error	30	0.16	0.00533	

Anexo 49: Análisis de efectos simples simples de la variable peso seco radicular

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	
Efectos simples simples				
Encalante en niveles de dosis y fuente de fósforo				
Encalante en 0-FDA	1	0.0398	0.0398	*
Encalante en 3.1-FDA	1	1.8448	1.8448	**
Encalante en 6.2-FDA	1	29.5127	29.5127	**
Encalante en 12.4-FDA	1	26.8929	26.8929	**
Encalante en 0-ST	1	0.0033	0.0033	n.s.
Encalante en 3.1-ST	1	0.5233	0.5233	**
Encalante en 6.2-ST	1	5.2058	5.2058	**
Encalante en 12.4-ST	1	7.3416	7.3416	**
Fuente de fósforo en niveles de encalante y dosis				
F. fósforo en Dolomita-0	1	0.0012	0.0012	n.s.
F. fósforo en S.Magnesio-0	1	0.0493	0.0493	*
F.fósforo en Dolomita-3.1	1	0.0350	0.0350	*
F.fósforo en S.Magnesio-3.1	1	0.6754	0.6754	**
F.fósforo en Dolomita-6.2	1	0.0024	0.0024	n.s.
F.fósforo en S.Magnesio-6.2	1	6.8689	6.8689	**
F.fósforo en Dolomita-12.4	1	1.68*10 ⁻⁵	1.68*10 ⁻⁵	n.s.
F.fósforo en S.Magnesio-12.4	1	7.6508	7.6508	**
Dosis en niveles de encalante y fuente de fósforo				
Dosis en Dolomita-FDA	3	0.084	0.028	**
Dosis en S.Magnesio-FDA	3	44.079	14.693	**
Dosis en Dolomita-ST	3	0.172	0.0573	**
Dosis en S.Magnesio-ST	3	11.433	3.811	**
Error	30	0.16	0.00533	

Anexo 50: Comparaciones de los promedios de peso seco obtenidos entre las dosis y evaluadas en los diferentes materiales encalantes.

Encalante	Dosis m-eq /100 g suelo		Peso seco foliar (g)	Peso seco radicular (g)
	0	3.1		
Dolomita	0		1.48 ^a	0.30 ^{ab}
	3.1		1.72 ^a	0.22 ^b
	6.2		1.63 ^a	0.20 ^b
	12.4		1.64 ^a	0.45 ^a
Silicato de magnesio	0		1.30 ^d	0.36 ^c
	3.1		5.99 ^c	1.07 ^b
	6.2		21.29 ^a	3.70 ^a
	12.4		17.36 ^b	3.67 ^a

Anexo 51: Comparaciones de los promedios de peso seco obtenidos entre los materiales encalantes y evaluadas en las diferentes dosis.

Encalante	Peso seco (g)							
	Dosis m-eq /100 g suelo							
	Peso seco foliar (g)				Peso seco radicular (g)			
	0	3.1	6.2	12.4	0	3.1	6.2	12.4
Dolomita	1.48 ^a	1.72 ^b	1.63 ^b	1.64 ^b	0.30 ^a	0.22 ^b	0.20 ^b	0.45 ^b
Silicato de magnesio	1.30 ^a	5.99 ^a	21.29 ^a	17.36 ^a	0.36 ^a	1.07 ^a	3.70 ^a	3.67 ^a

Anexo 52: Comparaciones de los promedios de peso seco obtenidos entre las fuentes de fósforo y evaluadas en los diferentes materiales encalantes.

Encalante	Fuente de fósforo			
	FDA		ST	
	Peso seco foliar (g)		Peso seco radicular (g)	
Dolomita	1.95 ^b	1.28 ^b	0.31 ^c	0.27 ^c
Silicato de magnesio	11.27 ^a	9.37 ^a	2.72 ^a	1.41 ^b

Anexo 53: Análisis de efectos simples de la variable absorción de nitrógeno foliar.

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	
Efectos simples				
Encalante en dosis				
Encalante en 0	1	44	44	n.s.
Encalante en 3.1	1	31110	31110	**
Encalante en 6.2	1	175068	175068	**
Encalante en 12.4	1	127410	127410	**
Dosis en encalante				
Dosis en dolomita	3	756	252	n.s.
Dosis en Sil. Mg	3	261543	87181	**
Fuente de Fósforo en Dosis				
F. Fósforo en 0	1	154.1	154.1	n.s.
F. Fósforo en 3.1	1	11470.1	11470.1	**
F. Fósforo en 6.2	1	260.4	260.4	n.s.
F. Fósforo en 12.4	1	937.5	937.5	*
Dosis en fuente de fósforo				
Dosis en FDA	3	77170	25723.33	**
Dosis en ST	3	69607	23202.33	**
Encalante en Fuente de Fósforo				
Encalante en FDA	1	146172	146172	**
Encalante en ST	1	95179	95179	**
Error	29	3328	114.759	

Anexo 54: Análisis de efectos simples simples de la variable absorción de nitrógeno foliar.

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	
Efectos simples simples				
Encalante en niveles de dosis y fuente de fósforo				
Encalante en 0-FDA	1	48	48	n.s.
Encalante en 3.1-FDA	1	27068	27068	**
Encalante en 6.2-FDA	1	102704	102704	**
Encalante en 12.4-FDA	1	82134	82134	**
Encalante en 0-ST	1	6	6	n.s.
Encalante en 3.1-ST	1	7211	7211	**
Encalante en 6.2-ST	1	77562	77562	**
Encalante en 12.4-ST	1	49532	49532	**
Fuente de fósforo en niveles de encalante y dosis				
F. fósforo en Dolomita-0	1	121.5	121.5	n.s.
F. fósforo en S.Magnesio-0	1	42.7	42.7	n.s.
F.fósforo en Dolomita-3.1	1	1290.7	1290.7	*
F.fósforo en S.Magnesio-3.1	1	13348.2	13348.2	**
F.fósforo en Dolomita-6.2	1	425.6	425.6	n.s.
F.fósforo en S.Magnesio-6.2	1	4.8	4.8	n.s.
F.fósforo en Dolomita-12.4	1	16.7	16.7	n.s.
F.fósforo en S.Magnesio-12.4	1	1400.8	1400.8	*
Dosis en niveles de encalante y fuente de fósforo				
Dosis en Dolomita-FDA	3	1058	352.667	n.s.
Dosis en S.Magnesio-FDA	3	141895	47298.333	**
Dosis en Dolomita-ST	3	343	114.333	n.s.
Dosis en S.Magnesio-ST	3	125832	41944	**
Error	29	3328	114.759	

Anexo 55: Análisis de efectos simples de la variable absorción de nitrógeno radicular.

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	
Efectos simples				
Encalante en dosis				
Encalante en 0	1	3	3	n.s.
Encalante en 3.1	1	520.1	520.1	**
Encalante en 6.2	1	2918.7	2918.7	**
Encalante en 12.4	1	8164.7	8164.7	**
Dosis en encalante				
Dosis en dolomita	3	49.5	16.5	**
Dosis en Sil. Mg	3	9693.2	3231.067	**
Fuente de Fósforo en Dosis				
F. Fósforo en 0	1	16.33	16.33	**
F. Fósforo en 3.1	1	90.75	90.75	**
F. Fósforo en 6.2	1	212.02	212.02	**
F. Fósforo en 12.4	1	1330.07	1330.07	**
Dosis en fuente de fósforo				
Dosis en FDA	3	4671.5	1557.167	**
Dosis en ST	3	1333.5	444.5	**
Encalante en Fuente de Fósforo				
Encalante en FDA	1	6656.6	6656.6	**
Encalante en ST	1	1624.0	1624.0	**
Error	30	37.2	1.24	

Anexo 56: Análisis de efectos simples simples de la variable absorción de nitrógeno radicular.

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	
Efectos simples simples				
Encalante en niveles de dosis y fuente de fósforo				
Encalante en 0-FDA	1	10.7	10.7	*
Encalante en 3.1-FDA	1	400.2	400.2	**
Encalante en 6.2-FDA	1	2604.2	2604.2	**
Encalante en 12.4-FDA	1	7053.3	7053.3	**
Encalante en 0-ST	1	0.7	0.7	n.s.
Encalante en 3.1-ST	1	150.0	150.0	**
Encalante en 6.2-ST	1	720.3	720.3	**
Encalante en 12.4-ST	1	1734.0	1734.0	**
Fuente de fósforo en niveles de encalante y dosis				
F. fósforo en Dolomita-0	1	0.67	0.67	n.s.
F. fósforo en S.Magnesio-0	1	24	24	**
F.fósforo en Dolomita-3.1	1	8.17	8.17	n.s.
F.fósforo en S.Magnesio-3.1	1	112.67	112.67	**
F.fósforo en Dolomita-6.2	1	0.17	0.17	n.s.
F.fósforo en S.Magnesio-6.2	1	367.50	367.50	**
F.fósforo en Dolomita-12.4	1	1.50	1.50	n.s.
F.fósforo en S.Magnesio-12.4	1	2288.13	2288.13	**
Dosis en niveles de encalante y fuente de fósforo				
Dosis en Dolomita-FDA	3	24.9	8.3	**
Dosis en S.Magnesio-FDA	3	7929.9	2643.3	**
Dosis en Dolomita-ST	3	28	9.333	**
Dosis en S.Magnesio-ST	3	2328	776	**
Error	30	37.2	1.24	

Anexo 57: Comparaciones de los promedios de extracción de N obtenidos entre las dosis y evaluadas en los diferentes materiales encalantes.

Encalante	Dosis m-eq /100 g suelo	Extracción N foliar (mg/maceta)	Extracción N radicular (mg/maceta)
Dolomita	0	31.17 ^a	4.67 ^{ab}
	3.1	34.67 ^a	3.5 ^b
	6.2	47.80 ^a	3.17 ^b
	12.4	31.00 ^a	6.83 ^a
Silicato de magnesio	0	27.33 ^d	5.67 ^d
	3.1	136.50 ^c	16.67 ^c
	6.2	316.20 ^a	38.00 ^b
	12.4	253.00 ^b	57.80 ^a

Anexo 58: Comparaciones de los promedios de extracción de N obtenidos entre los materiales encalantes y evaluadas en las diferentes dosis.

Encalante	Dosis m-eq /100 g suelo							
	Extracción N foliar (mg/maceta)				Extracción N radicular (mg/maceta)			
	0	3.1	6.2	12.4	0	3.1	6.2	12.4
Dolomita	31.17 ^a	34.67 ^b	47.80 ^b	31.00 ^b	4.67 ^a	3.5 ^b	3.17 ^b	6.83 ^b
Silicato de magnesio	27.33 ^a	136.50 ^a	316.20 ^a	253.00 ^a	5.67 ^a	38.00 ^a	38.00 ^a	57.80 ^a

Anexo 59: Comparaciones de los promedios de extracción de N obtenidos entre las fuentes de fósforo y evaluadas en los diferentes materiales encalantes.

Encalante	Fuente de fósforo			
	FDA		ST	
	Extracción de N foliar (mg/maceta)		Extracción de N radicular (mg/maceta)	
Dolomita	43.25 ^b	27.36 ^b	5.08 ^b	4.00 ^b
Silicato de magnesio	199.33 ^a	143.70 ^a	35.36 ^a	20.36 ^a

Anexo 60: Análisis de efectos simples de la variable absorción de fósforo foliar.

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	
Efectos simples				
Encalante en dosis				
Encalante en 0	1	0.04	0.04	n.s.
Encalante en 3.1	1	98.61	98.61	**
Encalante en 6.2	1	465.37	465.37	**
Encalante en 12.4	1	1047.20	1047.20	**
Dosis en encalante				
Dosis en dolomita	3	0.54	0.18	n.s.
Dosis en Sil. Mg	3	1255.3690	418.4563	**
Fuente de Fósforo en Dosis				
F. Fósforo en 0	1	0.3008	0.3008	n.s.
F. Fósforo en 3.1	1	24.6533	24.6533	**
F. Fósforo en 6.2	1	2.6882	2.6882	**
F. Fósforo en 12.4	1	1.0141	1.0141	n.s.
Dosis en fuente de fósforo				
Dosis en FDA	3	324.28	108.093	**
Dosis en ST	3	382.28	127.427	**
Encalante en Fuente de Fósforo				
Encalante en FDA	1	593.14	593.14	**
Encalante en ST	1	471.07	471.07	**
Error	29	5.73	0.19759	

Anexo 61: Análisis de efectos simples simples de la variable absorción de fósforo foliar.

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	
Efectos simples simples				
Encalante en niveles de dosis y fuente de fósforo				
Encalante en 0-FDA	1	0.06	0.06	n.s.
Encalante en 3.1-FDA	1	90.48	90.48	**
Encalante en 6.2-FDA	1	235.76	235.76	**
Encalante en 12.4-FDA	1	509.23	509.23	**
Encalante en 0-ST	1	1.66*10 ⁻³	1.66*10 ⁻³	n.s.
Encalante en 3.1-ST	1	20.54	20.54	**
Encalante en 6.2-ST	1	229.63	229.63	**
Encalante en 12.4-ST	1	543.40	543.40	**
Fuente de fósforo en niveles de encalante y dosis				
F. fósforo en Dolomita-0	1	0.240	0.240	n.s.
F. fósforo en S.Magnesio-0	1	0.082	0.082	n.s.
F.fósforo en Dolomita-3.1	1	1.042	1.042	n.s.
F.fósforo en S.Magnesio-3.1	1	36.015	36.015	**
F.fósforo en Dolomita-6.2	1	1.402	1.402	n.s.
F.fósforo en S.Magnesio-6.2	1	1.322	1.322	n.s.
F.fósforo en Dolomita-12.4	1	0.042	0.042	n.s.
F.fósforo en S.Magnesio-12.4	1	2.352	2.352	**
Dosis en niveles de encalante y fuente de fósforo				
Dosis en Dolomita-FDA	3	0.95	0.31667	n.s.
Dosis en S.Magnesio-FDA	3	584.17	194.723	**
Dosis en Dolomita-ST	3	0.76	0.2533	n.s.
Dosis en S.Magnesio-ST	3	714.90	238.3	**
Error	29	5.73	0.19759	

Anexo 62: Análisis de efectos simples de la variable absorción de fósforo radicular.

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	
Efectos simples				
Encalante en dosis				
Encalante en 0	1	0.006	0.006	n.s.
Encalante en 3.1	1	0.933	0.933	**
Encalante en 6.2	1	13.241	13.241	**
Encalante en 12.4	1	36.184	36.184	**
Dosis en encalante				
Dosis en dolomita	3	0.164	0.05467	**
Dosis en Sil. Mg	3	42.650	14.2167	**
Fuente de Fósforo en Dosis				
F. Fósforo en 0	1	0.00453	0.00453	n.s.
F. Fósforo en 3.1	1	0.47371	0.47371	**
F. Fósforo en 6.2	1	2.01295	2.01295	**
F. Fósforo en 12.4	1	0.90221	0.90221	**
Dosis en fuente de fósforo				
Dosis en FDA	3	14.6829	4.8943	**
Dosis en ST	3	9.0792	3.0264	**
Encalante en Fuente de Fósforo				
Encalante en FDA	1	21.2302	21.2302	**
Encalante en ST	1	7.8851	7.8851	**
Error	30	0.122	0.004	

Anexo 63: Análisis de efectos simples simples de la variable absorción de fósforo radicular.

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	
Efectos simples simples				
Encalante en niveles de dosis y fuente de fósforo				
Encalante en 0-FDA	1	0.0245	0.0245	*
Encalante en 3.1-FDA	1	0.6902	0.6902	**
Encalante en 6.2-FDA	1	12.5160	12.5160	**
Encalante en 12.4-FDA	1	27.7722	27.7722	**
Encalante en 0-ST	1	0.0024	0.0024	n.s.
Encalante en 3.1-ST	1	0.2863	0.2863	**
Encalante en 6.2-ST	1	2.5865	2.5865	**
Encalante en 12.4-ST	1	13.1858	13.1858	**
Fuente de fósforo en niveles de encalante y dosis				
F. fósforo en Dolomita-0	1	0.0030	0.0030	n.s.
F. fósforo en S.Magnesio-0	1	0.0226	0.0226	n.s.
F.fósforo en Dolomita-3.1	1	0.1435	0.1435	**
F.fósforo en S.Magnesio-3.1	1	0.3355	0.3355	**
F.fósforo en Dolomita-6.2	1	0.0015	0.0015	n.s.
F.fósforo en S.Magnesio-6.2	1	3.8731	3.8731	**
F.fósforo en Dolomita-12.4	1	0.0024	0.0024	n.s.
F.fósforo en S.Magnesio-12.4	1	1.6741	1.6741	**
Dosis en niveles de encalante y fuente de fósforo				
Dosis en Dolomita-FDA	3	0.1220	0.04067	**
Dosis en S.Magnesio-FDA	3	28.2060	9.402	**
Dosis en Dolomita-ST	3	0.1499	0.0499	**
Dosis en S.Magnesio-ST	3	16.2326	5.4109	**
Error	30	0.122	0.004	

Anexo 64: Comparaciones de los promedios de extracción de P obtenidos entre las dosis y evaluadas en los diferentes materiales encalantes.

Encalante	Dosis m-eq /100 g suelo	Extracción P foliar (mg/maceta)	Extracción P radicular (mg/maceta)
Dolomita	0	1.10 ^a	0.24 ^b
	3.1	1.08 ^a	0.21 ^b
	6.2	1.45 ^a	0.11 ^b
	12.4	1.28 ^a	0.34 ^a
Silicato de magnesio	0	0.98 ^d	0.29 ^d
	3.1	6.82 ^c	0.83 ^c
	6.2	15.38 ^b	2.21 ^b
	12.4	20.96 ^a	3.81 ^a

Anexo 65: Comparaciones de los promedios de extracción de P obtenidos entre los materiales encalantes y evaluadas en las diferentes dosis.

Encalante	Dosis m-eq /100 g suelo							
	Extracción P foliar (mg/maceta)				Extracción P radicular (mg/maceta)			
	0	3.1	6.2	12.4	0	3.1	6.2	12.4
Dolomita	1.10 ^a	1.08 ^b	1.45 ^b	1.28 ^b	0.24 ^a	0.21 ^b	0.11 ^b	0.34 ^b
Silicato de magnesio	0.98 ^a	6.82 ^a	15.38 ^a	20.96 ^a	0.29 ^a	0.83 ^a	2.21 ^a	3.81 ^a

Anexo 66: Comparaciones de los promedios de extracción de P obtenidos entre las fuentes de fósforo y evaluadas en los diferentes materiales encalantes.

Encalante	Fuente de fósforo			
	FDA		ST	
	Extracción P foliar (mg/maceta)		Extracción P radicular (mg/maceta)	
Dolomita	1.48 ^b	0.98 ^b	0.27 ^b	0.18 ^b
Silicato de magnesio	10.66 ^a	9.68 ^a	2.31 ^a	1.44 ^a

Anexo 67: Análisis de efectos simples de la variable absorción de potasio foliar.

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	
Efectos simples				
Encalante en dosis				
Encalante en 0	1	35	35	n.s.
Encalante en 3.1	1	8748	8748	**
Encalante en 6.2	1	266550	266550	**
Encalante en 12.4	1	245417	245417	**
Dosis en encalante				
Dosis en dolomita	3	266	88.667	n.s.
Dosis en Sil. Mg	3	412074	137358	**
Fuente de Fósforo en Dosis				
F. Fósforo en 0	1	181.7	181.7	n.s.
F. Fósforo en 3.1	1	12845.1	12845.1	**
F. Fósforo en 6.2	1	255.7	255.7	n.s.
F. Fósforo en 12.4	1	1716.0	1716.0	**
Dosis en fuente de fósforo				
Dosis en FDA	3	100249	33416.33	**
Dosis en ST	3	125956	41985.33	**
Error	29	2610	90	

Anexo 68: Análisis de efectos simples simples de la variable absorción de potasio foliar.

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	
Efectos simples simples				
Encalante en niveles de dosis y fuente de fósforo				
Encalante en 0-FDA	1	43	43	n.s.
Encalante en 3.1-FDA	1	10061	10061	**
Encalante en 6.2-FDA	1	100167	100167	**
Encalante en 12.4-FDA	1	137048	137048	**
Encalante en 0-ST	1	3	3	n.s.
Encalante en 3.1-ST	1	1022	1022	**
Encalante en 6.2-ST	1	176885	176885	**
Encalante en 12.4-ST	1	109161	109161	**
Fuente de fósforo en niveles de encalante y dosis				
F. fósforo en Dolomita-0	1	141.1	141.1	n.s.
F. fósforo en S.Magnesio-0	1	51.6	51.6	n.s.
F.fósforo en Dolomita-3.1	1	2641.8	2641.8	**
F.fósforo en S.Magnesio-3.1	1	10888.9	10888.9	**
F.fósforo en Dolomita-6.2	1	2057.2	2057.2	**
F.fósforo en S.Magnesio-6.2	1	365.4	365.4	n.s.
F.fósforo en Dolomita-12.4	1	88.2	88.2	n.s.
F.fósforo en S.Magnesio-12.4	1	2420	2420	**
Dosis en niveles de encalante y fuente de fósforo				
Dosis en Dolomita-FDA	3	1470	490	**
Dosis en S.Magnesio-FDA	3	186964	62321.33	**
Dosis en Dolomita-ST	3	242	80.667	n.s.
Dosis en S.Magnesio-ST	3	245080	81693.33	**
Error	29	2610	90	

Anexo 69: Análisis de efectos simples de la variable absorción de potasio radicular.

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	
Efectos simples				
Encalante en dosis				
Encalante en 0	1	0.04	0.04	n.s.
Encalante en 3.1	1	15.67	15.67	**
Encalante en 6.2	1	270.32	270.32	**
Encalante en 12.4	1	599.62	599.62	**
Dosis en encalante				
Dosis en dolomita	3	1.35	0.45	**
Dosis en Sil. Mg	3	757.36	252.453	**
Fuente de Fósforo en Dosis				
F. Fósforo en 0	1	0.048	0.048	n.s.
F. Fósforo en 3.1	1	9.933	9.933	**
F. Fósforo en 6.2	1	18.710	18.710	**
F. Fósforo en 12.4	1	60.961	60.961	**
Dosis en fuente de fósforo				
Dosis en FDA	3	314.765	104.922	**
Dosis en ST	3	126.632	42.211	**
Encalante en Fuente de Fósforo				
Encalante en FDA	1	421.01	421.01	**
Encalante en ST	1	131.20	131.20	**
Error	29	1.62	0.0559	

Anexo 70: Análisis de efectos simples simples de la variable absorción de potasio radicular.

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	
Efectos simples simples				
Encalante en niveles de dosis y fuente de fósforo				
Encalante en 0-FDA	1	0.22	0.22	n.s.
Encalante en 3.1-FDA	1	12.78	12.78	**
Encalante en 6.2-FDA	1	197.10	197.10	**
Encalante en 12.4-FDA	1	482.38	482.38	**
Encalante en 0-ST	1	0.03	0.03	n.s.
Encalante en 3.1-ST	1	3.77	3.77	**
Encalante en 6.2-ST	1	80.39	80.39	**
Encalante en 12.4-ST	1	148.23	148.23	**
Fuente de fósforo en niveles de encalante y dosis				
F. fósforo en Dolomita-0	1	0.028	0.028	n.s.
F. fósforo en S.Magnesio-0	1	0.226	0.226	n.s.
F.fósforo en Dolomita-3.1	1	1.784	1.784	**
F.fósforo en S.Magnesio-3.1	1	9.203	9.203	**
F.fósforo en Dolomita-6.2	1	0.015	0.015	n.s.
F.fósforo en S.Magnesio-6.2	1	34.947	34.947	**
F.fósforo en Dolomita-12.4	1	0.112	0.112	n.s.
F.fósforo en S.Magnesio-12.4	1	116.087	116.087	**
Dosis en niveles de encalante y fuente de fósforo				
Dosis en Dolomita-FDA	3	1.45	0.4833	**
Dosis en S.Magnesio-FDA	3	556.65	185.55	**
Dosis en Dolomita-ST	3	1.71	0.57	**
Dosis en S.Magnesio-ST	3	226.13	75.3767	**
Error	29	1.62	0.0559	

Anexo 71: Comparaciones de los promedios de extracción de K obtenidos entre las dosis y evaluadas en los diferentes materiales encalantes.

Encalante	Dosis m-eq /100 g suelo	Extracción K foliar (mg/maceta)	Extracción K radicular (mg/maceta)
Dolomita	0	26.58 ^a	0.85 ^{ab}
	3.1	32.55 ^a	0.94 ^{ab}
	6.2	32.02 ^a	0.63 ^b
	12.4	24.90 ^a	1.29 ^a
Silicato de magnesio	0	23.17 ^d	0.97 ^d
	3.1	92.93 ^c	3.09 ^c
	6.2	349.92 ^a	10.16 ^b
	12.4	310.92 ^b	15.30 ^a

Anexo 72: Comparaciones de los promedios de extracción de K obtenidos entre los materiales encalantes y evaluadas en las diferentes dosis.

Encalante	Dosis m-eq /100 g suelo							
	Extracción K foliar (mg/maceta)				Extracción K radicular (mg/maceta)			
	0	3.1	6.2	12.4	0	3.1	6.2	12.4
Dolomita	26.58 ^a	32.55 ^b	32.02	24.90 ^b	0.85 ^a	0.94 ^b	0.63 ^b	1.29 ^b
Silicato de magnesio	23.17 ^a	92.93 ^a	349.92 ^a	310.92 ^a	0.97 ^a	3.09 ^a	10.16 ^a	15.30 ^a

Anexo 73: Comparaciones de los promedios de extracción de K obtenidos entre las fuentes de fósforo y evaluadas en los diferentes materiales encalantes.

Encalante	Fuente de fósforo	
	FDA	ST
	Extracción K radicular (mg/maceta)	
Dolomita	1.00 ^b	0.86 ^b
Silicato de magnesio	9.13 ^a	5.53 ^a

Anexo 74: Análisis de efectos simples de la variable absorción de magnesio foliar.

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	
Efectos simples				
Encalante en dosis				
Encalante en 0	1	0.9	0.9	n.s.
Encalante en 3.1	1	1073.8	1073.8	**
Encalante en 6.2	1	14448.5	14448.5	**
Encalante en 12.4	1	21122.7	21122.7	**
Dosis en encalante				
Dosis en dolomita	3	25.6	8.5333	n.s.
Dosis en Sil. Mg	3	29789.6	9929.867	**
Fuente de Fósforo en Dosis				
F. Fósforo en 0	1	0.70	0.70	n.s.
F. Fósforo en 3.1	1	177.85	177.85	**
F. Fósforo en 6.2	1	5.04	5.04	n.s.
F. Fósforo en 12.4	1	1863.26	1863.26	**
Dosis en fuente de fósforo				
Dosis en FDA	3	12177.3	4059.1	**
Dosis en ST	3	6034.5	2011.5	**
Encalante en Fuente de Fósforo				
Encalante en FDA	1	14568.2	14568.2	**
Encalante en ST	1	8649.3	8649.3	**
Error	29	101	3.483	

Anexo 75: Análisis de efectos simples simples de la variable absorción de magnesio foliar.

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	
Efectos simples simples				
Encalante en niveles de dosis y fuente de fósforo				
Encalante en 0-FDA	1	0.96	0.96	n.s.
Encalante en 3.1-FDA	1	598.5	598.5	**
Encalante en 6.2-FDA	1	7038.4	7038.4	**
Encalante en 12.4-FDA	1	19198.7	19198.7	**
Encalante en 0-ST	1	0.1	0.1	n.s.
Encalante en 3.1-ST	1	475.3	475.3	**
Encalante en 6.2-ST	1	7435.6	7435.6	**
Encalante en 12.4-ST	1	5049.2	5049.2	**
Fuente de fósforo en niveles de encalante y dosis				
F. fósforo en Dolomita-0	1	0.81	0.81	n.s.
F. fósforo en S.Magnesio-0	1	0.08	0.08	n.s.
F.fósforo en Dolomita-3.1	1	52.22	52.22	**
F.fósforo en S.Magnesio-3.1	1	130.63	130.63	**
F.fósforo en Dolomita-6.2	1	20.91	20.91	n.s.
F.fósforo en S.Magnesio-6.2	1	50.44	50.44	**
F.fósforo en Dolomita-12.4	1	7.94	7.94	n.s.
F.fósforo en S.Magnesio-12.4	1	3068.39	3068.39	**
Dosis en niveles de encalante y fuente de fósforo				
Dosis en Dolomita-FDA	3	40.1	13.367	*
Dosis en S.Magnesio-FDA	3	23070.7	7690.23	**
Dosis en Dolomita-ST	3	7.1	2.3667	n.s.
Dosis en S.Magnesio-ST	3	10555.0	3518.33	**
Error	29	101	3.483	

Anexo 76: Análisis de efectos simples de la variable absorción de magnesio radicular.

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	
Efectos simples				
Encalante en dosis				
Encalante en 0	1	0.009	0.009	n.s.
Encalante en 3.1	1	2.169	2.169	**
Encalante en 6.2	1	34.521	34.521	**
Encalante en 12.4	1	82.484	82.484	**
Dosis en encalante				
Dosis en dolomita	3	0.333	0.111	**
Dosis en Sil. Mg	3	102.110	34.037	**
Fuente de Fósforo en Dosis				
F. Fósforo en 0	1	0.0042	0.0042	n.s.
F. Fósforo en 3.1	1	0.6189	0.6189	**
F. Fósforo en 6.2	1	1.5949	1.5949	**
F. Fósforo en 12.4	1	3.3806	3.3806	**
Dosis en fuente de fósforo				
Dosis en FDA	3	37.958	12.653	**
Dosis en ST	3	22.047	7.349	**
Encalante en Fuente de Fósforo				
Encalante en FDA	1	50.376	50.376	**
Encalante en ST	1	20.519	20.519	**
Error	29	0.229	0.007897	

Anexo 77: Análisis de efectos simples simples de la variable absorción de magnesio radicular.

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	
Efectos simples simples				
Encalante en niveles de dosis y fuente de fósforo				
Encalante en 0-FDA	1	0.038	0.038	n.s.
Encalante en 3.1-FDA	1	1.510	1.510	**
Encalante en 6.2-FDA	1	27.287	27.287	**
Encalante en 12.4-FDA	1	54.632	54.632	**
Encalante en 0-ST	1	0.004	0.004	n.s.
Encalante en 3.1-ST	1	0.730	0.730	**
Encalante en 6.2-ST	1	9.520	9.520	**
Encalante en 12.4-ST	1	28.722	28.722	**
Fuente de fósforo en niveles de encalante y dosis				
F. fósforo en Dolomita-0	1	0.0067	0.0067	n.s.
F. fósforo en S.Magnesio-0	1	0.0303	0.0303	n.s.
F.fósforo en Dolomita-3.1	1	0.1702	0.1702	**
F.fósforo en S.Magnesio-3.1	1	0.4608	0.4608	**
F.fósforo en Dolomita-6.2	1	0.0310	0.0310	n.s.
F.fósforo en S.Magnesio-6.2	1	3.8500	3.8500	**
F.fósforo en Dolomita-12.4	1	0.0054	0.0054	n.s.
F.fósforo en S.Magnesio-12.4	1	6.4127	6.4127	**
Dosis en niveles de encalante y fuente de fósforo				
Dosis en Dolomita-FDA	3	0.255	0.085	**
Dosis en S.Magnesio-FDA	3	65.831	21.9437	**
Dosis en Dolomita-ST	3	0.289	0.0963	**
Dosis en S.Magnesio-ST	3	37.932	12.644	**
Error	29	0.229	0.007897	

Anexo 78: Comparaciones de los promedios de extracción de Mg obtenidos entre las dosis y evaluadas en los diferentes materiales encalantes.

Encalante	Dosis m-eq /100 g suelo	Extracción Mg foliar (mg/maceta)	Extracción Mg radicular (mg/maceta)
Dolomita	0	4.70 ^a	0.31 ^b
	3.1	7.12 ^a	0.32 ^b
	6.2	6.70 ^a	0.25 ^b
	12.4	7.28 ^a	0.55 ^a
Silicato de magnesio	0	4.15 ^d	0.36 ^d
	3.1	26.14 ^c	1.27 ^c
	6.2	79.66 ^b	3.64 ^b
	12.4	101.34 ^a	5.89 ^a

Anexo 79: Comparaciones de los promedios de extracción de Mg obtenidos entre los materiales encalantes y evaluadas en las diferentes dosis.

Encalante	Dosis m-eq /100 g suelo							
	Extracción Mg foliar (mg/maceta)				Extracción Mg radicular (mg/maceta)			
	0	3.1	6.2	12.4	0	3.1	6.2	12.4
Dolomita	4.70 ^a	7.12 ^b	6.70 ^b	7.28 ^b	0.31 ^a	0.32 ^b	0.25 ^b	0.55 ^b
Silicato de magnesio	4.15 ^a	26.14 ^a	79.66 ^a	101.34 ^a	0.36 ^a	1.27 ^a	3.64 ^a	5.89 ^a

Anexo 80: Comparaciones de los promedios de extracción de Mg obtenidos entre las fuentes de fósforo y evaluadas en los diferentes materiales encalantes.

Encalante	Fuente de fósforo			
	FDA		ST	
	Extracción Mg foliar (mg/maceta)		Extracción Mg radicular (mg/maceta)	
Dolomita	8.03 ^b	4.87 ^b	0.36 ^b	0.35 ^b
Silicato de magnesio	61.23 ^a	38.71 ^a	3.24 ^a	2.37 ^a

Anexo 81: Análisis de efectos simples de la variable absorción de calcio foliar.

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	
Efectos simples				
Encalante en dosis				
Encalante en 0	1	15.4	15.4	n.s.
Encalante en 3.1	1	1352.8	1352.8	**
Encalante en 6.2	1	26021.5	26021.5	**
Encalante en 12.4	1	20941.8	20941.8	**
Dosis en encalante				
Dosis en dolomita	3	27	9	n.s.
Dosis en Sil. Mg	3	37623	12541	**
Fuente de Fósforo en Dosis				
F. Fósforo en 0	1	1.92	1.92	n.s.
F. Fósforo en 3.1	1	867.16	867.16	**
F. Fósforo en 6.2	1	156.96	156.96	*
F. Fósforo en 12.4	1	586.60	586.60	**
Dosis en fuente de fósforo				
Dosis en FDA	3	11322.6	3774.2	**
Dosis en ST	3	8678.6	2892.867	**
Error	30	627	20.89	

Anexo 82: Análisis de efectos simples de la variable absorción de calcio radicular.

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	
Efectos simples				
Encalante en dosis				
Encalante en 0	1	0.06	0.06	n.s.
Encalante en 3.1	1	24.01	24.01	**
Encalante en 6.2	1	352.30	352.30	**
Encalante en 12.4	1	295.66	295.66	**
Dosis en encalante				
Dosis en dolomita	3	1.97	0.6567	**
Dosis en Sil. Mg	3	543.88	181.293	**
Fuente de Fósforo en Dosis				
F. Fósforo en 0	1	0.1203	0.1203	n.s.
F. Fósforo en 3.1	1	10.8964	10.8964	**
F. Fósforo en 6.2	1	20.0191	20.0191	**
F. Fósforo en 12.4	1	12.7864	12.7864	**
Dosis en fuente de fósforo				
Dosis en FDA	3	206.17	68.723	**
Dosis en ST	3	110.03	36.677	**
Encalante en Fuente de Fósforo				
Encalante en FDA	1	330.87	330.87	**
Encalante en ST	1	130.10	130.10	**
Error	30	1.43	0.04767	

Anexo 83: Análisis de efectos simples simples de la variable absorción de calcio radicular.

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	
Efectos simples simples				
Encalante en niveles de dosis y fuente de fósforo				
Encalante en 0-FDA	1	0.247	0.247	n.s.
Encalante en 3.1-FDA	1	19.471	19.471	**
Encalante en 6.2-FDA	1	265.351	265.351	**
Encalante en 12.4-FDA	1	212.556	212.556	**
Encalante en 0-ST	1	0.021	0.021	n.s.
Encalante en 3.1-ST	1	6.336	6.336	**
Encalante en 6.2-ST	1	105.156	105.156	**
Encalante en 12.4-ST	1	94.823	94.823	**
Fuente de fósforo en niveles de encalante y dosis				
F. fósforo en Dolomita-0	1	0.006	0.006	n.s.
F. fósforo en S.Magnesio-0	1	0.320	0.320	n.s.
F.fósforo en Dolomita-3.1	1	1.922	1.922	**
F.fósforo en S.Magnesio-3.1	1	10.770	10.770	**
F.fósforo en Dolomita-6.2	1	0.021	0.021	n.s.
F.fósforo en S.Magnesio-6.2	1	38.208	38.208	**
F.fósforo en Dolomita-12.4	1	0.014	0.014	n.s.
F.fósforo en S.Magnesio-12.4	1	20.413	20.413	**
Dosis en niveles de encalante y fuente de fósforo				
Dosis en Dolomita-FDA	3	1.75	0.5833	**
Dosis en S.Magnesio-FDA	3	377.06	125.687	**
Dosis en Dolomita-ST	3	1.56	0.52	**
Dosis en S.Magnesio-ST	3	185.22	61.74	**
Error	30	1.43	0.04767	

Anexo 84: Comparaciones de los promedios de extracción de Ca obtenidos entre las dosis y evaluadas en los diferentes materiales encalantes.

Encalante	Dosis	Extracción Ca radicular (mg/maceta)
	m-eq /100 g suelo	
Dolomita	0	0.72 ^b
	3.1	1.01 ^{ab}
	6.2	0.89 ^b
	12.4	1.49 ^a
Silicato de magnesio	0	0.86 ^d
	3.1	3.84 ^c
	6.2	11.73 ^b
	12.4	12.59 ^a

Anexo 85: Comparaciones de los promedios de extracción de Ca obtenidos entre los materiales encalantes y evaluadas en las diferentes dosis.

Encalante	Dosis m-eq /100 g suelo			
	Extracción Ca radicular (mg/maceta)			
	0	3.1	6.2	12.4
Dolomita	0.72 ^a	1.01 ^b	0.89 ^b	1.49 ^b
Silicato de magnesio	0.86 ^a	3.84 ^a	11.73 ^a	12.59 ^a