

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE AGRONOMÍA



**“ESCORIA BÁSICA Y CARBONATO DE CALCIO EN LA
RECUPERACIÓN DE UN SUELO ÁCIDO DE TINGO MARÍA, EN
MAÍZ (*Zea mays*) PM 213 EN INVERNADERO”**

Presentado por:

KATERIN MANUELITA ENCINA OLIVA

TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE

INGENIERO AGRÓNOMO

Lima – Perú

2017

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE AGRONOMIA

**“ESCORIA BÁSICA Y CARBONATO DE CALCIO EN LA
RECUPERACIÓN DE UN SUELO ÁCIDO DE TINGO MARÍA, EN
MAÍZ (*Zea mays*) PM 213 EN INVERNADERO”**

Tesis para optar el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO

KATERIN MANUELITA ENCINA OLIVA

Sustentada y Aprobada ante el siguiente jurado:

Ing. Mg. Sc. Luis Beingolea Peña
PRESIDENTE

Ing. Mg. Sc. Luis Tomassini Vidal
ASESOR

Dr. Oscar Loli Figueroa
MIEMBRO

Ing. Mg. Sc. Braulio La Torre Martínez
MIEMBRO

2017

Dedicatoria

A mis padres Emerita, Amir e Inés, infinitas gracias por su apoyo incondicional. A mis lindas hermanas Rocio, Marlin, Xhyamira, Zhenny y Diana por ser mi motivo para ser una mejor persona. A la señora Elvira por su apoyo, sus enseñanzas y su amistad. A Franco por su apoyo, por ser mi motor, mi fortaleza, mi amigo y mi amor.

AGRADECIMIENTO

A mi asesor Mg. Sc. Luis Tomassini vidal, gracias por su paciencia, enseñanzas y amistad.

A los profesores Sady García, Ruby Vega.

A mis amigos Carlos, Fernando, Tomás, Luz, Carla, Flor, Midori, Melissa

A los señores Claudio, Duberlis, Mario y Oscar.

Al Círculo de investigación en suelos (CIS) porque ahí nació mi amor por la ciencia del suelo.

Al departamento de suelos y al laboratorio de análisis de suelos, plantas, agua y fertilizantes.

ÍNDICE GENERAL

I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1 SUELOS ÁCIDOS.....	3
2.1.1 Origen de la acidez del suelo.....	3
2.1.2 Fuentes de acidez en los suelos	3
2.1.3 Tipos de acidez en el suelo.....	5
2.1.4 Efectos de la acidez en el suelo.....	7
2.1.5 El pH y la asimilabilidad de los nutrientes.....	10
2.1.6 Rangos de concentraciones de nutrientes en planta de maíz.....	10
2.2 ESCORIA BÁSICA	11
2.2.1 Proceso de producción de escoria de acero. (FEEDCOR, 2012)	12
2.2.2 Características de la escoria de acero	13
2.2.3 Características de encalado con la escoria de acero	15
2.2.4 Aplicación de escoria de acero a tierra agrícola.....	16
2.3 ENCALADO DE LOS SUELOS	17
2.3.1 Fuentes de materiales de encalado	17
2.3.2 Calidad de los materiales encalantes.....	18
2.3.3 Determinación de los requerimientos de cal y materiales usados.	19
2.3.4 Experiencia en el uso de enmiendas calcáreas.	20
III. MATERIALES Y MÉTODOS	22
3.1 UBICACIÓN DEL CAMPO EXPERIMENTAL:	22
3.2 MATERIALES Y EQUIPOS.....	22
3.2.1 Insumos	22
3.2.2 Materiales.....	23
3.2.3 Equipos.....	23

3.3	MÉTODO Y PROCEDIMIENTO	23
3.3.1	Muestreo de suelo.....	23
3.3.2	Análisis de caracterización.....	24
3.3.3	Análisis de la escoria básica.....	25
3.3.4	Fase de macetería	25
3.3.5	Evaluaciones realizadas.....	26
3.4	DISEÑO EXPERIMENTAL.....	27
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	28
4.1	EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS EN EL SUELO	28
4.1.1	Valores medios del pH del suelo.....	29
4.1.2	Valores medios de la acidez cambiable.....	30
4.1.3	Valores medios del aluminio cambiable	31
4.2	EVALUACIÓN DEL TALLO DE LA PLANTA Y LA MATERIA SECA (PARTE AÉREA).....	32
4.2.1	Valores medios del diámetro.....	32
4.2.2	Valores medios de la altura.	34
4.2.3	Valores medios del peso fresco	35
4.2.4	Valores medios del peso seco.....	36
4.3	ANÁLISIS DE EXTRACTO FOLIAR.....	37
4.3.1	Concentración de N en la materia seca	38
4.3.2	Concentración de fósforo en la materia seca.....	40
4.3.3	Concentración de potasio en la materia seca.....	41
4.3.4	Concentración de calcio en la materia seca.....	43
4.3.5	Concentración de magnesio en la materia seca	45
V.	CONCLUSIONES.....	47
VI.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
VII.	ANEXOS	52

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Concentraciones de nutrientes en plantas de maíz antes de la Floración.....	11
Tabla 2. Distribución de tamaño de partícula (% en peso) de escorias de acero de diversos estudios.....	14
Tabla 3. Característica química de la escoria de acero.....	15
Tabla 4. Características físicas – químicas del suelo analizado.....	24
Tabla 5. Análisis de la escoria básica.....	25
Tabla 6. Niveles de material encalante.....	26
Tabla 7. Valores medios del pH, y acidez cambiante y aluminio cambiante....	28
Tabla 8. Valores medios del diámetro, altura, peso fresco y peso seco de la planta obtenidos con la aplicación de cada enmienda en dosis crecientes de 0 a 3.0 meq/100g de suelo.....	32
Tabla 9. Valores medios de los tratamientos para porcentaje de N, P, K, Ca y Mg.....	37

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Distribución porcentual de las formas de Al en una solución de acuerdo al Ph.....	9
Figura 2. Influencia del pH sobre la disponibilidad de nutrientes; “diagrama de Troug”.....	10
Figura 3. Producción de escoria en una planta moderna de acero.....	13
Figura 4. Promedios de los tratamientos de la reacción del suelo.....	29
Figura 5. Promedios de los tratamientos de la acidez cambiante.....	30
Figura 6. Promedios del aluminio intercambiable.....	31
Figura 7. Valores promedios de los tratamientos para diámetro de planta.....	33
Figura 8. Valores promedios de los tratamientos para altura de planta.....	34
Figura 9. Valores promedios de los tratamientos para peso fresco.....	35
Figura 10. Valores promedios de los tratamientos para peso seco.....	36
Figura 11. Valores promedios de las concentraciones de nitrógeno en la materia seca.....	38
Figura 12. Extracción total de N en la materia seca de la planta.....	38
Figura 13. Valores promedios de las concentraciones de fósforo en la materia seca..	40
Figura 14. Extracción total de P en la materia seca de la planta.....	40
Figura 15. Valores promedios de las concentraciones de potasio en la materia seca..	41
Figura 16. Extracción total de K en la materia seca de la planta.....	42
Figura 17. Valores promedios de las concentraciones de calcio en la materia seca...	43
Figura 18. Extracción total de Ca en la materia seca de la planta.....	43
Figura 19. Valores promedios de las concentraciones de magnesio en la materia seca.....	45
Figura 20. Extracción total de Mg en la materia seca de la planta.....	45

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Resumen del análisis de varianza para reacción del suelo y acidez cambiable.....	52
Anexo 2. Efecto de los niveles de encalado de la enmienda carbonato de calcio en el cultivo de maíz.....	53
Anexo 3. Efecto de los niveles de encalado de la enmienda Escoria básica en el cultivo de maíz.....	53
Anexo 4. Efecto de los niveles de encalado a una dosis de 0.5 meq/100g para ambas enmiendas.....	54
Anexo 5. Efecto de los niveles de encalado a una dosis de 1.0 meq/100 para ambas enmiendas.....	54
Anexo 6. Efecto de los niveles de encalado a una dosis de 1.5 meq/100 para ambas enmiendas.....	55
Anexo 7. Efecto de los niveles de encalado a una dosis de 2.0 meq/100 para ambas enmiendas.....	55
Anexo 8. Efecto de los niveles de encalado a una dosis de 2.5 meq/100 para ambas enmiendas.....	56
Anexo 9. Efecto de los niveles de encalado a una dosis de 3.0 meq/100 para ambas enmiendas.....	56

RESUMEN

El objetivo de presente trabajo, el cual se llevó a cabo en el invernadero del ambiente de Fertilidad de suelo de la Universidad Nacional Agraria la Molina, fue evaluar el efecto del encalado con carbonato de calcio y escoria básica en un suelo básico de Tingo María, en maíz (*Zea mays*) PM 213 en invernadero.

Cada una de las dos fuentes encalantes utilizadas fueron aplicadas en dosis crecientes de 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5 y 3.0 meq/100 g de suelo en macetas de 3 kilos, para posteriormente ser incubada al 80% de su capacidad de campo por un espacio de 45 días. En cuanto a la fertilización mineral se utilizó como fertilizantes UREA, Superfosfato Triple y Cloruro de Potasio, con dosis de 200-400-150 ppm por maceta respectivamente; siendo el superfosfato simple y cloruro de potasio aplicados antes de la siembra, mientras que la úrea se aplicó en 3 dosis. El diseño experimental empleado fue el Completamente al azar con 13 tratamientos y 3 repeticiones.

Los resultados obtenidos nos mostraron los efectos del encalado en el suelo, se encontró diferencias significativas para la reacción del suelo, acidez cambiante y aluminio cambiante; obteniendo en el primer caso mayores valores de pH a mayor dosis encalante, lo contrario ocurre con los siguientes dos casos. Para el caso de la biomasa, no se encontraron diferencias significativas para los parámetros diámetro de planta y peso fresco, mientras que para los casos de altura de planta y peso seco si se encontraron diferencias significativas, siendo el tratamiento con mayor dosis encalante con escoria el que obtuvo el mejor resultado en ambos casos. Finalmente en cuando al porcentaje de nutrientes en la parte aérea de la planta, no se encontraron diferencias estadísticas significativas para %N, %P y %Mg; mientras que para %K se obtuvo diferencia significativas, siendo superior el tratamiento testigo, y para el caso de %Ca fue superior estadísticamente el tratamiento con 2.0meq/100g de suelo correspondiente a la enmienda carbonato de calcio.

I. INTRODUCCIÓN

En nuestro país se estima que más del 60% de su área total tiene condiciones climáticas tropicales, donde predominan los suelos de reacción ácida, los mismos que en su mayoría están clasificados dentro del orden de los Ultisoles (Benites J, 1981 y Sánchez P y Benites J, 1983). Estos son pobres en fósforo, calcio, magnesio y potasio, fundamentales para la nutrición vegetal y aun cuando puedan tener altos contenidos de materia orgánica, los niveles de fósforo y nitrógeno disponibles son también bajos, debido a problemas en la mineralización de la misma. Contrariamente tienen altas concentraciones de aluminio, hierro y en algunos casos manganeso, lo que provoca toxicidades para la mayoría de especies anuales comúnmente cultivadas como son el maíz, el arroz, la soya, menestras, etc., así como frutales y cultivos permanentes comerciales, los cuales al ser sembrados en estas condiciones tienen un deficiente desarrollo y baja o nula producción.

Una de las formas y la más importante de atenuar el efecto del pH en los suelos ácidos es la aplicación de enmiendas calcáreas, esto debido al efecto neutralizante de los cationes de Al^{3+} activo, principal causante de la fijación del fósforo. La elevación del pH mediante el encalado conlleva a un aumento de la concentración y la actividad de iones OH^- en la solución promoviendo la precipitación del aluminio.

En ese marco, las escorias básicas, subproducto de la producción de acero son alternativas para mejorar los suelos ácidos pues son portadoras de silicatos de calcio y magnesio. Esta condición les posibilita ser usados como enmienda agrícola en varios países de Europa y también en América, sobre todo en Argentina principalmente en campos de cultivo con maíz, cebada, trigo, avena y soya pues no solo actúa como enmienda, sino también contiene y aporta variadas concentraciones de nutrientes para las plantas como P S, Fe u Mn. Además de silicatos de calcio y magnesio, producen beneficios adicionales en las plantas, por la mayor resistencia a enfermedades a hongos y actinomicetos (Damalso, 2005)

Teniendo en cuenta la necesidad de continuar con las investigaciones en los suelos de nuestro país y por las consideraciones expuestas, se realizó el presente trabajo de investigación en un suelo ácido de Tingo María con el objetivo de obtener información sobre el efecto de la escoria en los suelos de nuestro país.

OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

- Efecto de la aplicación de 6 niveles de escoria y CaCO_3 en el suelo ácido (pH, acidez cambiante y aluminio cambiante).
- Efecto de la aplicación de 6 niveles de escoria y CaCO_3 en el rendimiento de materia seca (parte aérea), diámetro de planta, altura de planta de maíz en los tratamientos probados (en invernadero).
- Efecto de la aplicación de 6 niveles de escoria básica y CaCO_3 en la composición nutricional N-P-K, Ca y Mg en la parte aérea de planta de maíz en los tratamientos probados.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 SUELOS ÁCIDOS

2.1.1 Origen de la acidez del suelo

La acidificación de los suelos es un proceso natural involuntario en la formación del suelo, que alcanza su máxima expresión en las regiones húmedas donde la lluvia es suficiente para lixiviar a fondo el perfil del suelo. No es sorprendente que la acidez sea una de las principales limitaciones para la producción de cultivos en estas áreas.

Los bosques, que constituyen la vegetación natural en la mayoría de las regiones húmedas, son generalmente mejor adaptados a suelos ácidos. Sin embargo, la salud del bosque ha disminuido debido a que el suelo es incapaz de resistir los efectos de la acidificación de los suelos inducidos por el hombre (Brady, 2008). Además, Buckman (1977) menciona que la acidez del suelo es común en todas las regiones donde la precipitación es alta, lo suficiente para lixiviar apreciables cantidades de bases intercambiables de los niveles superficiales de los suelos. Tan esparcida es su presencia y tan marcada es su influencia sobre las plantas que ha llegado a ser una de las propiedades más estudiadas de los suelos.

2.1.2 Fuentes de acidez en los suelos

La acidificación del suelo es un proceso espontáneo que se da durante la pedogénesis. Durante ella ocurre una continua meteorización química, la cual consiste en una pérdida de cationes alcalino y alcalinotérreos (K^+ , Na^+ , Mg^{2+}) e incremento constante de cationes metálicos (Al^{3+} , Fe^{3+} , Mn^{2+}) que pueden sufrir hidrólisis ácida (Zapata, 2004)

Bohn (2002), menciona que la fertilización de cultivos también produce acidez sustancial en el suelo. El uso continuo de fertilizantes de amoníaco puede provocar condiciones ácidas mediante la intervención de los microorganismos que propician la siguiente reacción:



Además, este mismo autor afirma que la acidez se produce por residuos vegetales o desperdicios orgánicos que se descomponen en condiciones un tanto reductoras, propiciando la formación de ácidos orgánicos, los cuales generan en parte la disolución y movimiento del hierro, aluminio y manganeso a través del perfil del suelo, por tanto, la quelación o formación de complejos por las moléculas orgánicas solubles también contribuyen al transporte de metales a través de suelo.

Aguilar (1994). Menciona que la acidez del suelo es el resultado de 7 causas principales:

1. Material parental según su relación Al: (Ca + Mg + K).
2. Lixiviación de bases intercambiables del suelo
3. Remoción de Ca, Mg y K por los cultivos
4. Descomposición de la materia orgánica del suelo
5. Uso de fertilizantes
6. Acidez generada por las raíces de las plantas
7. Lluvia ácida.

Además menciona que la acidez de los suelos proviene de diferentes fuentes que pueden ceder protones:

- Grupos ácidos de los minerales arcillosos.
- Grupos ácidos de la materia orgánica.
- Ácidos solubles

Por titulación se puede determinar la cantidad e intensidad de la acidez de estas fuentes. Cuanto más alto es el pH en el que un ácido es neutralizado, tanto más débil es el grupo ácido y más fuerte es el enlace de H o del protón al “cambiador”.

Desde la química se puede decir que la acidificación de los suelos resulta de la disminución de la capacidad neutralizante de acidez del suelo, como consecuencia de una transferencia irreversible en un sistema abierto de protones desde la fase líquida hacia la fase sólida, que actúa como sumidero (Zapata, 2004).

Según Pasu y Gautheyrou (2006), la arcilla puede someterse a hidrólisis (Acidólisis, acidocomplexólisis) que provoca la desestabilización de las 02:01 celosías, lo que resulta en algunos de los cationes Al^{3+} de la capa octaédrica que pasa en posiciones intercambiables. Así los cationes intercambiables de superficie disminuyen gradualmente y el aluminio domina las cargas negativas, el pH del suelo cae hacia 4,0 y fenómenos de disolución no congruente puede ocurrir.

2.1.3 Tipos de acidez en el suelo

En los suelos se distinguen la acidez actual y la acidez total o potencial. La primera se expresa por la concentración de iones H^+ actualmente disociados en la solución suelo y se expresa por el pH. La segunda corresponde a los iones H^+ de cambio adsorbidos (o al Al^{3+} que libera iones H^+) que se disocian progresivamente en la solución suelo. Por lo tanto mientras más bajo sea el pH menos de 6 más desaturado será el complejo adsorbente (Zavaleta, 1992).

Por otro lado, Brady (2008), clasifica a la acidez del suelo de la siguiente manera:

- Acidez activa. La acidez activa está definida por la actividad del ion H^+ en la solución suelo. Espinoza y Molina (199), mencionan que la acidez activa está representado por el H^+ disociado en la solución del suelo y provenientes de diferentes fuentes. Esta acidez es pequeña comparada con la acidez intercambiable y residual. Se mide por el pH del suelo.

- Acidez cambiabile, también llamada acidez intercambiable. Es la acidez reemplazable y está asociado al Al^{+3} intercambiable y al ion H^+ que están presentes en gran cantidad en el suelo ácido. Estos iones cambiables están retenidos en los colides del suelo por fuerzas electrostáticas (Espinoza y Molina 199). Pratt y Bair (1962), mencionan que la acidez intercambiable como una proporción de la acidez total varía con la naturaleza del suelo y de la saturación de bases por ciento. Entre los minerales de arcilla, la proporción de intercambio acidez / acidez total es mayor para montmorillonita, intermedio para las vermiculitas dioctaédricas, y la más baja de los minerales de caolinita. La relación en algunas vermiculitas trioctaédricas parece ser bastante baja.

- Acidez no intercambiable, también llamado acidez residual. La acidez activa e intercambiable representan solo una fracción del total de la acidez del suelo. La acidez residual restante es generalmente asociado con los iones hidrógeno y aluminio; incluyendo iones de hidróxido de aluminio ($AlOH^{+2}$ y $AlOH_2^+$) están atados en forma no intercambiable por la materia orgánica y las arcillas. Los iones se encuentran unidos mediante enlaces covalentes en la superficie de los minerales arcillosos de carga variable.

- Acidez total, también llamada acidez potencial o titulable. Es la suma de la acidez intercambiable más la acidez no intercambiable. Para la mayoría de suelos la acidez total es la que se debe superar para elevar el pH de suelo hasta un valor dado, se puede definir como:

$$\text{Acidez total} = \text{acidez activa} + \text{acidez intercambiable} + \text{acidez residual}$$

Bernier y Alfaro (2006) clasifican la acidez del suelo como: Acidez activa, acidez intercambiable, acidez no intercambiable y acidez potencial. Este último, mencionan que resulta de la acidez intercambiable más la acidez no intercambiable.

Por otro lado, Zapata (2004) clasifica la acidez del suelo en función a 3 factores:

- Intensidad. Representada por el pH, que es la medida de la concentración de protones en la suspensión del suelo agua o suelo solución. Además está relacionado con el tipo de fuente de protones, de esta manera es posible asociar cual es la sustancia presente en el suelo responsable de un determinado valor de pH.
- Cantidad. Se refiere a la capacidad neutralizante de acidez o alcalinidad y a la capacidad neutralizante de basicidad o acidez de los suelos.
- Capacidad. Se refiere a la habilidad que tiene el suelo de resistir los cambios de pH cuando se le adiciona ácidos o bases.

2.1.4 Efectos de la acidez en el suelo

Rol del aluminio en la acidez del suelo

Aunque el pH bajo se define como una alta concentración de iones H^+ , el aluminio también juega un papel central en la acidez del suelo. El aluminio es un componente importante de la mayoría de los minerales del suelo (aluminosilicatos y óxidos de aluminio), incluyendo arcillas.

Cuando los iones H^+ son adsorbidos sobre una superficie de arcilla, por lo general no permanecen como cationes intercambiables por mucho tiempo, pero en vez de atacar la estructura de los minerales, la liberación de los iones de Al en el proceso. Los iones de Aluminio son adsorbidos en los sitios de intercambio catiónico del coloide. Estos iones Aluminio intercambiables, a su vez, están en equilibrio con Aluminio disuelto en la solución del suelo (Brady, 2008).

Además, este autor menciona que los iones de aluminio intercambiable y soluble juegan 2 papeles críticos en el proceso de acidificación del suelo. Primero, el aluminio es altamente tóxico para la mayoría de los organismos y es responsable de gran parte del deletéreo de la acidez del suelo sobre las plantas y los animales acuáticos. Segundo, los iones Al^{3+} tienen una gran tendencia a hidrolizar, dividir moléculas de agua en iones H^+

y OH^- . El aluminio se combina con los iones OH^- , dejando al H^+ bajar el pH de la solución suelo. Por esta razón, el Al^{3+} e H^+ son considerados cationes ácidos. Un solo ion de Al^{3+} puede liberar 3 iones de H^+ .

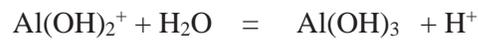
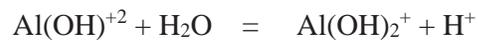
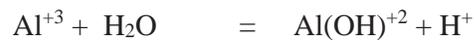
Bernier y Alfaro (2006), mencionan que en condiciones de acidez, iones como Al^{3+} y Mn^{2+} se encuentran en la solución del suelo. Estos elementos aunque estén en bajas concentraciones son tóxicos para la mayoría de los cultivos. La toxicidad del aluminio incluye varios aspectos que afectan el normal desarrollo de las plantas sensibles a la acidez, lo que reduce su crecimiento y desarrollo. La presencia de altas concentraciones de Al en la solución del suelo inhiben también la absorción de calcio y magnesio por las plantas.

El efecto nocivo del aluminio al nivel radicular se centraliza en la zona meristemática y de elongación, consideradas como las más efectivas en la absorción de elementos nutritivos, de manera que al existir una alta concentración de aluminio la toxicidad de este elemento se manifestará en una desnutrición general de la planta, debido a una reducción en la normal absorción y traslocación de elementos nutritivos (Hardward, 1975).

La magnitud de la toxicidad por aluminio depende del contenido de elementos nutritivos en el suelo, especialmente magnesio y calcio; por tanto, la relación Ca/Al , Mg/Al y $(\text{Ca}+\text{Mg}+\text{K})/\text{Al}$ en la solución del suelo resultan ser parámetros de gran importancia para determinar la posibilidad de toxicidad por aluminio. En esta última relación, se considera que el aluminio presenta condiciones de toxicidad para la planta, cuando el cociente es menor o igual que la unidad. Además menciona que se han generalizado tres criterios para considerar al aluminio como un problema en el suelo: (1) cuando se presentan en el suelo, valores superiores a 2 meq de aluminio intercambiable; (2) cuando el porcentaje de saturación de aluminio, en relación con los cationes intercambiables, es mayor que 25; (3) si la relación $(\text{Ca}+\text{Mg}+\text{K})/\text{Al}$ es menor o igual que uno. En cualquiera de estos casos es necesaria la implementación de algún correctivo con el fin de reducir el efecto tóxico del aluminio para las plantas (Instituto Colombiano Agropecuario, 1992).

Aluminio intercambiable

Espinoza y Molina (199), mencionan que los iones Al^{3+} desplazados de los minerales arcilloso por otros cationes se hidrolizan (reaccionan con una molécula de agua) para formar complejos monoméricos y poliméricos hidroxi-alumínicos. Las reacciones de hidrólisis del Al^{3+} son similares a la reacción de un ácido fuerte como el ácido acético que libera H^+ . Las hidrólisis de las formas monoméricas del Al se ilustran en las siguientes reacciones:



Cada una de estas reacciones libera H^+ y contribuye a la acidez del suelo. La figura 1 describe el comportamiento de las diferentes formas monoméricas del Al con respecto al pH del suelo de una solución.- se observa que el Al^{3+} aparece en la solución a pH 5.3 y que arriba de este pH se inicia la formación del Al(OH)_3 que se precipita, eliminando al Al de la solución.

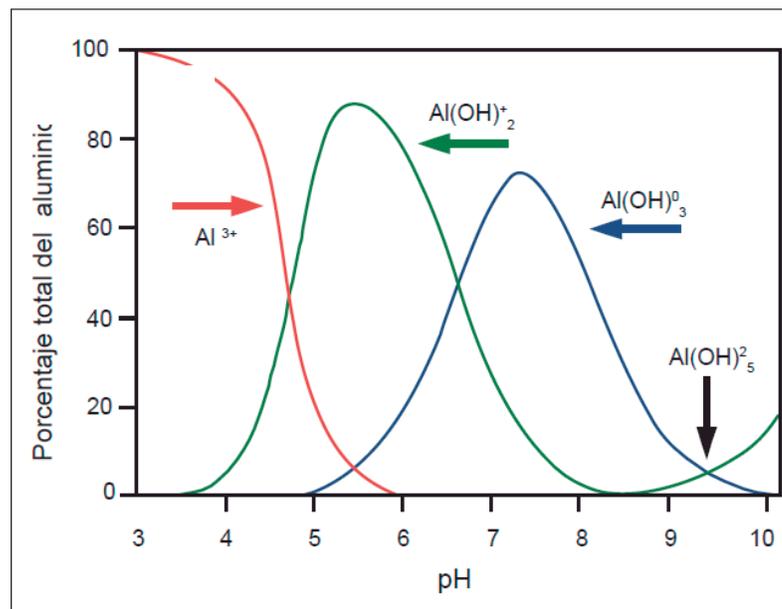


Figura 1. Distribución porcentual de las formas de Al en una solución de acuerdo al pH.

2.1.5 El pH y la asimilabilidad de los nutrientes

El pH del suelo influye de forma decisiva en la asimilabilidad de los diferentes nutrientes vegetales. Los valores de pH que proporcionan mejores condiciones para la asimilación de los nutrientes por la plantas son aquellos que se encuentran en un rango de 6 y 7.5.

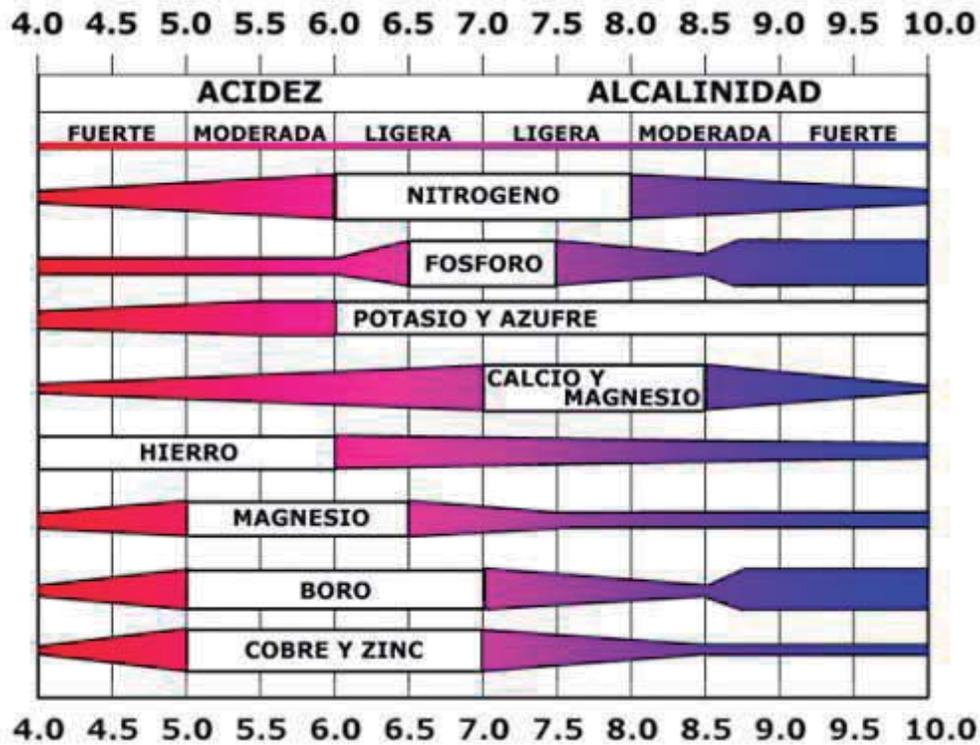


Figura. 2 Influencia del pH sobre la disponibilidad de nutrientes; “diagrama de Trogue”.

Fuente: www.agrogen.com.mx/mainaplicaciones.htm

2.1.6 Rangos de concentraciones de nutrientes en planta de maíz

Las concentraciones de los nutrientes en la planta de maíz puede variar de acuerdo a la variedad, en el siguiente cuadro se muestra algunos valores dados por autores:

Tabla 1. Concentraciones de nutrientes en plantas de maíz antes de la floración

Nutriente	Concentración de nutrientes en la planta (%)		
	Voss, 1993	Malavolta et al., 1997	Raven et al., 1992
N	2.7 – 3.5		1 – 4
P	0.2 – 0.4		0.1 – 0.8
K	1.7 – 2.5	1.75 – 2.25	0.5 – 6
Ca	0.2 – 1.0	0.25 – 0.4	0.2 – 3.5
Mg	0.2 – 0.6	0.25 – 0.4	0.1 – 0.8

Fuente: Adaptado

2.2 ESCORIA BÁSICA

Las escorias siderúrgicas son productos resultantes de procesos industriales destinados a obtener, en primer lugar arrabio (hierro de primera fusión) y en segundo lugar el acero. Arrabio y acero son ambas aleaciones de hierro y carbono (INTA, 2005); por tanto, la escoria es un subproducto de la industria de acero formado fundamentalmente por calcio, hierro y silicato de magnesio, que se obtiene por las reacciones químicas que tienen lugar en los procesos de formación de los metales.

Las escorias generadas en la producción de acero por el proceso de horno de arco eléctrico son, en su mayoría, de dos tipos: oxidantes y reductoras o negras y blancas, respectivamente. Esta nomenclatura se debe a las dos etapas de las que consta dicho procedimiento que son: fusión (marcha oxidante) y afino (marcha reductora) (Amaral, 1999).

A pesar de ser la escoria un residuo de la producción de acero esta puede ser utilizada en la agricultura para tratamiento de suelos sulfato-ácidos. En la construcción tiene disímiles usos en explanadas, bases y sub-bases de carreteras, en capa de rodadura de pavimentos y como aditivo al clinker (caliza cocida) en las plantas productoras de cemento, entre otras. (INTA, 2005).

La escoria puede ser clasificada por su origen:

- Escorias de altos hornos
- Escorias de afino o aceración

Por el tipo de enfriamiento:

- Al aire, o temperizadas en agua.

2.2.1 Proceso de producción de escoria de acero. (FEEDCOR, 2012)

Fundamentos de la producción de acero

Prácticamente todo el acero que se produce en una planta usa el proceso Básico de Oxígeno, o en un Arco Eléctrico (EAF). En ambos procesos, la fundición del metal y/o la chatarra y flujos (cal (CaO) o cal dolomita (CaO.MgO₃)) son ubicados en el horno. Oxígeno de alta presión es inyectado dentro del horno con una lanza. El oxígeno reacciona con el carbón y las impurezas no ferrosas para formar numerosos compuestos oxigenados. Estos, en su momento reaccionan con la cal o cal dolomítica para formar la escoria. El acero líquido es trasvasiado del horno, mientras la escoria permanece en él y luego separado en un recipiente distinto.

Tipos de escoria de acero

Hay diferentes tipos de escoria originadas del proceso de producción del acero. Estas incluyen las *Furnace o TapSlag* (horno o escoria), *Raker Slag* (rastros de escoria), *Synthetic or Ladle slag* (escoria sintética o cucharón). La figura 1 presenta un diagrama del flujo general y producción de las diferentes escorias en una planta de acero moderna. Tras el procesamiento y recuperación de metal, los productos no metálicos del horno, la raker slag y la ladle slag (horno de cuchara), son usadas para varias aplicaciones incluyendo como agregado de construcción, en agricultura o para recuperación de suelos ácidos.

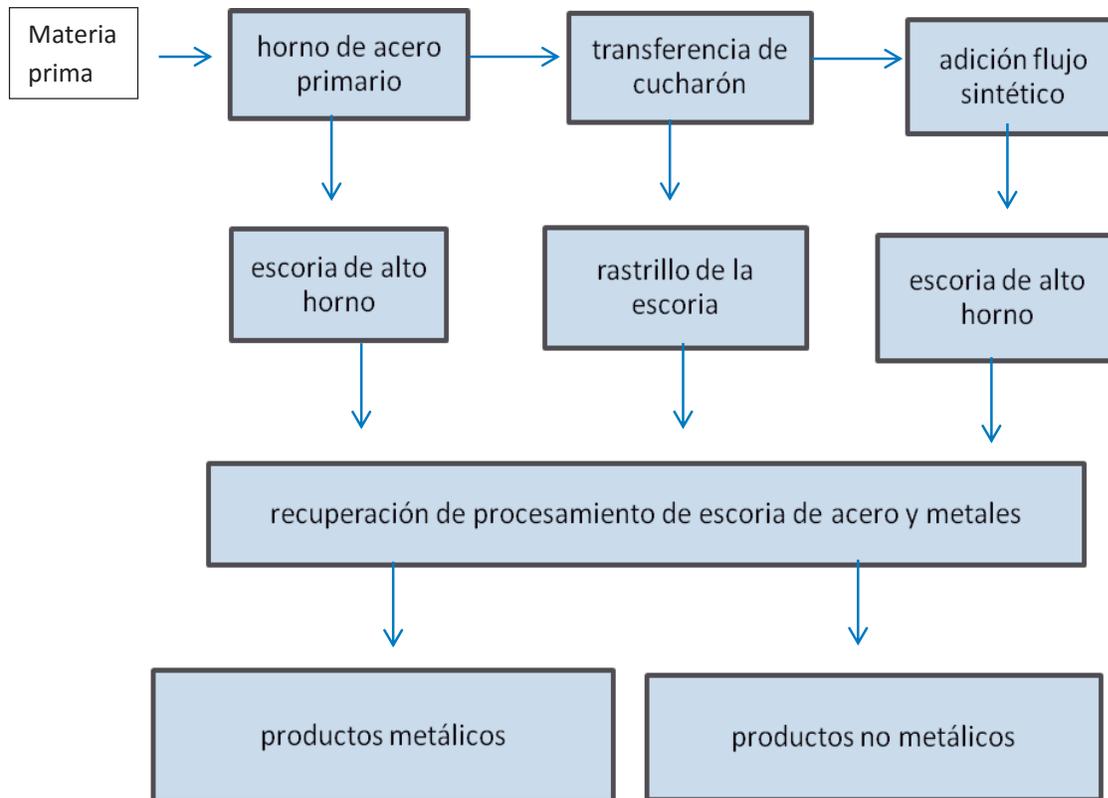


Figura 3. Producción de escoria en una planta moderna de acero

2.2.2 Características de la escoria de acero

Características físicas

La más importante característica física de la escoria de acero para su uso como material encalante en agricultura es su distribución de tamaño de partícula. Mientras más fina la partícula, más reactivo será el material en la neutralización de la acidez del suelo.

Numerosos estudios sobre la distribución del tamaño de partícula se muestran en la tabla 2. Alto porcentaje del material pasa la malla 20 mesh (1mm de diámetro) o más fino. En el estudio de White (1937), sugiere que estas escorias eran, o bien preseleccionadas como en el caso de la escoria 20 mesh, o bien molida como en el caso de la harina de escoria.

La escoria de acero, tiene una gravedad específica alta (3.2 – 3.6 g/cm³) y altas densidades a granel (1.6-1.9 g/cm³) comparadas con la caliza agrícola (2.7-2.9 y 1.4-1.5 g/cm³, respectivamente). Ésta es una consecuencia de metal residual en la escoria.

Tabla 2. Distribución de tamaño de partícula (% en peso) de escorias de acero de diversos estudios

Referencia	Tipo de escoria	Tamaño de malla		
		20	60	100
Munn (1977)	Alto Horno	23	5.9	4
	Horno de acero	18	6.7	6.5
	Metálico de acero	11.7	4.9	11.9
Kerins (2006)	Ag Escoria	66.6	29.8	22.8
Beauchamp and Evans (1999)	Erie Escoria	42	4	4
	Hilton Escoria	29	9	13
White et al. (1937)	Escoria de malla 20	98.6	89.9	77.5
	Harina de escoria	100	97.3	87.1
National Slag Association	Agregado fino		32-70	5-15

Composición química

La escoria de acero contiene muchos de los mismos compuestos concentrados en el cemento Portland. Contiene silicato de calcio y algunos CaO y MgO libres. La composición química de la escoria de acero de fogón y la del proceso básico de oxígeno se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Característica química de la escoria de acero

Constituyente	(% por peso)
CaO	40-52
SiO₂	10-19
Al₂O₃	1-3
MgO	5-10
Fe (FeO o Fe₂O₃)	10-40
MnO	5-8
TiO₂	0.5
P₂O₅	0.5-1
Ca libre	2.1
Fe metálico	0.5-1

(<http://www.tfrc.gov/hnr20/recycle/waste/ssa1.htm>)

2.2.3 Características de encalado con la escoria de acero

Contenido de cal en la escoria de acero y composición de cal

Como se muestra en la tabla 3, la escoria de acero contiene importantes concentraciones de Ca y Mg, estos elementos están presentes en forma de silicatos, ferritas, aluminatos, óxidos y algunos CaO MgO libres. La escoria de acero es alcalina, con un pH en un rango de 8-10, pero valores mayores de 12 son posibles si el contenido del CaO libre es suficientemente alto (CaO reacciona con agua para formar Ca(OH)₂, lo cual tiene un máximo pH de 12.5). Mientras los silicatos de calcio son alcalinos y reaccionarán en el largo plazo como agente encalante en el suelo, en lo inmediato el efecto encalante provendrá de CaO y MgO libres.

Reactividad de la cal en la escoria de acero

Los materiales encalantes en la escoria de acero se componen de mayores y menores compuestos solubles Ca y Mg. El Ca libre reacciona rápidamente con agua para formar

$\text{Ca}(\text{OH})_2$, reaccionará rápidamente con la acidez del suelo y proveerá una capacidad *buffer* del pH del suelo.

2.2.4 Aplicación de escoria de acero a tierra agrícola

Experiencias en fertilización con escoria básica (Dalmaso, 2005)

- En Alemania verificaron los efectos positivos sobre el rendimiento de trigo y maíz con la utilización de escorias siderúrgicas. Considerando el efecto de los silicatos sobre la estructura del suelo, se constató que la disolución más lenta pero sostenida de las escorias siderúrgicas alcanzan una concentración similar de calcio, pero un nivel significativamente más alto de silicio soluble, teniendo como resultado una mayor estabilidad de los agregados del suelo.
- En España confirmaron que la adición de escorias siderúrgicas al suelo produce un incremento en la macroporosidad, favoreciendo el transporte hídrico. Las escorias siderúrgicas aumentan la concentración de silicio en el suelo y favorecen su captación y ascenso por el tejido vegetal de las plantas, elemento que incrementa su resistencia contra las enfermedades fúngicas y mejora la actividad microbiológica del suelo. Adicionalmente, favorece la asimilación de micronutrientes como consecuencia de la incidencia del calcio y el magnesio.
- En Francia, las escorias siderúrgicas son consideradas como «enmendadoras» por su contenido de calcio y magnesio (mejorando la estructura del suelo) y nutritivas por los oligoelementos que disponen (manganeso, zinc, cobre y molibdeno).
- En Europa, en general, estos materiales se aplican al suelo en forma granulada, ratificándose la superioridad de los encalantes siderúrgicos (escorias de procesos) por sobre los naturales (generalmente rocas carbonáticas)

2.3 ENCALADO DE LOS SUELOS

El encalado consiste en la aplicación de materiales básicos al suelo (enmiendas calcáreas) que neutralizan la acidez. Los materiales que se utilizan son principalmente carbonatos, óxidos, hidróxidos y silicatos de calcio y/o magnesio. Debido a su diferente naturaleza química los productos encalantes presentan una capacidad variable de neutralización. Estos productos encalantes son (Bernier y Alfaro, 2006):

- Óxido de calcio
- Hidróxido de calcio
- Cal agrícola o calcita
- Dolomita
- Magnesita
- Conchas molidas

El encalado según Fassbender (1986), trae una serie de efectos directos e indirectos que tienen efecto sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas como son la mejora de la aireación, el movimiento del agua y de la estructura del suelo; la mayor disponibilidad de nutrientes (P, Mo, Ca, Mg, K), el mayor desarrollo de microorganismos y con ello el aumento de los procesos de mineralización, amonificación, nitrificación y fijación de nitrógeno entre otros.

2.3.1 Fuentes de materiales de encalado

Molina (1998), nombra las siguientes fuentes de materiales encalantes:

- Cal calcita (CaCO_3)
- Oxido de calcio (CaO)
- Hidróxido de calcio (Ca(OH)_2)
- Cal dolomita ($\text{CaMg(CO}_3)_2$)
- Magnesita (MgCO_3)
- Oxido de magnesio (MgO)

- Arcillas calcáreas
- Escorias industriales
- Yeso ($\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

2.3.2 Calidad de los materiales encalantes

Molina (1998), menciona que la calidad de los materiales encalantes se fundamenta en los siguientes factores: pureza del material, forma química, tamaño de las partículas y poder relativo de neutralización total, los cuales se describen a continuación:

- Pureza química:** reconoce su composición química y los contaminantes presentes. La capacidad de neutralizar la acidez del suelo depende de la composición química y de la pureza del material. Para determinar la pureza se utiliza el equivalente químico (EQ) que es una medida del poder de neutralización de una cal en particular; entonces, el EQ se define como la capacidad del material para neutralizar la acidez comparada con el poder de neutralización del CaCO_3 químicamente puro, al cual se le asigna un valor de 100%
- Tamaño de partícula:** la fineza de las partículas individuales de la cal determina su velocidad de reacción. A medida que se reduce el tamaño de la partícula de cualquier material de encalado se aumenta el área o superficie de contacto.
- Poder relativo de neutralización total:** para valorar en forma conjunta la pureza química y la fineza de los materiales se utiliza un parámetro denominado Índice de Eficiencia conocido también como Poder Relativo de Neutralización Total (PRNT). Este parámetro también se obtiene multiplicando la eficiencia granulométrica por el equivalente químico y este producto se divide entre 100. El PRNT indica que porcentaje de la cal expresada por su EQ, es capaz de reaccionar en un lapso de 3 meses. Este es el real poder de neutralización de la cal.

2.3.3 Determinación de los requerimientos de cal y materiales usados.

Bohn (2002), menciona que el problema principal de manejar suelos ácidos es estimar la cantidad de cal requerida para elevar el pH hasta cierto nivel.

La forma teóricamente más satisfactoria para estimar el requerimiento de cal de los suelos ácidos es titular una muestra de suelo con una base valorada para determinar la cantidad de base requerida para elevar el pH hasta un valor especificado. El rol fundamental de la cal es suministrar iones hidroxilo:



Estos iones hidroxilo producidos neutralizan la acidez del suelo, elevan su pH y, de esta manera, el suministro de cal produce sus efectos más importantes. El incremento de Ca y Mg solubles e intercambiables, sólo son subproductos de la adición de cal.

Cumming y Weinstein (1990), también mencionan que mediante la aplicación de cal al suelo, es posible lograr la reducción de los efectos tóxicos del aluminio, dado que los carbonatos, óxidos, hidróxidos y silicatos de calcio o magnesio neutralizan los iones H^+ en la solución del suelo, a través de los iones OH^- , cuando la cal reacciona con el agua del suelo ($\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}^{2+} + \text{HCO}_3^- + \text{OH}^-$). La cal incrementa el pH del suelo al convertir el exceso de H^+ en H_2O . Además, el incremento del pH del suelo induce la precipitación del aluminio, como $\text{Al}(\text{OH})_3$, que es un compuesto insoluble.

Esta teoría también coincide con lo propuesto por Espinoza (1995), en donde menciona que la acción neutralizante de los materiales de encalado no se deben en forma directa al calcio y al magnesio, sino más bien a las bases químicas a la cual están ligados estos cationes: CO_3^{-2} , OH^- y SiO_3^{-2} .

Por su lado, Brady (2008), menciona que las cantidades de material encalante que se requiere para mejorar las condiciones del suelo ácido, se determina por varios factores: el cambio de pH requerido, la capacidad buffer del suelo, la cantidad o profundidad del suelo a mejorar, la composición química del material encalante a usar y la finura el material encalante.

La capacidad de tamponamiento ácido de un suelo está en función de su composición mineral y contenido de materia orgánica. Los suelos amortiguan pH en el rango ácido por medio de la liberación de H^+ y Al^{3+} intercambiable dentro de la solución. La capacidad de intercambio catiónico de un suelo está relacionada a su textura, y las texturas más finas de los suelos tienen una capacidad más alta de la capacidad buffer ácida que las texturas del suelo más gruesas.

2.3.4 Experiencia en el uso de enmiendas calcáreas.

Experiencias sobre el uso de enmiendas calcáreas para el control de acidez de los suelos existen muchísimas ya que es una práctica que se realiza desde hace muchos años:

- Villagarcía M. (1982), en experimento sobre control de la toxicidad de aluminio en el cultivo de la papa, trabajando con suelos ácidos de la selva (Pucallpa y San Ramón) en condiciones de invernadero, a los que aplicó diferentes niveles de Al (2, 4, 6 y 8 cmol(+)/kg) y una cal a 2 niveles de aplicación (2 y 4 cmol(+)/g); encontró que la cal influía elevando el pH de los suelos neutralizando el Al con disminución de su saturación en la C.I.C. pero que para los suelos de Pucallpa no hubo respuesta al encalado en cuanto a producción del cultivo, debido a que estos tuvieron muy baja fertilidad (pobres en NPK).
- FUNDAAM, 1999; en el Alto Mayo, realizó la incorporación de caliza dolomita en el cultivo de arroz bajo riego, con la finalidad de subsanar la deficiencia de calcio y magnesio y ver su efecto sobre el rendimiento del cultivo. La dosis empleada fue de 2.0 t/ha de caliza gruesa y fina habiendo obtenido un rendimiento de 5 380 kg/ha de arroz cáscara en un suelo ácido, sin aplicación de otros fertilizantes. Concluyen que el incremento logrado de 1.3 t/ha en rendimiento comparado con el testigo sin aplicación, justifica los costos de la incorporación de caliza con dolomita.
- Rengifo C. (2003) en experimento sobre: Efecto del encalado en un Ultisol de la provincia de Lamas, en el rendimiento de maíz amarillo duro y soya en rotación, trabajando con suelos ácidos del Bajo Mayo (San Martín), a los que aplicó

enmienda calciomagnésica comercialmente denominada Magnecal (77% CaCO_3 y 19% MgCO_3) el cual fue aplicado en dosis de: 0; 0.5; 1; 1.5; 2; 2.5; 3; 3.5 y 4 t/ha en dos campañas (la primera en maíz y la segunda en soya). Encontró que el encalado del suelo contribuyó a elevar los rendimientos del maíz y la soya, en relación directa al aumento de las dosis de enmiendas aplicadas.

- Lama D. (2013), en su investigación sobre efectos del encalado con dolomita y niveles de fósforo en el cultivo de maíz en dos suelos ácidos de Tingo María, el cual fue realizado en macetería; encontrando que con el encalado se incrementó de manera significativa el rendimiento de materia seca de la parte aérea para todo los tratamientos.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 UBICACIÓN DEL CAMPO EXPERIMENTAL:

El ensayo se llevó a cabo en el patio experimental del laboratorio de Fertilidad del Suelo y los análisis de suelos y plantas en el laboratorio de LABSPAF del Departamento de Suelos de la Facultad de Agronomía de la Universidad Agraria La Molina.

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 MATERIALES Y EQUIPOS

3.2.1 Insumos

- Cal (CaCO_3)
- Escoria básica
- Urea (46%N)
- Cloruro de potasio (60% K_2O)
- Superfosfato triple)46% P_2O_5)

3.2.2 Materiales

- Suelo ácido (Tingo María)
- Macetas
- Pie de rey
- Balde
- Libreta de campo
- Lapiceros
- stickers
- Computadora
- Cámara fotográfica

3.2.3 Equipos

- Potenciómetro
- Balanza
- Estufa

3.3 MÉTODO Y PROCEDIMIENTO

3.3.1 Muestreo de 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, precipitación anual que supera los 3000mm y a una altitud que bordea los 650 msnm.

Posteriormente el suelo obtenido fue llevado al laboratorio LASPAF de la UNALM para un análisis de caracterización correspondiente.

3.3.2 Análisis de caracterización.

Las características físicas y químicas del suelo fueron determinadas según los métodos y procedimientos que realizan en el laboratorio de suelos de la UNALM.

El suelo es de textura media (franco), con un contenido de arcilla de 18%, pH muy fuertemente ácido (4.05), bajo contenido de materia orgánica (1.76%), alto nivel de P disponible (27 ppm), bajo nivel de K (39 ppm), CIC bajo (11.68 meq/100g), saturación de aluminio bajo (23.97%), porcentaje de saturación de bases bajo (23%).

Tabla 4. Características físicas – químicas del suelo analizado

Análisis granulométrico	
• Arena (%)	36
• Limo (%)	46
• Arcilla (%)	18
• Clase textural	Franco
pH	
• H ₂ O 1:2	4.05
CaCO ₃ (%)	0.00
Materia orgánica (%)	1.76
P disponible (ppm)	27.4
K disponible (ppm)	39
CIC (meq/100g)	
• Ca ²⁺	2.28
• Mg ²⁺	0.20
• K ⁺	0.12
• Na ⁺	0.11
• Al ³⁺ + H ⁺	2.80
• % SB	23.20
• % AC	23.97

3.3.3 Análisis de la escoria básica

La escoria utilizada fue proporcionada por la empresa SIDERPERU cuya planta productora de acero se encuentra ubicada en la ciudad de Chimbote, en el departamento de Ancash.

Dicho producto fue mandado a analizar en el LASPAF, de tal manera conocer el contenido de CaO, MgO y otros componentes enalantes deseados. La escoria analizada está compuesta por 47% de CaO y 7.47% MgO. Además contiene cantidades muy pequeñas de K₂O, Na, entre otros (ver tabla 5).

Tabla 5. Análisis de la escoria básica

CaO %	MgO %	K ₂ O %	Na %	Cu %	Zn %	Mn %	Fe %	Pb %
47.36	7.47	0.06	0.28	0.011	0.017	0.574	2.423	0.030

Cr %	Cd %	Mo %	P %	B %	S %
0.025	0.001	0.00	0.000	0.017	0.853

3.3.4 Fase de macetería

En cada maceta se colocaron 3kg de tierra seca al aire y posteriormente tamizada. En cada unidad (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 la tabla 6. 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 fosforada (superfosfato triple), 200ppm junto con la siembra del maíz PM 213. A los 15 días se realizó la fertilización potásica (cloruro de potasio) 100ppm y la primera fertilización nitrogenada con úrea 70ppm,. Luego de transcurrido 15 días se realizó la segunda fertilización potásica (100ppm) y nitrogenada

(70ppm), finalmente 15 días después la tercera fertilización nitrogenada (60ppm). La fertilización se llevó a cabo a una dosis de 200-200-200.

Tabla 6: Niveles de material encalante

Tratamiento	Material encalante	meq base/100g	Cantidad (g)
T1	testigo	0	0
T2	CaCO ₃	0.5	0.75
T3	CaCO ₃	1.0	1.5
T4	CaCO ₃	1.5	2.25
T5	CaCO ₃	2.0	3.0
T6	CaCO ₃	2.5	3.75
T7	CaCO ₃	3.0	4.5
T8	Escoria	0.5	0.73
T9	Escoria	1.0	1.46
T10	Escoria	1.5	2.19
T11	Escoria	2.0	2.92
T12	Escoria	2.5	3.65
T13	Escoria	3.0	4.38

3.3.5 Evaluaciones realizadas.

Luego de la cosecha los parámetros que se evaluaron fueron los siguientes:

- Altura de planta: este parámetro fue medido con una regla desde la base del tallo hasta la punta de la hoja más alta. La medida fue hecha a cada una de las cuatro plantas por maceta y se sacó un valor promedio (se expresa en cm).
- Diámetro de planta: para el diámetro se hizo uso de un pie de rey, siendo medida en la base del tallo; también fueron medidas cada una de las

cuatro plantas en cada maceta, para luego sacar un valor promedio por maceta (se expresa en cm).

- Peso fresco: en este caso las plantas de cada maceta fueron cortadas en la base del tallo, para luego ser pesadas en una balanza. Las cuatro plantas de cada maceta fueron pesadas juntas, para luego ser puestas en una bolsa de papel debidamente identificadas (se expresa como g/maceta).
- Rendimiento de la materia seca (parte aérea). El rendimiento de materia seca se realizó luego de que la parte aérea fue secada en una estufa a 72°C (a temperatura constante), hasta lograr un peso constante, que posteriormente fue pesado en una balanza cada una de las repeticiones (se expresa como g/maceta)

3.4 DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental usado fue el Diseño Completo al Azar, con 13 tratamientos y 3 repeticiones. 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

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$$

para $i = 1, 2, \dots, t$
 $j = 1, 2, \dots, n_i$

Donde:

Y_{ij} = Es la observación o respuesta que se obtiene de la unidad experimental que constituye la j-ésima repetición del tratamiento i .

μ = Es el parámetro común para todos los tratamientos llamado media común.

τ_i = Es el parámetro que representa el efecto verdadero del i -ésimo tratamiento.

ε_{ij} = Es un componente aleatorio que representa el efecto verdadero de la j-ésima unidad experimental sujeta al tratamiento i , llamado comúnmente error.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS EN EL SUELO

Tabla 7: Valores medios del pH, y acidez cambiante y aluminio cambiante

ENMIENDA	TRAT.	meq/100g	REACCIÓN DEL SUELO	ACIDEZ CAMBIABLE	AL CAMBIABLE
TESTIGO	1	0	3.915^e	2.000^a	1.100 ^{abc}
	2	0.5	3.907 ^e	1.733 ^{ab}	1.600^a
CaCO₃	3	1	3.907 ^e	1.133 ^{bcd}	0.800 ^{abcd}
	4	1.5	4.257 ^{cde}	0.667 ^{def}	0.667 ^{bcd}
	5	2	4.637 ^{abc}	0.600 ^{def}	0.467 ^{bc}
	6	2.5	5.007^a	0.600 ^{def}	0.533 ^{abc}
	7	3	4.883 ^{ab}	0.400 ^{ef}	0.267 ^c
	8	0.5	4.080 ^{de}	1.533 ^{abc}	1.467 ^{ab}
ESCORIA	9	1	4.033 ^e	1.000 ^{cde}	1.000 ^{abc}
	10	1.5	4.223 ^{cde}	0.800 ^{def}	0.800 ^{abc}
	11	2	4.507 ^{bcd}	0.667 ^{def}	0.667 ^{abc}
	12	2.5	4.627 ^{abc}	0.400 ^{ef}	0.267 ^c
	13	3	4.920 ^{ab}	0.333^f	0.067^c
CV(%)			3.293414	24.77793	38.32177

4.1.1 Valores medios del pH del suelo

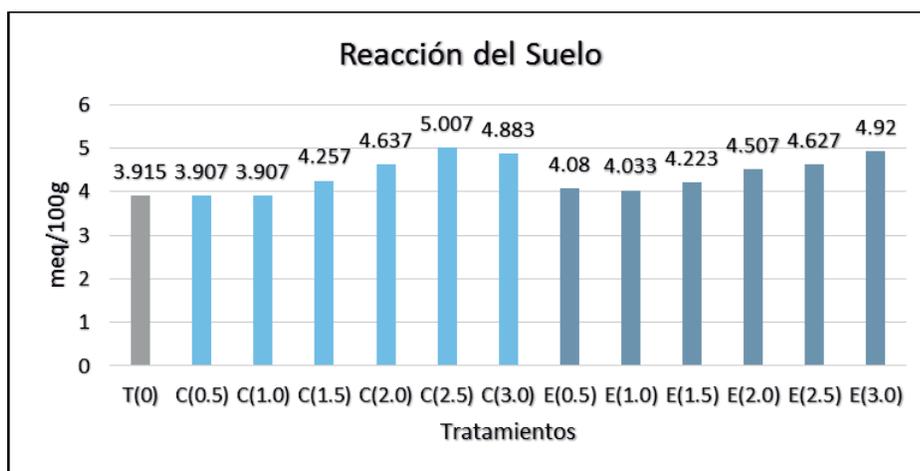


Figura 4. Promedios de los tratamientos de la reacción del suelo

En la tabla 7, se muestra los valores promedios de pH del suelo obtenidos al final de la cosecha para cada uno de los tratamientos probados en el ensayo. Se observa lo siguiente:

- a) Los promedios de pH al término de las pruebas, los cuales son resultantes de la aplicación de las enmiendas probadas, no muestran ser diferentes entre ellas (caliza=4.443, escoria=4.390); sin embargo, en ambos casos se obtuvo una superioridad con respecto al testigo (3.915). Estos promedios de pH para cada una de las enmiendas probadas, representan un incremento porcentual de 13.23% y 12.34% respectivamente. Sin embargo, como se observa, los tratamientos 2 y 3 presentan valores menores al testigo, esa resistencia a elevar su pH puede deberse a la presencia de la acidez residual del suelo, asociado a iones atados en forma no intercambiable a la materia orgánica y arcilla del suelo.
- b) Además se observa que los mayores incrementos del pH corresponden a las aplicaciones de 2, 2.5 y 3 meq/100g de cualquiera de las enmiendas, sin haber superioridad entre ellas. Dosis de enmiendas menores a 2 meq/100g, mostraron incrementos de pH, pero sin ser estadísticamente

diferentes al tratamiento “testigo”. Por otro lado se debe tomar en cuenta que el pH del suelo al inicio de la prueba fue de 4.04, por tanto se observó una disminución del pH en el tratamiento testigo.

Este resultado coincide con lo expuesto por Bohn (2002), quien menciona que los iones hidroxilo aportados por el carbonato de calcio, neutralizan la acidez del suelo, y también con lo mencionado por Espinoza (1995), quien afirma que los silicatos liberan iones SiO_3^{-2} que también cumple con la misma función. Además presenta relación con los resultados de la experiencia realizada por Villagarcía (1982), en donde concluyó que la aplicación de cal agrícola logró un incremento del pH para los suelos de San Ramón.

4.1.2 Valores medios de la acidez cambiabile

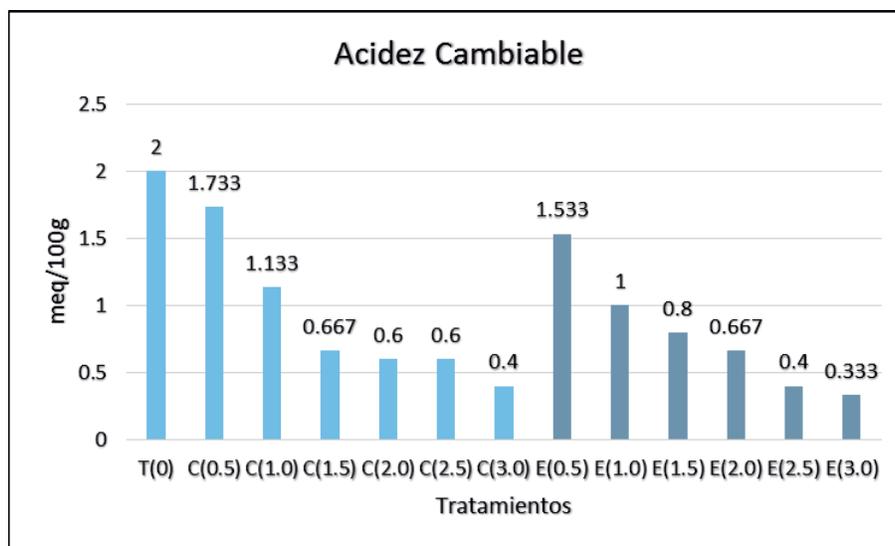


Figura 5. Promedios de los tratamientos de la acidez cambiabile

La tabla 7, muestra también que los valores promedios de la acidez cambiabile (AC) en meq/100g al término del ensayo son de 0.856 (caliza) y 0.789 (escoria), en ambos casos son significativamente menores al testigo sin encalar (2.00). Esto significa una disminución promedio de la AC de 57.2% y 60.55% respectivamente, respecto del testigo sin aplicación. Además se observa que el promedio del tratamiento 13 correspondiente a la enmienda escoria, fue el que obtuvo en valor más bajo, sin embargo estadísticamente se observa que tiene un valor similar al promedio del tratamiento 7 que

corresponde al carbonato para la misma dosis de enmienda (3.0meq); además de ello se observa que a pesar de la superioridad de este tratamiento, estadísticamente presenta un resultado similar a los tratamientos con aplicaciones de 2 y 2.5 para ambos casos e inclusive similar al tratamiento con aplicación de 1.5 meq (para la enmienda escoria).

Estos resultados fueron los esperados debido a que la acidez cambiante está relacionada al pH; por tanto en los tratamientos donde se obtuvieron valores de pH más altos, los valores de la acidez cambiables son los mas bajos (tal es el caso del tratamiento 13 donde presenta uno de los valores de pH más altos y un valor de acidez cambiante más bajo que el resto) y viceversa como es el caso del tratamiento testigo, el cual obtuvo un valor de pH más bajo pero un valor de acidez cambiante más alto que el resto de los tratamientos.

4.1.3 Valores medios del aluminio cambiante

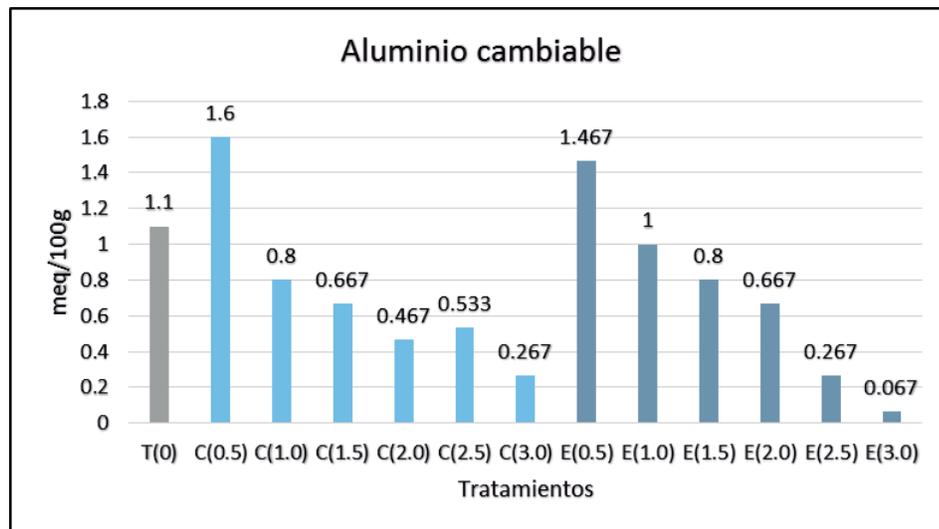


Figura 6. Promedios del aluminio intercambiable.

En cuanto al aluminio cambiante, en la misma tabla 7 podemos observar que sigue el mismo patrón de la acidez cambiante. Finalizado las pruebas, no se muestra diferencias significativas en los promedios de los tratamientos de ambas enmiendas aplicadas (caliza=0.722, escoria=0.711). Estos promedios representan una disminución

porcentual de la acidez cambiante de 27.8% y 35.6% respectivamente con respecto al tratamiento testigo; esto nos lleva a la conclusión de que ambos materiales encalantes tienen similar efecto en cuando a la reducción de la acidez cambiante. Sin embargo los tratamientos 2 (1.6meq) y 8 (1.467meq) que corresponden a la dosis de 0.5 meq de ambas enmiendas resultaron ser mayoressin ser superiores estadísticamente al tratamiento testigo, este resultado contradice a la teoría de que el al realizar el proceso de encalado en un suelo ácido libera iones OH^- el cual reacciona con el aluminio, reduciendo la concentración del mismo por tanto eleva el pH del suelo.

4.2 EVALUACIÓN DEL TALLO DE LA PLANTA Y LA MATERIA SECA (PARTE AÉREA).

4.2.1 Valores medios del diámetro.

Tabla 8. Valores medios del diámetro, altura, peso fresco y peso seco de la planta obtenidos con la aplicación de cada enmienda en dosis crecientes de 0 a 3.0 meq/100g de suelo

Enmienda	meq/100	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso Fresco (g)	Peso seco (g)
Testigo	0	1.33 ^a	92.38 ^b	192.7 ^a	31.68 ^c
CaCO₃	0.5	1.25 ^a	107.42 ^{ab}	232.57 ^a	37.37 ^{abc}
	1	1.25 ^a	101.04 ^{ab}	208.05 ^a	36.60 ^{abc}
	1.5	1.42 ^a	99.58 ^{ab}	206.74 ^a	37.25 ^{abc}
	2	1.32 ^a	108.17 ^{ab}	251.36 ^a	39.03 ^{abc}
	2.5	1.30 ^a	107.59 ^{ab}	232.17 ^a	40.94 ^{abc}
	3	1.20 ^a	105.84 ^{ab}	211.27 ^a	35.22 ^{bc}
Escoria	0.5	1.33 ^a	98.42 ^{ab}	220.95 ^a	37.83 ^{abc}
	1	1.26 ^a	115.50 ^a	240.91 ^a	41.33 ^{abc}
	1.5	1.36 ^a	103.09 ^{ab}	221.29 ^a	37.39 ^{abc}
	2	1.31 ^a	108.04 ^{ab}	221.29 ^a	46.48 ^{ab}
	2.5	1.26 ^a	112.75 ^{ab}	247.61 ^a	41.30 ^{abc}
	3	1.34 ^a	116.96 ^a	257.72 ^a	47.24 ^a
CV (%)		8.2677	6.5081	10.5768	9.8051

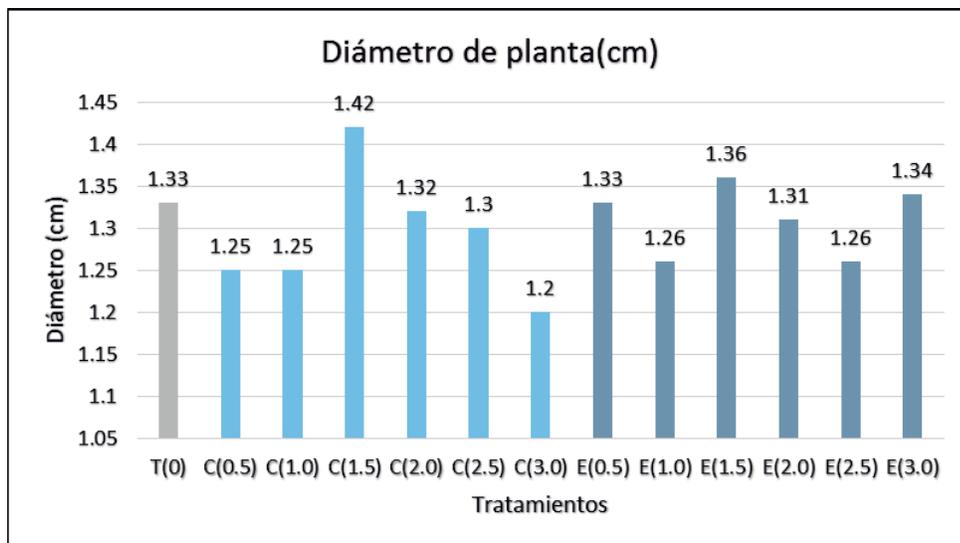


Figura 7. Valores promedios de los tratamientos para diámetro de planta

Los resultados para el diámetro de planta que se muestran en la tabla 2, nos indican que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos para ambas enmiendas e incluso para el testigo para un nivel de significancia de 0.05, además de mostrar un coeficiente de variabilidad (CV) bajo (8.26%).

Sin embargo, se puede observar que el tratamiento con enmienda CaCO_3 presenta numéricamente un promedio mayor de diámetro de planta (cm), específicamente para una dosis de 1.5 meq/100g de suelo, lo mismo ocurre con la enmienda escoria ya que el mejor resultado también se obtuvo con una dosis de 1.5 meq/100g de suelo.

Por otro lado en la figura 7 se observa que el diámetro de planta obtenido no es directamente proporcional a la dosis de enmienda aplicada para todos los casos, como por ejemplo para una dosis de 3.0 meq/100g de suelo (enmienda caliza) se obtuvo un resultado menor al testigo.

4.2.2 Valores medios de la altura.

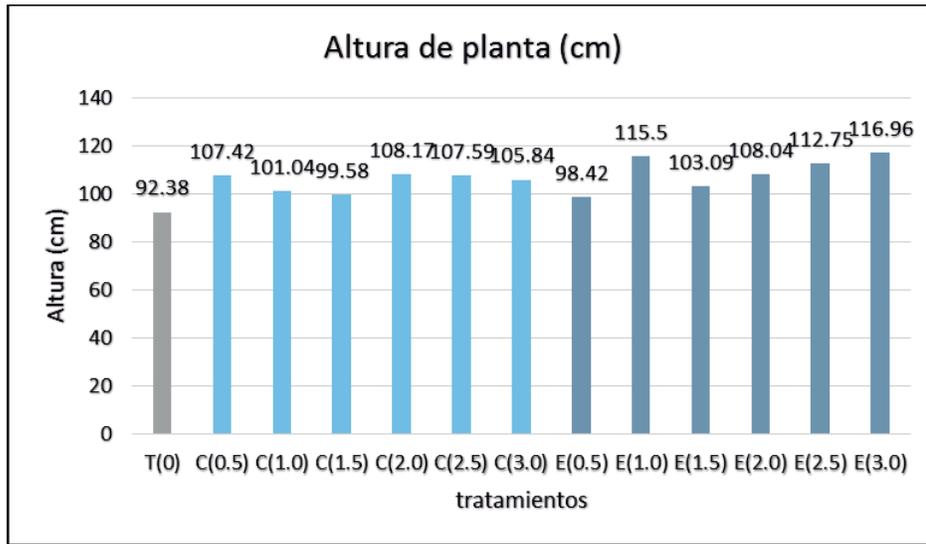


Figura 8. Valores promedios de los tratamientos para altura de planta

En la tabla 8, se observa que el coeficiente de variación (CV) experimental es bajo (6.5%) para el número de tratamientos probados y validados. Por lo tanto, son válidos también los resultados de promedios de tratamientos para la variable altura de planta, en donde encontramos diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos 9 (1.0meq) y el tratamiento 13 (3.0meq), que corresponden a la enmienda escoria básica con relación al tratamiento testigo. Sin embargo, los demás tratamientos muestran promedios similares al tratamiento testigo, lo que quiere decir que éstas variables probadas no afectan a la altura de planta de maíz en relación al testigo.

Del mismo modo en la figura 8 se puede observar que numéricamente en el suelo tratado en la enmienda caliza obtuvo mayor resultado el tratamiento 5 (2108.17cm), mientras que el suelo tratado con la escoria el tratamiento 13 (116.96cm) se obtuvo el mayor resultado, concluyendo de esta manera que a mayor dosis de material encalante no necesariamente se obtuvieron los resultados más altos en cuanto a la variable altura de planta. Finalmente se puede observar que con la enmienda escoria básica se obtuvo un incremento de 18.13% y para el caso del CaCO_3 se obtuvo un incremento de 13.60% en cuanto a la altura de planta.

4.2.3 Valores medios del peso fresco

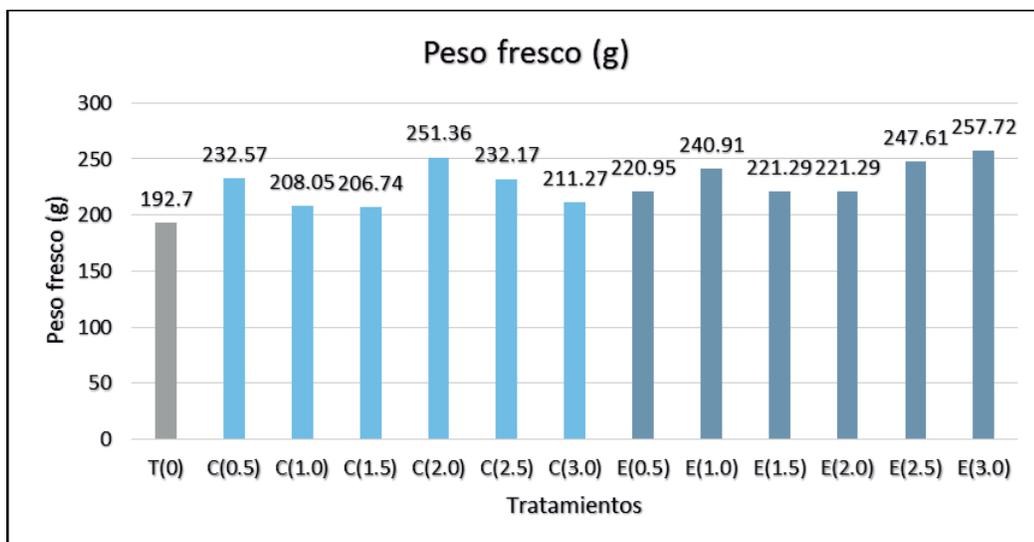


Figura 9. Valores promedios de los tratamientos para peso fresco

Nuevamente en la tabla 8 con relación a la variable peso fresco, se observa que tampoco presenta diferencias estadísticamente significativas, además muestra un coeficiente de variación (10.57%) bajo para el número de tratamientos probados, por tanto dichos valores de las variables probadas no afectan al peso fresco en comparación al testigo.

De igual manera en la gráfica 6, se logra observar que a pesar de no haber diferencias significativas, con respecto a la enmienda caliza el promedio más alto corresponde al tratamiento 5 (251.36g), mientras que en el caso de la enmienda escoria, el promedio más alto corresponde al tratamiento 13 (257.32g), este resultado era lo esperado, debido que en la figura anterior (figura 8) se observa a dichos tratamientos presentar los promedios más altos en cuanto a altura. Por otro lado, de la misma gráfica se puede deducir que el promedio de la aplicación de la enmienda caliza logra un incremento del 15.72% con respecto al testigo, mientras que con la enmienda escoria básica se obtuvo un incremento de 21.93% con respecto al testigo en cuanto a la variable peso fresco.

4.2.4 Valores medios del peso seco.

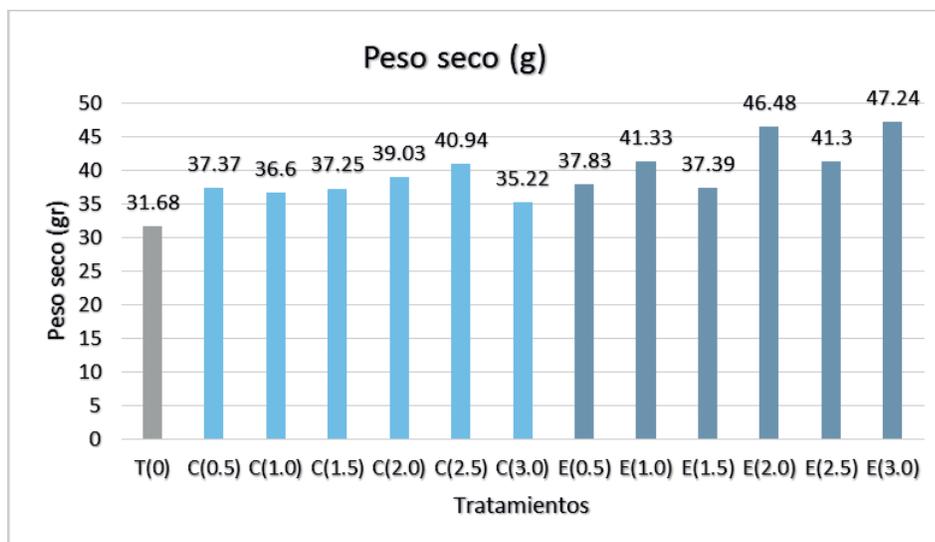


Figura 10. Valores promedios de los tratamientos para peso seco

Finalmente en la tabla 8 también se muestran los resultados de valores medios de la variable peso seco de la parte aérea de planta de maíz obtenidos con la aplicación de cada enmienda en dosis crecientes de 0 a 3.0 meq/100g de suelo, en donde claramente se observa una diferencia estadísticamente significativa entre el testigo y el tratamiento 13 (dosis de 3.0 meq para la enmienda escoria básica) que es la dosis más alta, mientras que para los demás tratamientos incluyendo a la dosis más alta con respecto a la enmienda caliza (tratamiento 7) presentan un promedio similar al tratamiento testigo (no hay diferencias estadísticamente significativas).

Además, en la gráfica 8 se muestra que en general a mayor dosis de encalado es más alto los promedio en cuanto al peso seco, esto coincide con lo encontrado por Lama (2013), en su investigación sobre efectos del encalado con dolomita y niveles de fósforo en el cultivo de maíz en dos suelos ácidos de Tingo María, el cual fue realizado en macetería; encontrando que con el encalado se incrementó de manera significativa el rendimiento de materia seca de la parte aérea para todo los tratamientos.

También cabe resaltar que con la caliza se obtuvo un incremento del peso seco de 15.72% con respecto al testigo, mientras que con la escoria básica se obtuvo un incremento de 21.93% con respecto al testigo, este incremento mayor del peso seco con

la aplicación de escoria conlleva a que se obtenga una diferencia estadísticamente significativa.

Gráficamente (figura 10), se observa que en su mayoría los tratamientos con la enmienda escoria se obtuvo los mejores resultados, mientras que con la enmienda CaCO_3 no se observa un aumento considerable a excepción del tratamiento 6 (de dosis 2.5 meq/100g de suelo).

4.3 ANÁLISIS DE EXTRACTO FOLIAR

Tabla 9. Valores medios de los tratamientos para porcentaje de N, P, K, Ca y Mg

Enmienda	meq/100g	%N	%P	%K	%Ca	%Mg
Testigo	0	1.61 ^a	0.22 ^a	2.56 ^a	1.25 ^c	0.73 ^a
	0.5	1.66 ^a	0.17 ^a	2.37 ^{ab}	1.21 ^c	0.66 ^a
CaCO₃	1	1.55 ^a	0.16 ^a	2.23 ^{ab}	1.16 ^c	0.58 ^a
	1.5	1.55 ^a	0.15 ^a	2.02 ^{ab}	1.17 ^c	0.63 ^a
	2	1.44 ^a	0.12 ^a	2.25 ^{ab}	1.92 ^a	0.72 ^a
	2.5	1.53 ^a	0.16 ^a	2.12 ^{ab}	1.80 ^{ab}	0.65 ^a
	3	1.28 ^a	0.22 ^a	2.23 ^{ab}	1.40 ^{bc}	0.64 ^a
	3	1.26 ^a	0.11 ^a	1.77 ^b	1.07 ^c	0.79 ^a
Escoria	0.5	1.57 ^a	0.16 ^a	2.13 ^{ab}	1.20 ^c	0.66 ^a
	1	1.43 ^a	0.14 ^a	2.15 ^{ab}	1.05 ^c	0.65 ^a
	1.5	1.55 ^a	0.12 ^a	1.96 ^{ab}	1.06 ^c	0.63 ^a
	2	1.38 ^a	0.14 ^a	1.91 ^{ab}	1.02 ^c	0.66 ^a
	2.5	1.44 ^a	0.13 ^a	1.99 ^{ab}	1.17 ^c	0.77 ^a
	3	1.26 ^a	0.11 ^a	1.77 ^b	1.07 ^c	0.79 ^a
CV(%)		9.9295	28.2899	9.8825	12.8097	10.5088

4.3.1 Concentración de N en la materia seca

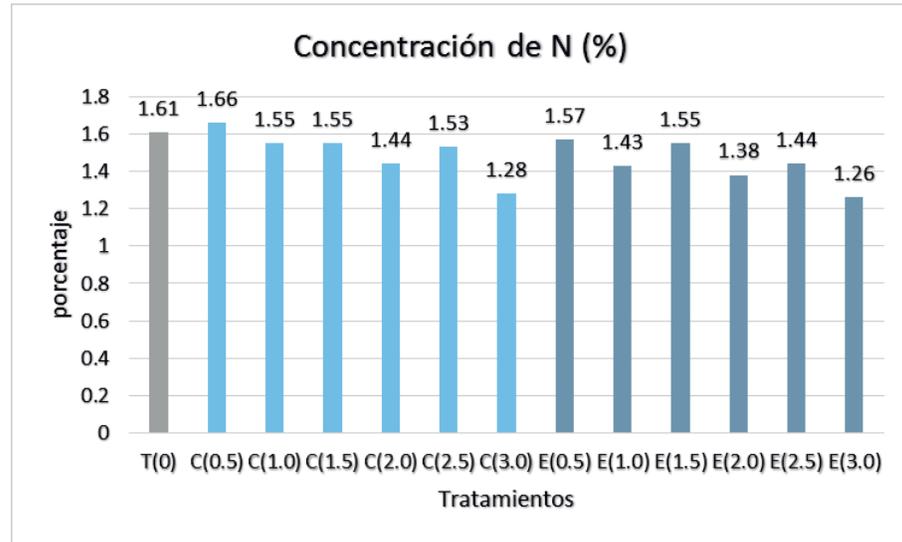


Figura 11. Valores promedios de las concentraciones de nitrógeno en la materia seca



Figura 12. Extracción total de N en la materia seca de la planta

En la tabla número 9 se muestra los porcentajes de los contenidos de nitrógeno de la materia seca de la parte aérea, en donde claramente se observa que no se obtuvieron estadísticamente diferencias significativas, sin embargo en la figura 11 se puede observar que para el caso de la enmienda caliza existe una ligera tendencia a la disminución de los porcentajes de N conforme aumenta la dosis del material encalante,

es así que el promedio más alto corresponde al tratamiento 2 (1.66%) que corresponde a la caliza, seguido del tratamiento testigo (1.6%), mientras que el valor más bajo lo ocupa el tratamiento 7 (1.28%). Para el caso de la enmienda escoria básica ocurre algo parecido, siendo así el tratamiento 8 (1.57%) el promedio más elevado, mientras que el tratamiento 13 (1.26%) ocupa el valor más bajo.

Por otro lado, la figura 12 nos muestra las concentraciones totales de los contenidos de N en la materia seca de la parte aérea de la planta de maíz nos muestra un panorama ligeramente diferente a los resultados mostrados en la figura 11, ya que para el caso de los tratamientos correspondientes a la enmienda caliza a excepción del tratamiento 7, todos los demás promedios de los tratamientos son superiores al tratamiento testigo, además en el caso de los tratamientos que corresponden a la enmienda escoria todos los tratamientos fueron superiores al tratamiento testigo. Estos resultados son generados por la debido a la variable peso seco mostrado anteriormente, en donde se muestra que la tendencia en la mayoría de los tratamientos aumenta a mayor dosis de material encalante. Es así que el promedio de las concentraciones totales de N para cada una de las enmiendas probadas, representan un incremento porcentual de 11.40% (caliza) y 17.09% (Escoria básica) con respecto al tratamiento testigo (0.509%). Sin embargo, todos los valores de concentración de N en la materia seca son inferiores a lo recomendados (voss, 1993), tal como se muestra en la tabla 1; por tanto todos los tratamiento muestran déficit de N.

4.3.2 Concentración de fósforo en la materia seca

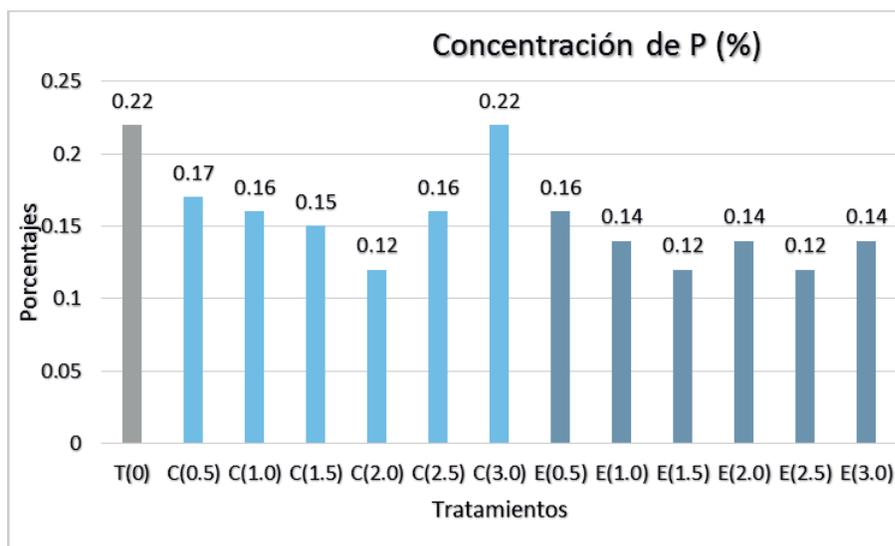


Figura 13. Valores promedios de las concentraciones de fósforo en la materia seca

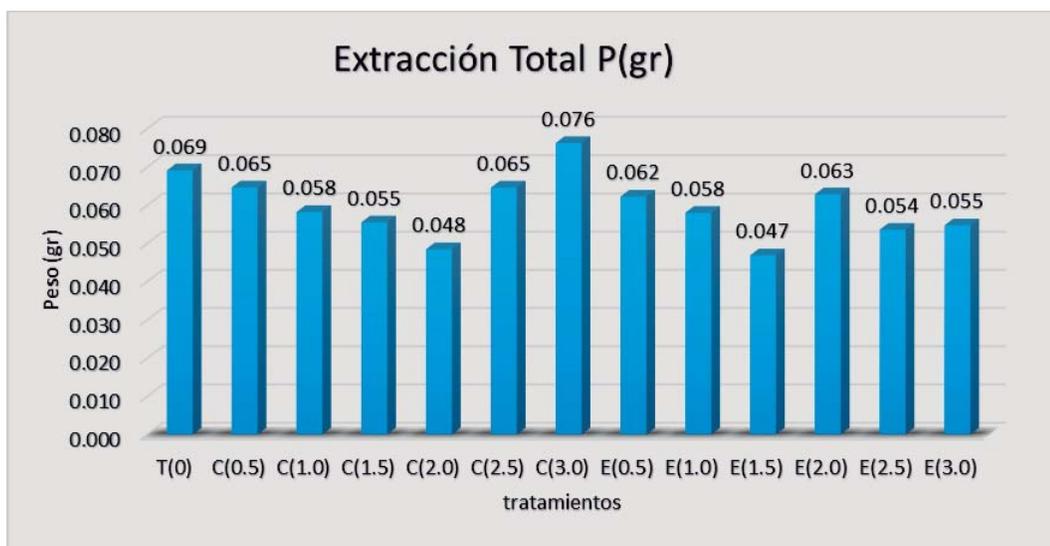


Figura 14. Extracción total de P en la materia seca de la planta

En la tabla 9, también nos muestra los porcentajes de P contenidos en la materia seca para cada uno de los tratamientos, en donde nos muestra que al igual que en el caso de nitrógeno, tampoco existen diferencias estadísticamente significativas, sin embargo numéricamente el tratamiento testigo y el tratamiento 7 (corresponde a la enmienda caliza) son los que obtuvieron el promedio más alto (0.22% cada caso), el mismo panorama se observa en la figura 14 en cuanto a la concentración total de P en la

materia seca, ya que ambos tratamientos presentan los contenidos más altos 0.069g y 0.076 respectivamente). Además los datos presentados no muestran una tendencia marcada en cuando a las dosis de aplicación, sin embargo se puede observar que los tratamientos con las dosis de encalado más bajos presentamos promedios más altos para ambos materiales encalantes.

Finalmente se puede afirmar que el promedio de la concentración de P para cada una de los tratamientos probados, representan una disminución porcentual de la concentración total de P de 11.59% para el caso de la caliza y 18.84% en el caso de la escoria, con respecto al tratamiento testigo. Además de ello la tabla 1 muestra las concentraciones de P en la materia seca de la planta de maíz y se observa que a excepción del tratamiento 1 (testigo) y 7, todos los demás tratamientos se encuentran en déficit de P.

4.3.3 Concentración de potasio en la materia seca

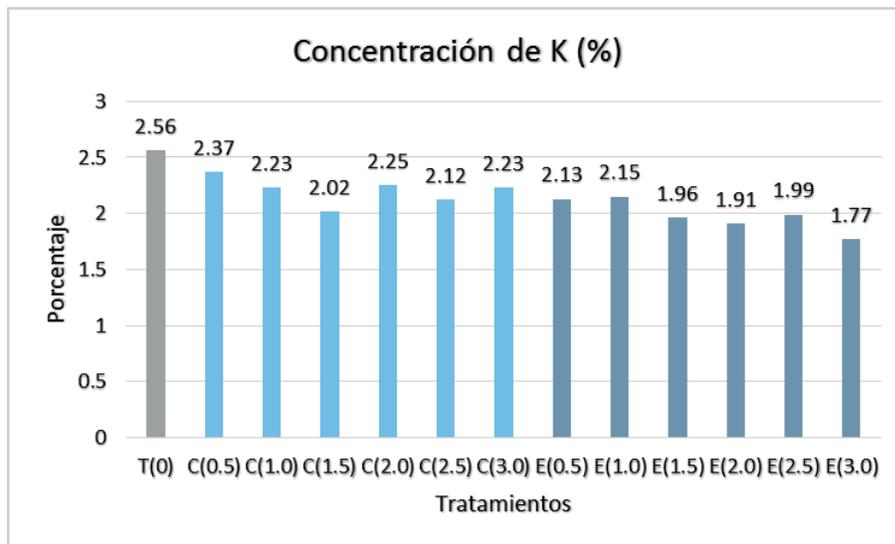


Figura 15. Valores promedios de las concentraciones de potasio en la materia seca



Figura 16. Extracción total de K en la materia seca de la planta

En la figura 15 también se logra observar los porcentajes de potasio (K) en la materia seca de la parte aérea de la planta de maíz, en donde claramente podemos observar una superioridad del tratamiento testigo (2.56%) con respecto a todos los demás tratamientos. Además, en el cuadro 3 se observa que existe diferencia estadísticamente significativa entre el tratamiento testigo y los demás tratamientos, con un coeficiente de variabilidad de 12.5%. Por otro lado, la misma tabla también nos muestra que el tratamiento 13 (corresponde a la enmienda escoria) numéricamente fue quien obtuvo el menos valor, pero similar a los demás tratamientos (excepto el tratamiento 1).

Sin embargo, la figura 16 nos muestra la concentración total de K en la materia seca de la planta (parte aérea) para cada uno de los tratamientos, en donde claramente se observa que el testigo ya no presenta el mayor promedio debido a la cantidad de materia seca que presenta (más bajo comparando a los demás tratamientos). De tal manera que a pesar que en el cuadro 3, el tratamiento testigo presenta una superioridad (estadísticamente superior a los demás tratamientos), en la figura 16 se observa que el promedio de la concentración total de K para cada uno de los tratamientos probados, representan un aumento insignificante de 2.47% para el caso de la caliza y un 1.06% para el caso de la escoria con respecto al testigo, lo que indica que numéricamente son similares. Además, si comparamos con los datos de los valores recomendados

mostrados en la tabla 1, se puede deducir que todos los tratamientos presentan valores superiores a lo mencionado en dicha tabla (Voss, 1993 y Malavolta, 1997)

4.3.4 Concentración de calcio en la materia seca

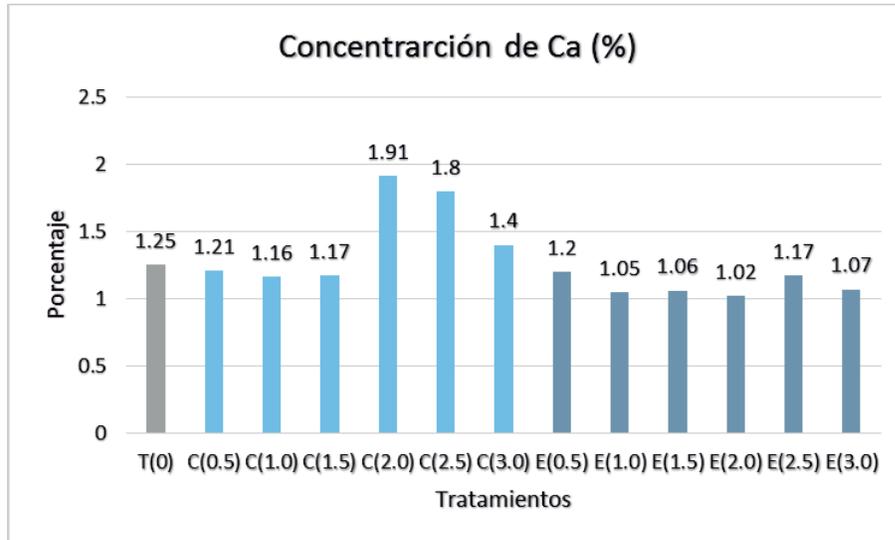


Figura 17. Valores promedios de las concentraciones de calcio en la materia seca.



Figura 18. Extracción total de Ca en la materia seca de la planta.

Para el caso del porcentaje de calcio (Ca) contenido en la materia seca de la planta, la tabla 3 nos muestra que estadísticamente si se encuentran diferencias significativas, en donde el tratamiento 5 que corresponde a la enmienda caliza es superior a los tratamientos 6 y 7, y éstos a su vez superiores a los demás tratamientos. Por otro lado los tratamientos correspondientes a la escoria básica no mostraron diferencias significativas entre ellas y con respecto al testigo, y al mismo tiempo, en todos los casos los valores de concentración fueron inferiores numéricamente al tratamiento testigo. Este resultado podría deberse a la naturaleza del material encalante, puesto que la enmienda caliza contiene solamente mayor cantidad de Ca en su composición, mientras que la enmienda escoria además de calcio posee Mg y otros elementos menores.

Adicionalmente en la figura 18 se muestra la extracción total de Ca (g) en la materia seca de la planta (parte aérea), en donde claramente se observa una superioridad considerable en los tratamientos 5 y 6 (correspondientes a la enmienda caliza), sin embargo, al contra de la gráfica 14, todos los tratamientos correspondientes a la escoria alcanzan ser superiores al tratamiento testigo. De esta forma, finalizado las pruebas, en cuanto a la extracción total de Ca el promedio de las pruebas tanto de la caliza (0.551g) como de la escoria (0.457), representan un incremento porcentual del 38.44% y de 14.82% respectivamente, con respecto al tratamiento testigo. Por otro lado, todos los tratamientos obtuvieron valores de concentraciones de P por encima de lo recomendado en la tabla 1.

4.3.5 Concentración de magnesio en la materia seca

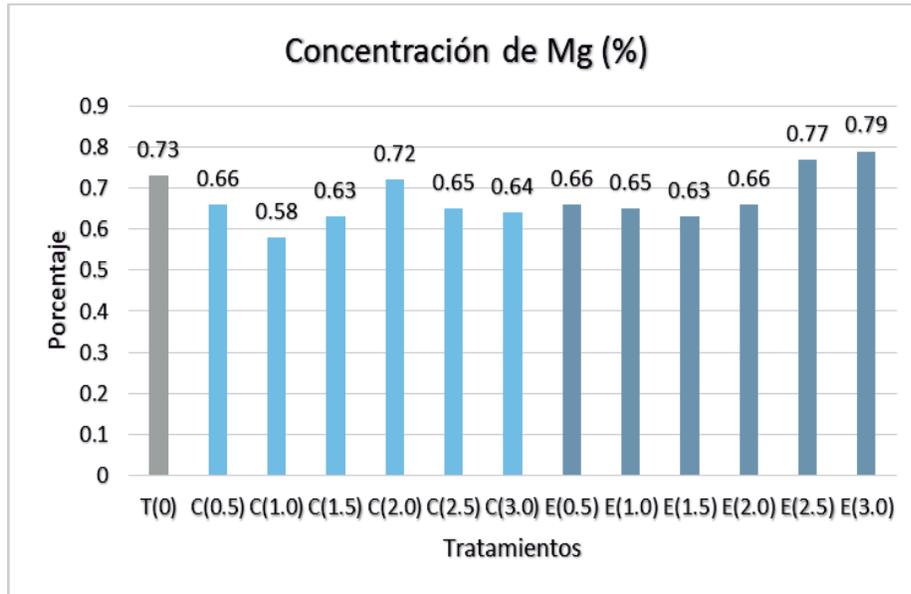


Figura 19. Valores promedios de las concentraciones de magnesio en la materia seca.

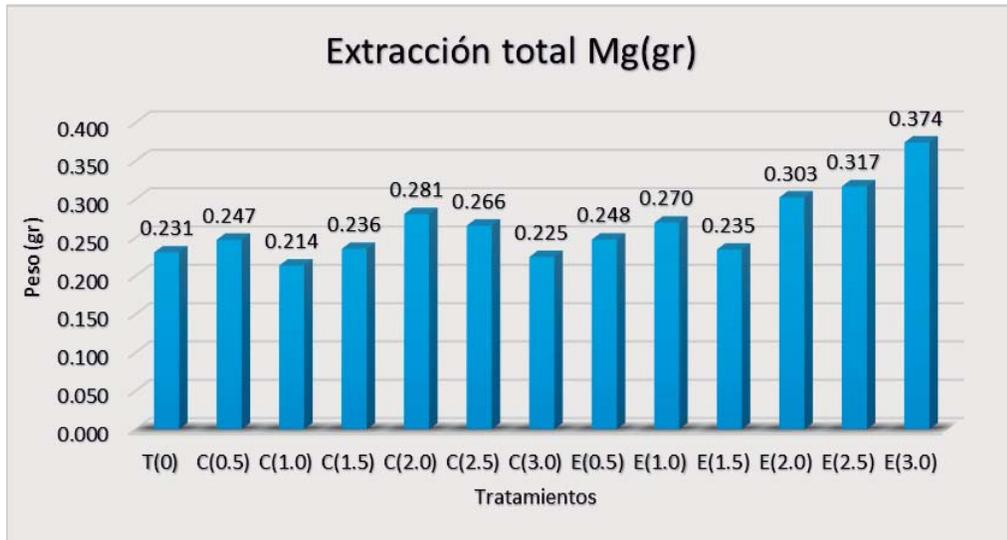


Figura 20. Extracción total de Mg en la materia seca de la planta

Finalmente, la tabla 9 también nos muestra los promedios de los tratamientos obtenidos al finalizar el experimento, en donde claramente se puede observar que no muestra diferencias estadísticamente significativas, sin embargo numéricamente en la figura 19 muestra que los valores mayores en cuanto a la concentración de Mg se encuentran en los

promedios de los tratamientos 12 (0.77%) y 13 (0.79%) ambo correspondientes a la enmienda escoria básica, seguidos del tratamiento testigo (0.73%). Adicionalmente la gráfica 17 nos muestra la extracción total de Mg en la materia seca de la parte aérea, cuyos resultados nos muestran que los tratamientos 12 (0.317g) y 13 (0.374g) mantienen los valores más altos, seguidos por el tratamiento 5 (0.281); además de ello, el promedio de los tratamientos correspondientes a la enmienda escoria representa un incremento mayor (25%) que el incremento correspondiente a la enmienda caliza (6.06%) con respecto al tratamiento testigo, este resultado se esperaba ya que a diferencia de la caliza, la escoria presenta Mg en forma de óxido de magnesio (MgO) en su composición. Por otro lado, al igual que en el caso de Ca, todos los tratamientos, mostraron valores superiores a los promedios mostrados en la tabla 1, estos resultados eran predecibles debido a la aplicación de enmiendas en cuya composición presentan Ca y/O Mg.

V. CONCLUSIONES

Los resultados experimentales obtenidos permiten extraer las siguientes conclusiones:

1. Los mayores incrementos de pH correspondieron a la aplicaciones de 2, .5 y 3 de ambas enmiendas; mientras los promedios de pH obtenidos con la aplicación de la enmienda caliza fue de 4.443 y con la enmienda escoria 4.390, no siendo diferentes entre ellas.
2. En cuanto a la acidez cambiante, los promedios de ambas enmiendas fueron significativamente menores al testigo (tratamiento 1), ya que se obtuvo una reducción promedio de 57.2% (caliza) y 60.55% (escoria), siendo el tratamiento 13 el que obtuvo el valor más bajo (0.333 meq).
3. En el caso del aluminio cambiante los tratamientos 2 (1.6meq) y 8 (1.467) resultaron ser mayores, ambos corresponden a una dosis de 0.5 meq/100g.
4. En el parámetro diámetro de planta, no se encontró diferencias significativas entre los tratamientos, mientras que en ambos casos numéricamente los tratamientos con 1.5 meq/100g.
5. Para el parámetro altura de planta, los tratamientos 9 (115.50) y 13 (116.96), resultaron ser superiores estadísticamente significativas con respecto al tratamiento testigo (92.38).
6. Para el caso del parámetro peso fresco, no se encontró diferencias significativas entre los tratamientos probados, sin embargo numéricamente el tratamiento 13 (257.32g), fue quien obtuvo el valor más alto.
7. En cuanto al peso seco de planta, si se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos, siendo el tratamiento 13 (47.24) superior estadísticamente significativo a los demás tratamientos. Además, el promedio de los tratamientos con la enmienda caliza representó un incremento de 15.72% con respecto al testigo, mientras que la escoria representó un incremento de 21.93%.

8. En cuanto al porcentaje de N en la parte aérea, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos, sin embargo numéricamente a valor más altos de enclado se obtuvieron menores valores en el porcentaje de N. Mientras que en cuanto a la extracción total de N, todos los tratamientos resultaron ser numéricamente superiores al tratamiento testigo.
9. En el caso del porcentaje de P en la planta, tampoco se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos probados. Además el promedio de los tratamientos para el porcentaje de fósforo representó una disminución porcentual de la concentración total de P de 11.59% para el caso de la caliza y 18.84% en el caso de la escoria, con respecto al tratamiento testigo.
10. Para el caso del porcentaje de potasio, se obtuvo diferencias estadísticamente significativas, siendo el tratamiento testigo superior (2.56%) estadísticamente al tratamiento (13 1.77).
11. También se encontró diferencias significativas en el porcentaje de Ca en la planta, siendo el tratamiento 5 (1.92) superior a los demás tratamientos. Por otro lado, la extracción total de Ca el promedio de las pruebas tanto de la caliza (0.551g) como de la escoria (0.457), representan un incremento porcentual del 38.44% y de 14.82% respectivamente, con respecto al tratamiento testigo.
12. Finalmente para el caso del porcentaje de Mg en la parte aérea de la planta no se encontraron diferencias significativas, sin embargo numéricamente los tratamientos 12 (0.77%) y 13 (0.79%) obtuvieron valores más altos.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGUILAR, A; ALCANTARA, GABIREL Y ETCHEVERS, JORGE.1994. Acidez del suelo y encalado en Mexico. Sociedad mexicana de la ciencia del suelo. México.
2. AMARAL, L. 1999: Hormigones con escorias de horno eléctrico como áridos.
3. BENITES, J. 1981. Suelos de la Amazonía peruana: su potencial de uso y de desarrollo. INIPA, North Carolina State University. Separata N° 09. Yurimaguas, Perú. 11p.
4. BERNIER R. Y ALFARO M. 2006. Acidez de los suelos y efectos del encalado. Boletín INIA N° 151. Chile.
5. BOHN, H.2002. Química de suelo. Grupo Noriega Editores. México.
6. BRADY,N.C. 2008. The nature and properties of soils, 14th edition.
7. BUCKMAN O, H.1977. Naturaleza y propiedades de los suelos. The MacMillan Compan y España
8. CUMMING, J.R. y L.H. WEINSTEIN. 1990. Aluminum-mycorrhizal interactions in the physiology of pitch pine seedlings. Plant Soil 125, 7-18.
9. DALMASO, 2005. Utilización de escorias siderúrgicas en suelos agrícolas de la región Pampeana. Argentina
10. ESPINOSA, J. 1995. Acidez y encalado de los suelos. Informaciones Agronómicas (INPOFOS) 20:6-14.
11. ESPINOZA, J y MOLINA, E. 1999. Acidez y encalado de los suelos. International Plant Nutrition Institute. Primera edición.

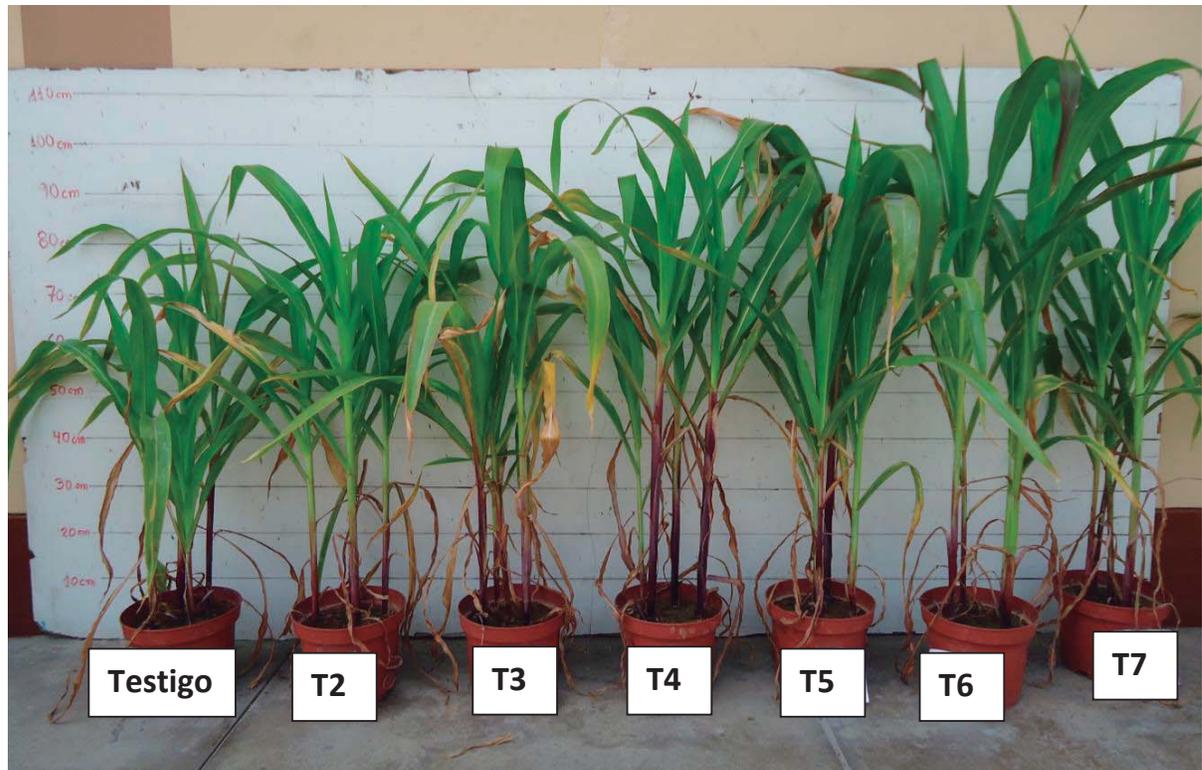
12. FASSBENDER, H. 1984. Química de Suelos con énfasis en suelos de América Latina. IICA. Turrialba, 398 p.
13. FEEDCOR, E. I. R. L., 2012. Guía para el uso de escoria de acero en agricultura y recuperación de suelos ácidos.
14. Instituto Colombiano Agropecuario. 1992. Fertilización en diversos cultivos. Quinta aproximación. Manual de asistencia técnica No. 25. Produmedios. Bogotá. 64 p.
15. LAMA D, 2013. Efecto del encalado y niveles de fósforo en el cultivo de maíz en dos suelos ácidos de Tingo María. Tesis para optar el título de Ingeniero Agrónomo.
16. MALAVOLTA, E., G.C. Vitti, y S.A. de Oliveira. 1997. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Ed. POTAFOS, 2da ed., rev. e actual. Piracicaba, Brasil. 319 p.
17. MOLINA E. 1998. Acidez de suelo y encalado. Centro de investigaciones Agronómicas Universidad de Costa Rica.
18. PANSU M. y GAUTHEYROU J. 2006. Handbook of Soil Analysis 995 p.
19. PRATT, P. F., and F. L. BAIR, 1962. Cation-exchange properties of some acid soils of California. Hilgardia 33.
20. RAVEN P, P. EVERT, R, EICHHORN, S, 1992. Biología de plantas. Editorial Reverté.
21. RENGIFO, Carlos. 2003. Efecto del encalado en un ultisol de la provincia de Lamas, en el rendimiento de maíz amarillo duro y soya en rotación.
22. SANCHEZ, P y J. BENITES. 1983. Opciones tecnológicas para el manejo racional de suelos en la selva peruana. INIPA, North Carolina State University. Programa de suelos tropicales. Separata N°06. Yurimaguas, Perú. 68p.

23. VILLAGARCÍA, M. 1982. Control de la toxicidad de aluminio en el cultivo de papa (*Solanum tuberosum*). Tesis Ing. Agr. UNA "La Molina" 94 p.
24. VOSS R. 1993. Corn. In Nutrient Deficiencies and Toxicities in Crop Plants. W. Bennet (ed.). APS Press. St. Paul, Minnesota, EE.UU.
25. ZAPATA R. 2004. Química de la acidez de suelo. Medellin, Colombia.
26. ZAVALETA, A.1992. Edafología. Lima- Perú. 1992.

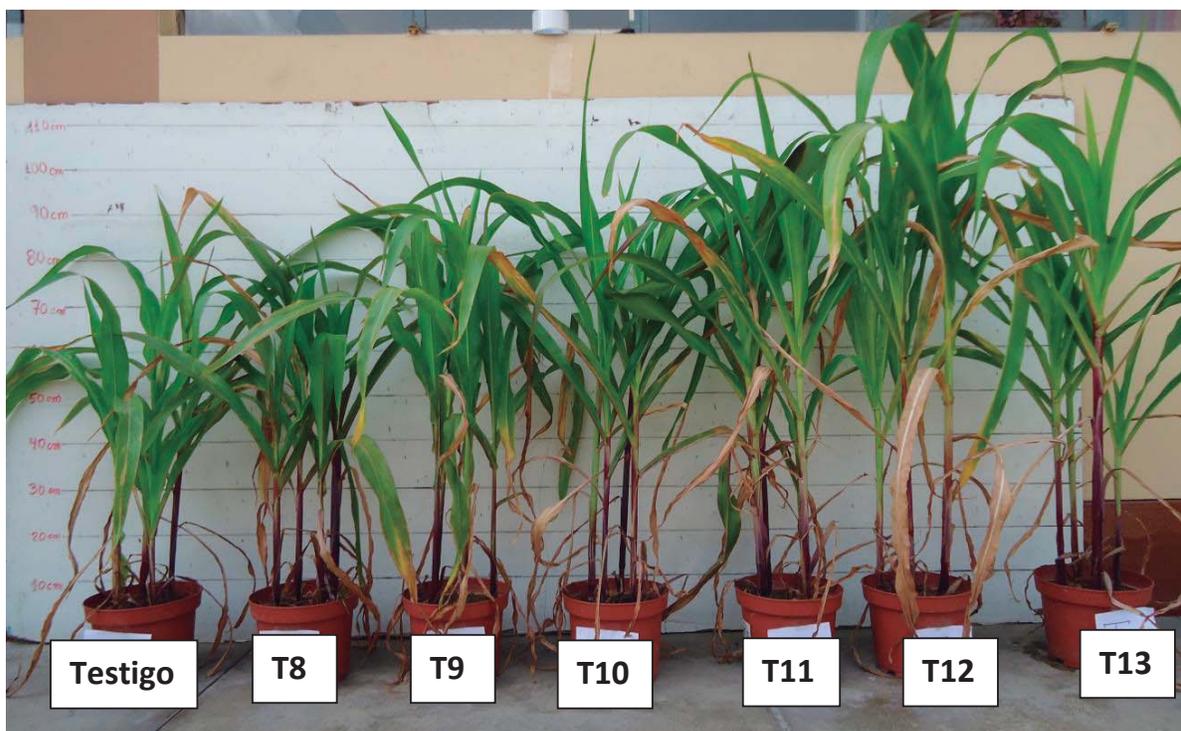
VII. ANEXOS

Anexo 1. Resumen del análisis de varianza para reacción del suelo y acidez cambiable.

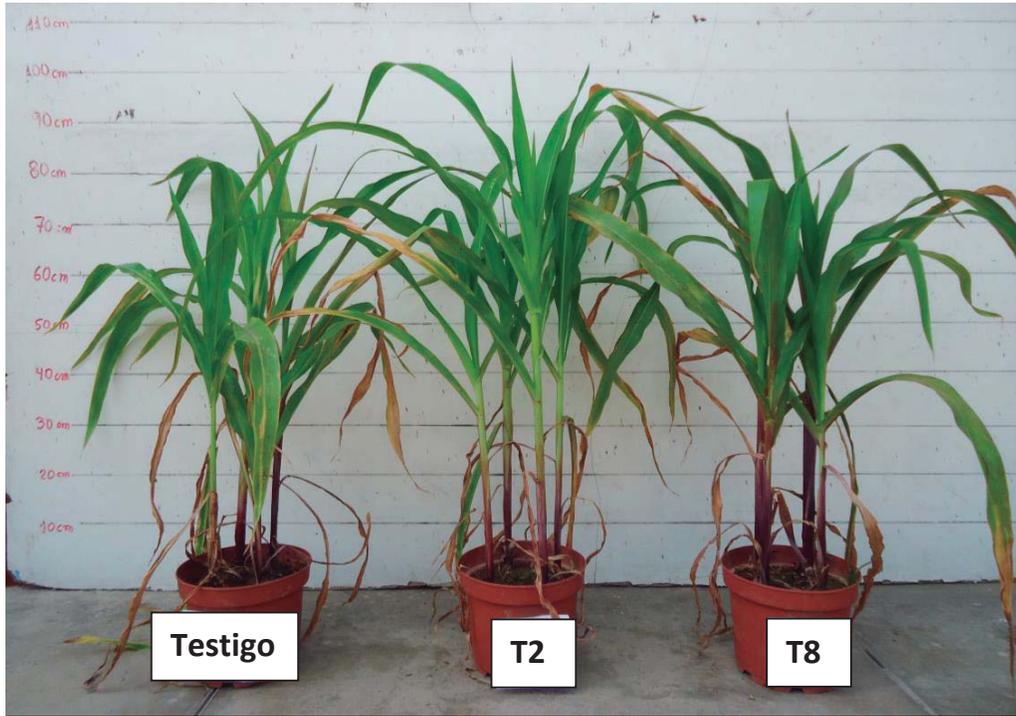
Variables	Fuente variabilidad	Gl	Sum. Cuadr.	Media cuadr.	F	p-value
Reacción del suelo	Tratamiento	12	5.3204	0.44337	21.076	3.983e-10 ***
	Residuos	25	0.5259	0.02104		
Acidez cambiable	Tratamiento	12	9.2505	0.77088	16.06	7.416e-09 ***
	Residuos	25	1.2000	0.04800		
Aluminio cambiable	Tratamiento	12	7.3751	0.61459	7.7081	9.712e-06 ***
	Residuos	25	1.9933	0.07973		
Diámetro de planta	Tratamiento	12	0.11632	0.0096929	0.768	0.6761
	Residuos	25	0.31552	0.0126207		
Altura de planta	Tratamiento	12	1571.9	130.995	2.7384	0.01621 *
	Residuos	25	1195.9	47.837		
Peso fresco	Tratamiento	12	14872	1239.33	2.0875	0.05838 .
	Residuos	25	14842	593.68		
Peso seco	Tratamiento	12	604.90	50.409	3.3772	0.004939 **
	Residuos	25	373.15	14.926		
Porcentaje de N	Tratamiento	12	0.52202	0.043502	2.023	0.06647 .
	Residuos	25	0.53760	0.021504		
Porcentaje de P	Tratamiento	12	0.036478	0.0030398	1.6125	0.1516
	Residuos	25	0.047130	0.0018852		
Porcentaje de K	Tratamiento	12	1.3596	0.113299	2.5825	0.02191 *
	Residuos	25	1.0968	0.043872		
Porcentaje de Ca	Tratamiento	12	2.85310	0.237759	9.0172	2.332e-06 ***
	Residuos	25	0.65918	0.026367		
Porcentaje de Mg	Tratamiento	12	0.12671	0.0105596	2.1167	0.05506 .
	Residuos	25	0.12472	0.0049887		



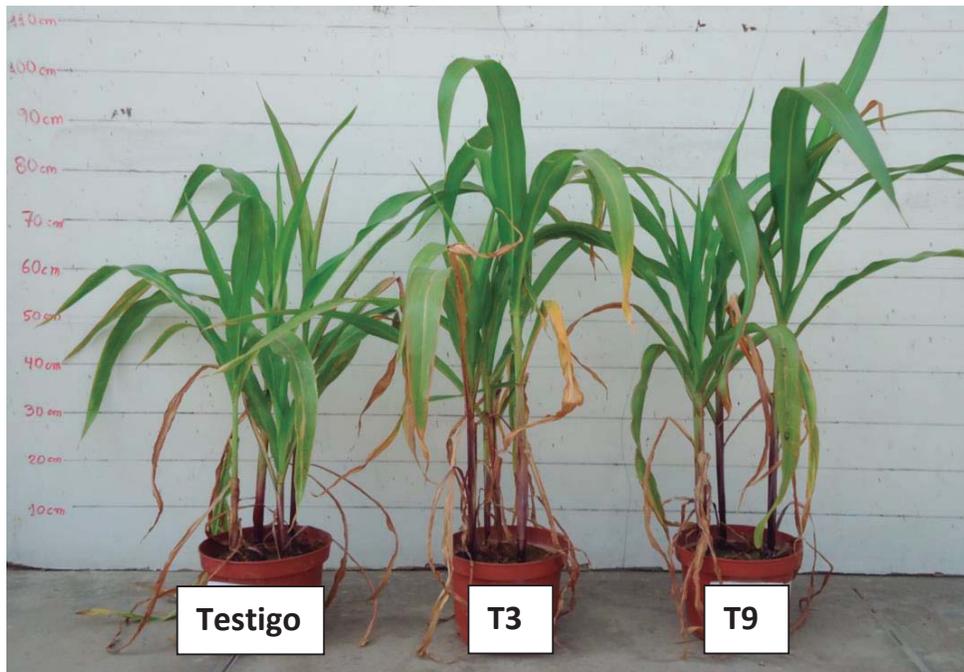
Anexo 2. Efecto de los niveles de encalado de la enmienda carbonato de calcio en el cultivo de maíz.



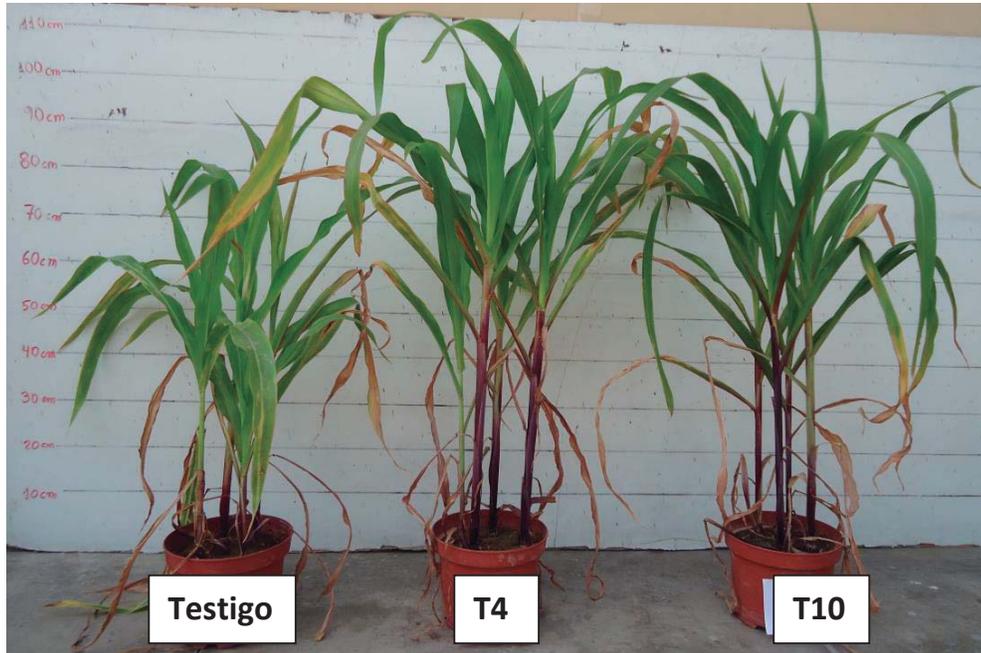
Anexo 3. Efecto de los niveles de encalado de la enmienda Escoria básica en el cultivo de maíz.



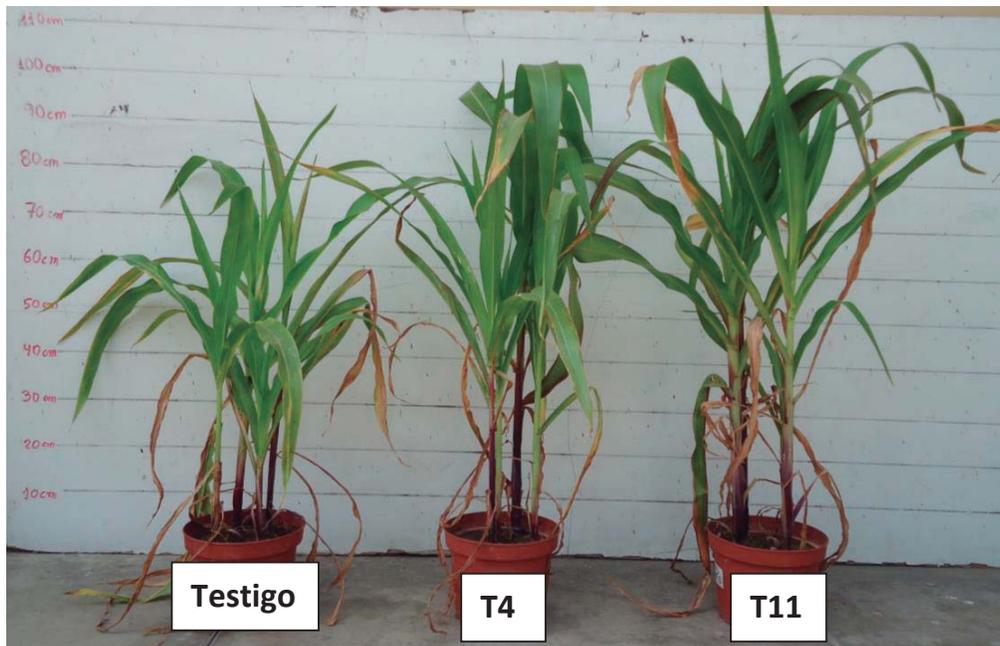
Anexo 4. Efecto de los niveles de encalado a una dosis de 0.5 meq/100g para ambas enmiendas.



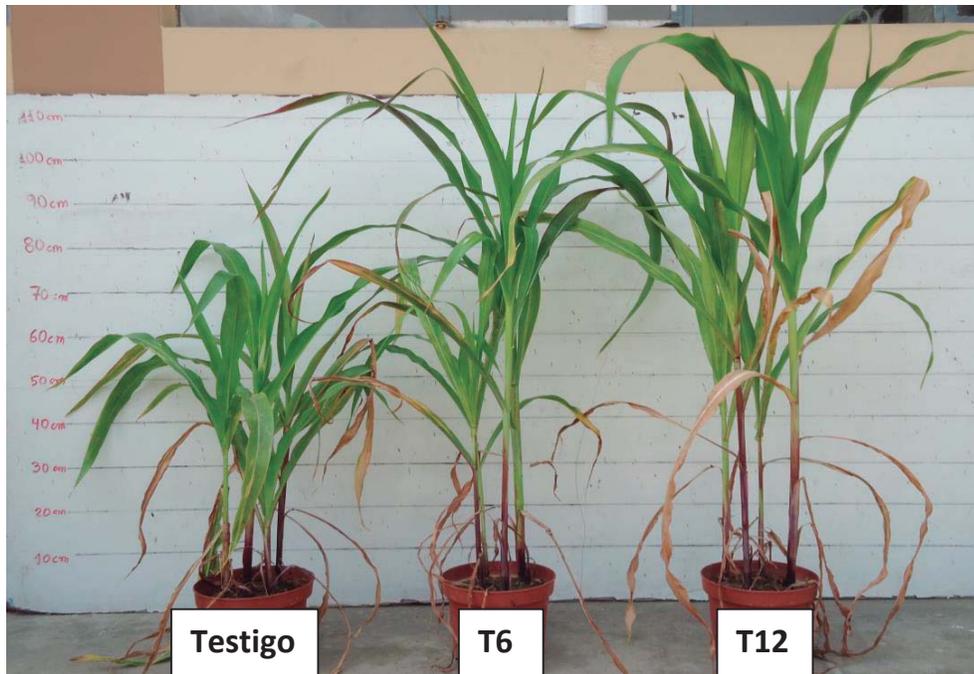
Anexo 5. Efecto de los niveles de encalado a una dosis de 1.0 meq/100 para ambas enmiendas



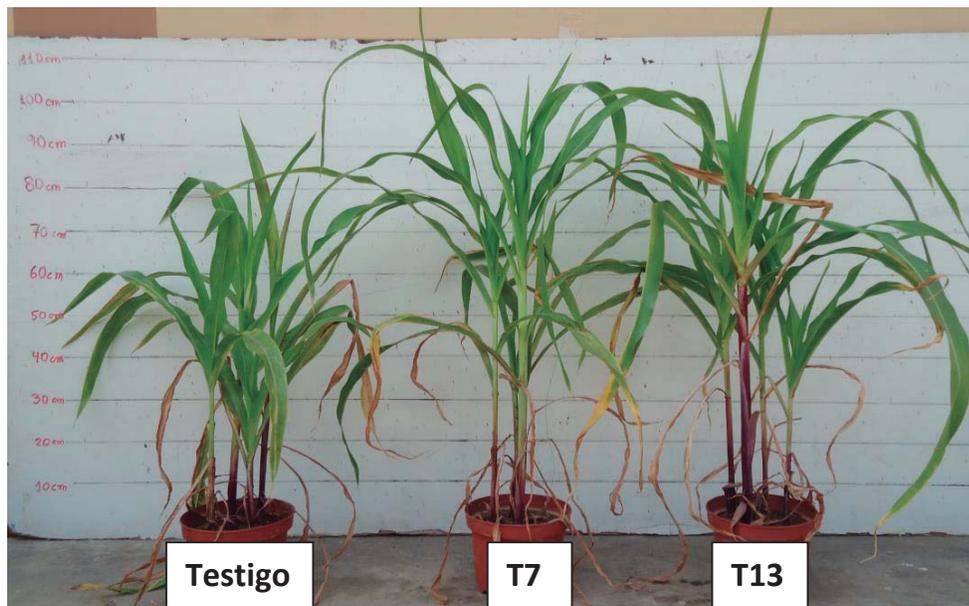
Anexo 6. Efecto de los niveles de encalado a una dosis de 1.5 meq/100 para ambas enmiendas



Anexo 7. Efecto de los niveles de encalado a una dosis de 2.0 meq/100 para ambas enmiendas



Anexo 8. Efecto de los niveles de encalado a una dosis de 2.5 meq/100 para ambas enmiendas



Anexo 9. Efecto de los niveles de encalado a una dosis de 3.0 meq/100 para ambas enmiendas