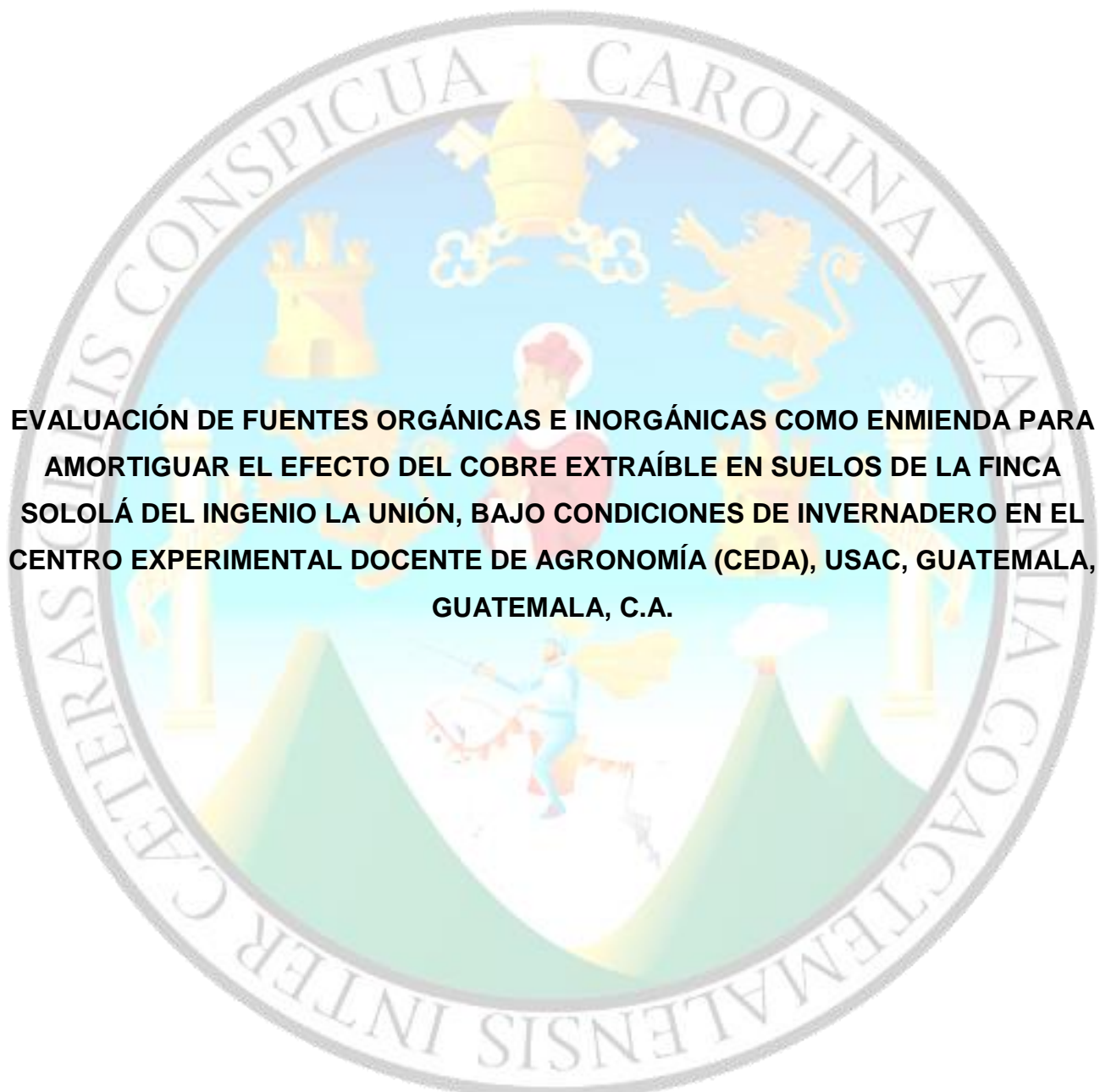


**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

**FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGRONÓMICAS Y AMBIENTALES**

The seal of the University of San Carlos of Guatemala is a circular emblem. It features a central figure of a man in a red tunic and a red hat, holding a staff. Above him is a golden crown. To the left is a golden castle, and to the right is a golden lion rampant. Below the central figure is a landscape with green hills and a white path. The seal is surrounded by a grey border with Latin text: "CAROLINA ACADEMIA COACTEMALENSIS INTER CÆTERAS CONSPICUA".

**EVALUACIÓN DE FUENTES ORGÁNICAS E INORGÁNICAS COMO ENMIENDA PARA  
AMORTIGUAR EL EFECTO DEL COBRE EXTRAÍBLE EN SUELOS DE LA FINCA  
SOLOLÁ DEL INGENIO LA UNIÓN, BAJO CONDICIONES DE INVERNADERO EN EL  
CENTRO EXPERIMENTAL DOCENTE DE AGRONOMÍA (CEDA), USAC, GUATEMALA,  
GUATEMALA, C.A.**

**CARLOS RAFAEL MILIÁN VÁSQUEZ**

**GUATEMALA, SEPTIEMBRE 2022**

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

**FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGRONÓMICAS Y AMBIENTALES**

**EVALUACIÓN DE FUENTES ORGÁNICAS E INORGÁNICAS COMO ENMIENDA PARA  
AMORTIGUAR EL EFECTO DEL COBRE EXTRAÍBLE EN SUELOS DE LA FINCA  
SOLOLÁ DEL INGENIO LA UNIÓN, BAJO CONDICIONES DE INVERNADERO EN EL  
CENTRO EXPERIMENTAL DOCENTE DE AGRONOMÍA (CEDA), USAC, GUATEMALA,  
GUATEMALA, C.A.**

**TESIS**

**PRESENTADA A LA HONORABLE JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE  
AGRONOMÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

**POR**

**CARLOS RAFAEL MILIÁN VÁSQUEZ**

**En el acto de investidura como**

**INGENIERO AGRÓNOMO EN**

**SISTEMAS DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA**

**EN EL GRADO ACADÉMICO DE LICENCIADO**

**GUATEMALA, SEPTIEMBRE 2022**

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

**FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**RECTOR**

**M.A. WALTER RAMIRO MAZARIEGOS BIOLIS**

**JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE AGRONOMÍA**

<b>Decano:</b>	<b>Ing. Agr. Waldemar Nufio Reyes</b>
<b>Vocal I:</b>	<b>Dr. Marvin Roberto Salguero Barahona</b>
<b>Vocal II:</b>	<b>Dr. Gricelda Lily Gutiérrez Álvarez</b>
<b>Vocal III:</b>	<b>Ing. Agr. MSc. Jorge Mario Cabrera</b>
<b>Vocal IV:</b>	<b>Br. Carmen Aracely García Pirique</b>
<b>Vocal V:</b>	<b>P. Agr. Mynor Fernando Almengor Orenos</b>
<b>Secretario Académico:</b>	<b>Ing. Agr. Mario Antonio Godínez López</b>

**GUATEMALA, SEPTIEMBRE 2022**

Guatemala, septiembre de 2022

Honorable Junta Directiva  
Honorable Tribunal Examinador  
Facultad de Agronomía  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Distinguidos miembros:

De acuerdo con las normas establecidas por la Ley Orgánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala, tengo el honor de someter a consideración el documento de graduación titulado:

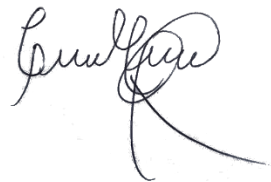
**“EVALUACIÓN DE FUENTES ORGÁNICAS E INORGÁNICAS COMO ENMIENDA  
PARA AMORTIGUAR EL EFECTO DEL COBRE EXTRAÍBLE EN SUELOS DE LA  
FINCA SOLOLÁ DEL INGENIO LA UNIÓN, BAJO CONDICIONES DE INVERNADERO  
EN EL CENTRO EXPERIMENTAL DOCENTE DE AGRONOMÍA (CEDA), USAC,  
GUATEMALA, GUATEMALA, C.A.”**

Presentado como requisito previo a optar al título de Ingeniero Agrónomo en Sistemas de Producción Agrícola, en el grado académico de Licenciado.

Esperando que el presente documento llene los requisitos necesarios para su aprobación, agradezco la atención prestada a la presente.

Atentamente

**“Id y enseñad a todos”**



**Carlos Rafael Milián Vásquez**

## **ACTO QUE DEDICO**

### **A**

- DIOS:** Por sus múltiples bendiciones y dones otorgados a lo largo de formación académica desde mis primeros años.
- MI MADRE:** Por su inagotable esfuerzo, apoyo, orientación y motivación en todo momento para poder alcanzar este triunfo.
- MI ABUELITA:** Por sus cuidados, cariño, consejos, apoyo y dedicación desde mis primeros años de vida y a lo largo de mi formación académica.
- MI FAMILIA:** Por su amor, apoyo y ánimos.
- MI FACULTAD Y MI UNIVERSIDAD:** Por constituir mi segundo hogar y ser un lugar de memorables aprendizajes, vivencias y recuerdos.

## TESIS QUE DEDICO

A

**MI UNIVERSIDAD:** Por tener el privilegio de formar parte de sus aulas.

**MI FACULTAD:** Por los conocimientos recibidos.

**MI PAÍS:** Por ser el lugar donde nací.

**MI FAMILIA:** Por siempre estar ahí.

## AGRADECIMIENTOS

### A

- DIOS:** Por la iluminación, guía y sabiduría recibida a lo largo de mi formación académica desde mis primeros años de vida.
- MI MADRE:** Por esforzarse tanto y apoyarme para culminar esta meta profesional a través de su trabajo, apoyo, consejos y buena orientación.
- MI ABUELITA:** Por estar ahí a lo largo de mi niñez y apoyarme, motivarme y aconsejarme.
- MI ASESOR:** Dr. Ovidio Aníbal Sacbajá Galindo, por su amistad y su ayuda, orientación, esfuerzo y paciencia para la asesoría de esta investigación.
- MI SUPERVISORA:** Ing. Agr. MSc. Margarita Asturias, por su orientación a lo largo de este proceso.
- Ing. Agr. Celena Carías:** Por su amistad, cariño, consejos y enseñanzas.
- Ing. Agr. Carlos López Búcaro:** Por su asesoría en la edición de este documento como director del IIA, por sus enseñanzas y dedicación como catedrático y por su amistad y cariño.

**Laboratorio de Suelo, Planta y Agua “Salvador Castillo Orellana”:** Por abrir sus puertas y acogerme para la realización de mi Ejercicio Profesional Supervisado-EPS- y la presente investigación.

**Compañeros y amigos del Laboratorio de Suelo, Planta y Agua “Salvador Castillo Orellana”:** Por compartir momentos de aprendizaje, risas y crecimiento personal, Enríque Raguex, Edi Quan, Pablo Ramazinni, Francisco Hernández (Chesco) y Heliberto Méndez.

**MI FACULTAD Y MI UNIVERSIDAD:** Por ser lugar de múltiples aprendizajes.

**MIS CATEDRÁTICOS:** Por sus enseñanzas, apoyo y consejos.

**AMIGOS Y COMPAÑEROS DE CLASE:** Por su amistad, apoyo y tiempo de calidad compartido, en especial a mi amigo Vine Buchí.

**MENCIÓN ESPECIAL:** A mis amigos Oscar Rotherham Orellana Herberth y Denis Josué López Quiñonez, por su amistad, ayuda y orientación en la edición del presente documento.

**A MIS PADRINOS DE GRADUACIÓN:** Ing. Agr. Marco Antonio Barrios Orozco por sus consejos, buena motivación, enseñanzas y cariño.  
Licda. Ligia Franco de Alvarado por su apoyo a lo largo de mi carrera y su cariño. Se les aprecia y se les quiere a ambos.

**Ing. Agr. Mario Antonio Godínez:** Por su apoyo, paciencia y orientación durante el proceso de trámites de graduación, muchas gracias.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

		PÁGINA
1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	MARCO TEÓRICO.....	2
2.1.	Marco conceptual.....	2
2.1.1.	Origen del cobre.....	2
2.1.2.	Propiedades químicas del cobre.....	2
2.1.3.	Propiedades físicas del cobre .....	3
2.1.4.	El cobre en la planta.....	3
A.	Función del cobre en la planta .....	4
B.	Toxicidad de cobre en la planta .....	5
2.1.5.	Ciclo biogeoquímico del cobre .....	6
2.1.6.	El cobre en el suelo .....	6
2.1.7.	Factores que afecta la disponibilidad de cobre en el suelo.....	8
2.1.8.	Niveles críticos de cobre extraíble en el suelo.....	10
2.1.9.	Contaminación de suelos con cobre.....	11
2.1.10.	Opciones para el manejo de suelos con altas concentraciones de cobre .....	13
A.	Enmiendas que eleven el pH .....	13
B.	Abonos orgánicos .....	14
C.	Abonos fosfatados .....	14
2.2.	Marco referencial .....	15
2.2.1.	Ubicación geográfica donde se realizó el ensayo .....	15
2.2.2.	Clima del CEDA.....	16
2.2.3.	Enmiendas evaluadas en suelos con alto contenido de cobre.....	16
A.	Enmiendas orgánicas.....	16
a.	Cachaza .....	16
b.	Compost.....	18
B.	Enmiendas inorgánicas.....	18
a.	Ceniza de bagazo de caña de azúcar .....	18
b.	Cal dolomita .....	19

**PÁGINA**

2.2.4.	Antecedentes de investigación .....	20
3.	OBJETIVOS .....	23
3.1.	Objetivo general .....	23
3.2.	Objetivos específicos .....	23
4.	HIPÓTESIS .....	23
5.	METODOLOGÍA .....	24
5.1.	Fase de laboratorio .....	24
5.2.	Fase de invernadero .....	25
5.2.1.	Pre-ensayo .....	25
5.2.2.	Ensayo .....	27
A.	Muestreo de suelos .....	27
B.	Muestreo de enmiendas .....	27
C.	Preparación del suelo .....	27
D.	Llenado de macetas .....	27
E.	Aplicación de los tratamientos .....	28
F.	Planta indicadora .....	28
G.	Diseño experimental .....	28
H.	Unidad experimental .....	28
I.	Tratamientos evaluados .....	29
J.	VARIABLES DE RESPUESTA .....	30
a.	Cobre extraíble en suelo .....	30
b.	pH del suelo .....	30
c.	Biomasa aérea en base seca .....	30
d.	Biomasa radicular en base seca .....	30
K.	Manejo del ensayo .....	31
a.	Riego .....	31
b.	Desmalezado .....	31
c.	Fertilización .....	31
d.	Cosecha .....	31
e.	Colecta del suelo .....	31

**PÁGINA**

f.	Análisis de la información.....	32
g.	Modelo estadístico-matemático utilizado.....	32
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	33
6.1.	Caracterización físico-química del suelo utilizado en la investigación.....	33
6.2.	Caracterización química de los materiales evaluados como enmienda .....	34
6.3.	Aporte nutricional teórico de las enmiendas.....	35
6.4.	Pre-ensayo.....	36
6.5.	Ensayo .....	37
6.5.1.	Cobre extraíble en suelo y pH .....	37
A.	Análisis de varianza para las variables cobre extraíble en suelo y pH .....	38
B.	Prueba de comparación múltiple de medias para cobre extraíble y pH .....	39
6.5.2.	Biomasa aérea y radicular en base seca.....	41
A.	Análisis de varianza para biomasa aérea y radicular en base seca .....	42
B.	Prueba de medias de Tukey para biomasa aérea y radicular en base seca .....	43
7.	CONCLUSIONES.....	47
8.	RECOMENDACIONES .....	48
9.	BIBLIOGRAFÍA .....	49
10.	ANEXOS .....	54
10.1.	Valores de pH del pre-ensayo .....	54
10.2.	Determinación de presencia de arcilla amorfa en suelo .....	55
10.3.	Medición de pH en NaF .....	58
10.4.	Croquis del ensayo en el diseño completamente al azar utilizado .....	59
10.5.	Estado del ensayo previo a la cosecha .....	60
10.6.	Ensayo cosechado .....	63
10.7.	Post-ensayo de niveles de fósforo .....	64

## ÍNDICE DE CUADROS

### PÁGINA

Cuadro 1. Niveles críticos de cobre extraíble en suelo según solución extractora y autor.	10
Cuadro 2. Composición de la cachaza.....	17
Cuadro 3. Composición promedio de cachaza (base seca) de ingenios de Guatemala. ...	17
Cuadro 4. Nutrientes totales y disponibles por tonelada de cachaza fresca. ....	18
Cuadro 5. Composición química de la ceniza de bagazo de caña.....	19
Cuadro 6. Composición química de la cal dolomita.....	20
Cuadro 7. Determinaciones realizadas al suelo y enmiendas evaluadas.....	24
Cuadro 8. Tratamientos evaluados en el pre-ensayo.....	26
Cuadro 9. Tratamientos evaluados. ....	29
Cuadro 10. Análisis químico y físico de suelo. ....	33
Cuadro 11. Análisis químico de los materiales evaluados como enmiendas. ....	34
Cuadro 12. Aporte nutricional total de las enmiendas evaluadas.....	35
Cuadro 13. Resultados promedio de pH y cobre extraíble del pre-ensayo. ....	36
Cuadro 14. Resultados de cobre extraíble en suelo y pH. ....	38
Cuadro 15. Análisis de varianza para la variable cobre extraíble en suelo y pH.....	38
Cuadro 16. Prueba de medias de Tukey para cobre extraíble en suelo y pH. ....	39
Cuadro 17. Resultados de biomasa aérea y radicular en base seca. ....	41
Cuadro 18. Análisis de varianza para biomasa aérea y radicular en base seca. ....	42
Cuadro 19. Prueba de comparación múltiple de medias para biomasa aérea y radicular..	43
Cuadro 20A. Valores de pH del suelo para unidades experimentales del pre-ensayo.....	54
Cuadro 21A. Disposición de las unidades experimentales del ensayo. ....	59
Cuadro 22A. Tratamientos evaluados en post-ensayo.....	64

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>PÁGINA</b>
Figura 1. Unidad experimental. ....	29
Figura 2. Comportamiento del cobre extraíble en función del pH del suelo. ....	40
Figura 3. Producción de biomasa aérea en función de cobre extraíble en suelo. ....	46
Figura 4A. Preparación de la muestra. ....	55
Figura 5A. Muestra después de agregar NaF. ....	56
Figura 6A. Resultado de presencia de arcilla amorfa en suelo. ....	57
Figura 7A. Medición de pH en NaF con potenciómetro. ....	58
Figura 8A. Repetición completa del ensayo. ....	60
Figura 9A. Comparación entre testigo absoluto y enmiendas orgánicas evaluadas. ....	61
Figura 10A. Comparación entre testigo absoluto y enmiendas inorgánicas evaluadas. ....	62
Figura 11A. Plantas cosechadas. ....	63
Figura 12A. Plantas utilizadas en post-ensayo. ....	64

**EVALUACIÓN DE FUENTES ORGÁNICAS E INORGÁNICAS COMO ENMIENDA PARA AMORTIGUAR EL EFECTO DEL COBRE EXTRAÍBLE EN SUELOS DE LA FINCA SOLOLÁ DEL INGENIO LA UNIÓN, BAJO CONDICIONES DE INVERNADERO EN EL CENTRO EXPERIMENTAL DOCENTE DE AGRONOMÍA (CEDA), USAC, GUATEMALA, GUATEMALA, C.A.**

**EVALUATION OF ORGANIC AND INORGANIC SOURCES AS AMENDMENT TO BUFFER THE EFFECT OF EXTRACTABLE COPPER IN SOIL OF FINCA SOLOLÁ OF INGENIO LA UNIÓN UNDER GREENHOUSE CONDITIONS AT THE CENTRO EXPERIMENTAL DOCENTE DE AGRONOMÍA (CEDA). USAC, GUATEMALA, GUATEMALA, C.A.**

**RESUMEN**

La nutrición vegetal es un factor determinante para la buena producción agrícola, el recurso suelo juega un papel muy importante como proveedor de nutrientes y reservorio de agua, por lo que debe ser manejado apropiadamente para obtener el mayor provecho de forma sostenible.

La presente investigación parte de un problema actual que se ha presentado en la finca Sololá del Ingenio La Unión, ubicada en el municipio de Tiquisate, Escuintla, en la cual existen niveles de cobre en el suelo superiores ( $54.38 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) respecto al rango de suficiencia,  $2 \text{ mg.kg}^{-1} - 4 \text{ mg.kg}^{-1}$  para la solución extractora Mehlich I, lo que ha causado que el rendimiento de la caña de azúcar disminuya un 20 % según las autoridades de la finca.

El ensayo se realizó a nivel de invernadero en el Centro Experimental Docente de Agronomía -CEDA- de la Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala, donde se evaluaron dos enmiendas orgánicas ( $40 \text{ T cachaza.ha}^{-1}$  y  $10 \text{ T}$

compost.ha<sup>-1</sup>), dos enmiendas inorgánicas (10 T cal dolomita.ha<sup>-1</sup> y 10 T ceniza de bagazo de caña de azúcar.ha<sup>-1</sup>) y una mezcla de los cuatro materiales, para disminuir la solubilidad del cobre en el suelo.

Las variables de respuesta analizadas fueron cobre extraíble en suelo con la solución Mehlich I, pH del suelo y producción de biomasa área y radicular en base seca de sorgo (*Sorghum bicolor* L.).

Los resultados mostraron los valores más bajos de cobre extraído en suelo 60 días después de la aplicación del tratamiento 5 (T5, 10 T.ha<sup>-1</sup> cal dolomita), debido al máximo aumento del pH del suelo que provocó esta enmienda, lo cual disminuyó la solubilidad de este metal, sin embargo, la mayor producción de biomasa aérea y radicular en base seca no coincidió con la menor media de cobre en suelo sino con la aplicación de los tratamientos 2 (T2, 40 T.ha<sup>-1</sup> cachaza) y 6 (T6, mezcla).

## 1. INTRODUCCIÓN

El suelo es uno de los recursos más importantes e influyentes en la producción agrícola, aunque esta depende de la interacción de varios factores como el clima, manejo, genética del cultivo, entre otros, este juega un papel muy importante al actuar como proveedor de nutrientes y reservorio de agua. A pesar de todas las bondades de este recurso, un mal manejo del mismo, por tiempo prolongado, puede generar problemas a largo plazo.

El cobre es un elemento esencial en la nutrición vegetal, ya que está involucrado en la activación enzimática, actúa como transportador de electrones en el proceso de fotosíntesis, es componente estructural de ciertas enzimas, proteínas y está relacionado a la síntesis de lignina y fitoalexinas, las cuales sirven como medio de defensa frente a agentes patógenos.

En los suelos de la finca Sololá del Ingenio La Unión, donde se ha presentado problemas de bajos rendimientos (20 % menos) en caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.), el problema puede estar asociado a un alto contenido de cobre en el suelo según los análisis realizados, causados por malos manejos en épocas anteriores los cuales repercuten en el desarrollo y rendimiento de caña actual.

La presente investigación fue realizada bajo condiciones de invernadero en el Centro Experimental Docente de Agronomía –CEDA- Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala, donde se evaluaron enmiendas para amortiguar el efecto del cobre en el suelo de la finca Sololá, Ingenio La Unión y midiendo el efecto de cada enmienda sobre el contenido de cobre extraíble en suelo, el pH del suelo y la producción de biomasa aérea y radicular en base seca de sorgo (*Sorghum bicolor* L.).

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Marco conceptual**

#### **2.1.1. Origen del cobre**

La palabra cobre proviene del latín Cuprum, procedente de la palabra “Chipre”, isla en la cual este metal era abundante. Los yacimientos de la isla de Chipre surtieron de cobre a las civilizaciones del Medio Oriente y Europa antes de que esta fuera parte del Imperio Romano.

El cobre fue el primer metal descubierto por el hombre y el primero en ser manipulado, según estudios arqueológicos, ha sido utilizado desde el año 5000 a.C (R Vilar, 2018).

#### **2.1.2. Propiedades químicas del cobre**

El cobre es el elemento químico con número atómico 29 en la tabla periódica, es un metal de transición. Es el primer elemento del subgrupo Ib de la tabla periódica, el cual incluye metales preciosos como el oro y la plata. El átomo de cobre tiene una estructura electrónica  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^1$ . El peso atómico del cobre (Cu) es 63.546 g/mol (Lenntech, 2016).

La valencia más común del ion cobre es  $2^+$  (ion cúprico) y el ion  $Cu^{1+}$  (cuproso). La valencia  $3^+$  es poco común, ya que solo ocurre con algunos compuestos de naturaleza inestable, por lo que rara vez se le encuentra. Este elemento presenta dos isótopos estables,  $Cu^{63}$  y  $Cu^{65}$ , también tiene nueve isótopos inestables, radioactivos.

Los compuestos de cobre más comunes, de fabricación industrial, son el sulfato de cobre pentahidratado,  $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ , conocido también como azul de vitriolo, el cloruro de cobre ( $CuCl_2$ ), óxido de cobre ( $CuO$ ) y cianuro de cobre ( $CuCN$ ) (Lenntech, 2016).

### **2.1.3. Propiedades físicas del cobre**

El cobre tiene una densidad de 8.96 g/cm<sup>3</sup> a 20 °C en estado sólido puro, en cuanto al cobre comercial su densidad varía en función de su proceso de manufactura, entre 8.90 g/cm<sup>3</sup> a 8.94 g/cm<sup>3</sup>.

El punto de fusión del cobre es de 1083+/-0.1 °C, su punto de ebullición es de 2,595 °C. El cobre es un metal no magnético, buen conductor de electricidad y con una alta conductividad térmica, es tenaz y resistente al desgaste (Lenntech, 2016).

El cobre se considera un metal pesado por tener una densidad mayor a 4 g/cm<sup>3</sup> (Facsa, 2017; Lenntech, 2016; Ministerio de Transición Ecológica de España, n.d.).

Al ser un metal muy maleable y dúctil, no era lo suficientemente resistente para ser utilizado en herramientas fuertes y resistentes, por lo que se hicieron las primeras mezclas (aleaciones) de cobre y estaño en proporción dos a uno produciendo una aleación más resistente, el bronce (Ramón Vilar, 2018).

### **2.1.4. El cobre en la planta**

El cobre en la nutrición vegetal es un micronutriente esencial, debido a que la planta lo requiere en bajas cantidades (LEZCANO, 2000). Según Bertsch (1995), el cobre puede ser absorbido por la planta en forma de Cu<sup>2+</sup>, CuOH<sup>+</sup>, CuCl<sup>+</sup>. La planta puede absorber el cobre a través de la raíz en forma de sal o a partir de un complejo orgánico como el EDTA (Pérez Leal, 2017). La forma metabólicamente activa dentro de la planta es el ion cúprico (Cu<sup>2+</sup>). Este elemento es inmóvil dentro de la planta (Bertsch, 1995).

La absorción por parte de la planta se da a través de la epidermis radicular, el movimiento iónico desde la epidermis hasta la endodermis se facilita mediante transporte o difusión apoplástica (intercelular). El transporte de cobre a través de la membrana plasmática

ocurre mediante canales o transportadores, que constituyen la única vía para pasar de la endodermis y llegar al sistema vascular y la traslocación de cobre desde la raíz hacia las hojas fluye a través del xilema de forma pasiva por la corriente de transpiración (Villegas Torres et al., 2015).

### **A. Función del cobre en la planta**

La función del cobre en el metabolismo de la planta radica en que es componente de enzimas, como las fenolasas, lactasas y la enzima oxidasa del ácido ascórbico; el cobre es un elemento estructural de ciertas proteínas como la plastocianina presente en el cloroplasto, por lo que tiene participación en la fotosíntesis.

Promueve la formación de vitamina A y es activador de varias enzimas, también actúa como conductor electrónico en la respiración celular y está implicado en la biosíntesis de lignina (Bertsch, 1995).

El cobre forma parte de muchas proteínas implicadas y de suma importancia para el metabolismo de la planta, desempeñando papeles fundamentales en la fotosíntesis, respiración celular y desintoxicación de radicales superóxido y en el proceso de lignificación (Kyrkby & Romheld, 2008).

Este elemento está presente en tres distintos tipos de proteínas, proteínas azules, las cuales no tienen función oxidativa y sirven para la transferencia de electrones, como lo es la plastocianina, proteínas no azules, las cuales producen peroxidasas y oxidan monofenoles a difenoles, y proteínas multicobre que contienen como mínimo cuatro átomos de cobre por molécula y actúan como oxidasas, tal es el caso de la oxidasa del ácido ascórbico (Pérez Leal, 2017).

Las enzimas superóxido dismutasa son las responsables de la desintoxicación que produce el O<sub>2</sub> generado en la fotosíntesis, dichos radicales superóxido pueden causar

intoxicación y daño severo a la célula vegetal, por lo que la presencia de estas enzimas es vital para la vida de la planta (Kyrkby & Romheld, 2008).

Las enzimas polifenol oxidasa, ascorbato oxidasa, y diamino oxidasa que contienen cobre en su estructura, están presentes en la pared celular y participan en la síntesis de fenol, bioquinona y sustancias melanóticas y lignina. Existen sustancias melanóticas como las fitoalexinas que inhiben la germinación de esporas y el crecimiento de hongos fitopatógenos; aunado a esto, la formación de lignina forma una barrera física como medio de defensa de la planta frente a agentes patógenos (Kyrkby & Romheld, 2008).

## **B. Toxicidad de cobre en la planta**

El cobre resulta tóxico para las plantas cuando es absorbido en gran cantidad porque este cataliza la formación de radicales hidroxilo, se produce un estrés oxidativo en la planta y consecuentemente aumenta la respuesta de antioxidantes debido a la alta producción de radicales libres de oxígeno altamente tóxicos. Puede haber inhibición de la fotosíntesis, ya que al haber altos contenidos de cobre en la planta se inhibe la translocación de hierro, el cual es importante para este proceso (Villegas Torres et al., 2015).

Contenidos de cobre arriba de  $20 \text{ mg.kg}^{-1}$  en tejido vegetal pueden presentarse síntomas de toxicidad en la planta (Fresno García, 2017; Pérez Leal, 2017).

La toxicidad de cobre suele observarse como una deficiencia de hierro, ya que la presencia en exceso de cobre inhibe la translocación de este elemento a las partes jóvenes de la planta, por lo que pueden observarse síntomas como clorosis general, que puede iniciar como clorosis intervenal, necrosis en ápice y borde de hojas viejas. También pueden manifestarse daños en el sistema radicular y poco desarrollo del mismo (Bertsch, 1995; Cordero y Ramírez, 1979).

Los síntomas de toxicidad de cobre se manifiestan en las hojas más viejas de la planta como manchas acuosas que pasan a color pardo y luego negro, puede haber falta de crecimiento de las hojas y muerte radicular por la inhibición del crecimiento de la raíz y síntomas de deficiencia de hierro. La falta de crecimiento en las hojas provoca un menor crecimiento en toda la planta (Lora Silva, 2018).

El exceso de cobre puede causar antagonismo con otros nutrientes esenciales para la planta, como el hierro, manganeso, molibdeno y zinc, por lo que excesos de cobre en el suelo pueden inducir una baja absorción de estos elementos y consecuentemente una deficiencia de los mismos en la planta (Sela, 2019).

#### **2.1.5. Ciclo biogeoquímico del cobre**

El cobre es un elemento metálico cuyo ciclo biogeoquímico inicia en el suelo con la meteorización de la roca, las plantas lo absorben a través de sus raíces y lo integran a su estructura como moléculas complejas, tales como las enzimas, especialmente oxidasas, vitales para los procesos celulares. Los animales herbívoros consumen plantas e incorporan el cobre en su metabolismo, ya que este también es un nutriente esencial para ellos (Ochoa, 2019; Rodríguez, 2006).

Al morir, las plantas y los animales se degradan y liberan compuestos orgánicos al suelo que se mineralizan y devuelven el cobre al suelo, donde pueden ser reabsorbidos por las plantas para reiniciar este ciclo (Ochoa, 2019; Rodríguez, 2006).

#### **2.1.6. El cobre en el suelo**

Según Lenntech (2016), la mayoría del cobre del mundo proviene de los sulfuros minerales como la colcocita, covelita, calcopirita, bornita y enargita. Los minerales oxidados de cobre son la cuprita, tenorita, malaquita, azurita, crisocola y brocantita (Lenntech, 2016).

El principal mineral de cobre es la calcopirita, un mineral dorado formado por sulfuros de cobre y hierro que representa alrededor del 80 % del cobre total del mundo y que se extrae actualmente en USA, Canadá, Chile y Rusia (Ramón Vilar, 2018). La abundancia del cobre total en la corteza terrestre es de alrededor de 50 mg.kg<sup>-1</sup>. En la mayoría de suelos agrícolas los niveles de cobre total oscilan de 20 mg.kg<sup>-1</sup> a 50 mg.kg<sup>-1</sup> (Chamorro M et al., 1972).

El cobre disponible se encuentra en la solución del suelo y en las posiciones de intercambio iónico, donde puede ser reemplazado fácilmente por otros cationes (Chamorro M et al., 1972). Por lo general el cobre en la solución del suelo oscila entre los 0.50 µg.L<sup>-1</sup> a 135 µg.L<sup>-1</sup> (0.0005 mg.kg<sup>-1</sup> a 0.135 mg.kg<sup>-1</sup>) (Fresno García, 2017). Un suelo potencialmente deficitario contiene 1 mg.kg<sup>-1</sup> a 2 mg.kg<sup>-1</sup> de cobre disponible (Tasistro, 2015).

El cobre está principalmente unido a la materia orgánica, óxidos de hierro y manganeso y en la red cristalina de los silicatos del suelo. Este metal puede precipitar como hidróxido de cobre, carbonato de cobre en suelos básicos o fosfato de cobre en suelos ácidos (Von-Suttner, 2019). Este elemento es inmóvil en el suelo y no se degrada, por lo que puede permanecer por mucho tiempo en el (Bertsch, 1995; Cordero y Ramírez, 1979).

Las propiedades del suelo que están muy relacionadas a la retención del cobre, corresponden una con alta capacidad de intercambio catiónico (CIC), donde existen más espacios para retener este elemento por ser un catión (iones con carga positiva). Según Tasistro (2015), los suelos arcillosos por naturaleza poseen mayor disponibilidad de cobre que los suelos arenosos, especialmente si estos últimos están muy lixiviados. El pH define la disponibilidad del cobre en el suelo (Sacristán Moraga, 2015; Tasistro, 2015).

El cobre puede ser adsorbido en distintas proporciones como Cu<sup>2+</sup> y CuX<sup>+</sup>, es decir, CuCH<sub>3</sub>COO<sup>+</sup>, CuCl<sup>+</sup>, CuOH<sup>+</sup>, etc., de tal manera que el intercambio iónico no se da de forma estequiométrica y el Cu<sup>2+</sup> adsorbido puede exceder la capacidad de intercambio catiónico de los coloides si es adsorbido en alguna de las formas CuX<sup>+</sup> (Cordero y Ramírez, 1979).

### 2.1.7. Factores que afecta la disponibilidad de cobre en el suelo

El cobre en el suelo no siempre está disponible en grandes cantidades, existen diversos factores que pueden afectar su disponibilidad, entre ellos se tiene:

- pH del suelo: el pH del suelo afecta la disponibilidad de cobre porque a pH mayores a 7 su solubilidad disminuye y aumenta a pH menores a 6. Entre más alto es el valor del pH menor será la disponibilidad de cobre. La adsorción de cobre decrece al incrementar el contenido de aluminio en el suelo, lo que ocurre en suelos muy ácidos. Según Lindsay (1972), citado por Mengel y Kirkby (2000), el nivel de cobre en la solución del suelo disminuye al aumentar el pH debido a la adsorción más fuerte del cobre al complejo de cambio del suelo y a la disminución de la solubilidad de este metal (Mengel & Kirkby, 2000).

Al aumentar el pH, aumenta la fuerza de adsorción con la que el cobre es retenido al cambiador, que pueden ser óxidos de hierro, óxidos de manganeso, arcilla y materia orgánica. Kishk y Hassan, citados por Cordero y Ramírez, (1979) estudiaron la adsorción y liberación del cobre en la arcilla, quienes encontraron que la adsorción aumentó con incrementos del pH. La baja adsorción a pH's bajos se atribuyó al efecto de competencia del cobre con los iones hidrogeno,  $H^+$ , y a la liberación de magnesio, hierro y aluminio de la capa octaédrica de los minerales de arcillas tipo 2:1 en soluciones acidas. El cobre estaba más disponible bajo estas condiciones (Cordero y Ramírez, 1979).

La alta adsorción de cobre a pH's altos está relacionada con la ausencia de iones hidrogeno y con el incremento de las cargas negativas dependientes del pH para el caso de la caolinita y la gibbsita. La desadsorción de cobre indica que las caolinitas y las montmorillonitas liberan grandes cantidades de cobre adsorbido a bajos valores de pH. Un suelo con pH entre 6 a 6.50 insolubiliza el cobre intercambiable cuando su concentración es de  $200 \text{ mg.kg}^{-1}$ . A pH inferior a 7.30 la forma soluble del cobre,  $\text{Cu}^{2+}$ , es abundante, mientras que a pH superiores a 7.30 la forma predominante es  $\text{CuOH}^+$

(Cordero y Ramírez, 1979).

- Contenido de materia orgánica: de los iones metálicos presentes en el suelo, como el hierro ( $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ), manganeso ( $\text{Mn}^{2+}$ ), zinc ( $\text{Zn}^{2+}$ ) y cobre ( $\text{Cu}^{2+}$ ), es el cobre el que presenta una mayor afinidad a enlazarse y formar complejos muy estables con la materia orgánica del suelo, es por eso que en suelos orgánicos puede presentarse deficiencia de cobre (Cordero y Ramírez, 1979). La materia orgánica forma complejos órgano-metálicos con el cobre a partir de los ácido húmicos y fúlvicos, siendo estos últimos los más activos, los cuales son muy estables y es por eso que la materia orgánica contribuye a la fijación de cobre (Chamorro M et al., 1972).
- Textura del suelo: por naturaleza, un suelo arenoso posee bajos contenidos de cobre. Un suelo arcilloso tiende a tener una mayor disponibilidad de cobre y una mayor retención de este elemento (Tasistro, 2015).
- Mineralogía de las arcillas: las vermiculitas muestran una alta retención de cobre. En suelos aluviales con altos contenidos de materia orgánica y arcillas predominantes tipo montmorillonita, la retención de cobre es alta. Este comportamiento está relacionado también con el pH del suelo, debido a que la adsorción de cobre es baja ante bajos valores de pH. En el caso de la caolinita y la gibbsita, existe una alta adsorción de cobre a pH's altos se relaciona con la ausencia de iones hidrógeno y el incremento de las cargas negativas dependientes del pH.
- Iones antagonistas: la presencia de ciertos iones en el suelo puede generar antagonismo para la absorción del cobre para las plantas, altos contenidos de nitrógeno y fósforo dificultan la absorción de cobre y un exceso de zinc o manganeso puede provocar deficiencia de cobre (Cordero y Ramírez, 1979; Sela, 2019).

### 2.1.8. Niveles críticos de cobre extraíble en el suelo

Debido a la variabilidad de criterios respecto a niveles críticos de cobre extraíble en suelo, en el cuadro 1 se presentan algunos valores expresados en  $\text{mg.kg}^{-1}$  de suelo, con su interpretación, cultivo, solución extractora y autor.

Cuadro 1. Niveles críticos de cobre extraíble en suelo según solución extractora y autor.

Nivel crítico ( $\text{mg.kg}^{-1}$ )	Interpretación	Cultivo	Solución extractora	Autor
<1	Bajo contenido	General	$\text{NaHCO}_3$ 0.50 N + EDTA 0.05 M pH 8.50 (Olsen modificada)	Lora Silva, 2018.
>2	Tóxico	General	$\text{NaHCO}_3$ 0.50 N + EDTA 0.05 M pH 8.50 (Olsen modificada)	Lora Silva, 2018.
<0.50	Bajo	Pastos	HCl 0.05 N+ $\text{H}_2\text{SO}_4$ 0.025 N (solución de Mehlich)	Lora Silva, 2018.
>1	Tóxico	Pastos	HCl 0.05 N+ $\text{H}_2\text{SO}_4$ 0.025 N (solución de Mehlich I)	Lora Silva, 2018.
0.40	Critico	General	Mehlich III	Cabalceta & Molina, 2006.
1-3	-	Mayoría de cultivos	$\text{NaHCO}_3$ 0.50 N+ EDTA 0.05 M	Quintero Durán, s.f.
1-1.40	-	Mayoría de cultivos	HCl 0.05 N+ $\text{H}_2\text{SO}_4$ 0.025 N (solución de Mehlich I)	Quintero Durán, s.f.
1-5	Adecuado	General	Mehlich III	Cabalceta & Molina, 2006.
1-20	óptimo	General	Mehlich III	Molina, 2002.

Fuente: elaboración propia, 2021.

Los niveles críticos de cobre varían según la solución extractora utilizada y el cultivo, de  $0.40 \text{ mg.kg}^{-1}$  a  $5 \text{ mg.kg}^{-1}$  para cultivos en general, en el caso de los pastos valores superiores a  $1 \text{ mg.kg}^{-1}$  pueden resultar tóxicos, esto indica que estos son más susceptibles a la

toxicidad de cobre que otros cultivos. Los rangos críticos varían de  $1 \text{ mg.kg}^{-1}$  a  $5 \text{ mg.kg}^{-1}$  para cultivos en general, exceptuando la solución extractora Mehlich III, con la que el rango crítico es más amplio ( $1 \text{ mg.kg}^{-1}$  a  $20 \text{ mg.kg}^{-1}$ ), considerándose valores óptimos aquellos que estén comprendidos en dicho rango.

### **2.1.9. Contaminación de suelos con cobre**

El problema de contaminación por cobre, se da mayoritariamente en suelos agrícolas, como consecuencia del manejo de estos, la concentración de este metal en el suelo puede aumentar (Sacristán Moraga, 2015).

La entrada de cobre al sistema suelo se da por diferentes vías, ya sea por contaminación atmosférica, como las cenizas provocadas por incendios, por ejemplo; alteración del material parental y aportes externos de origen antrópico, donde se encuentra la contaminación y manejo que el hombre le da al suelo (Sacristán Moraga, 2015).

Dentro de las fuentes de contaminación de suelos con cobre provocadas por el hombre, se encuentran la aplicación de fertilizantes en exceso que contengan este elemento, aplicaciones de fungicidas o cualquier otro pesticida que contenga este elemento, como el excesivo uso del caldo bordelés reportado en Europa desde finales del siglo XIX y en los suelos antes cultivados con banano en Costa Rica en los años de 1930 a 1950 (Cordero y Ramírez, 1979).

También el uso de productos fitosanitarios como fungicidas e insecticidas, abonos orgánicos, lodos de depuración, aguas residuales de la industria, emisiones atmosféricas de fábricas y vertidos de actividades urbano-industriales próximas a suelos agrícolas pueden provocar contaminación de cobre (Sacristán Moraga, 2015).

El caso más representativo de contaminación de cobre en el suelo se presentó en los viñedos europeos debido a la acumulación de este elemento en el suelo proveniente de las constantes y masivas aplicaciones de caldo bordelés (sulfato de cobre + carbonato de calcio) para el control de las enfermedades fungosas, principalmente el mildiu de la vid (*Plasmopara vitícola* Berl. y de Toni), lo que comenzó a causar preocupación a finales del siglo XIX.

En Costa Rica, según Cordero y Ramírez (1979), el efecto acumulativo y tóxico de cobre en los suelos se debe al desmesurado uso de caldo bordelés que se realizaba por parte de las compañías fruteras para el control de enfermedades fungosas en el cultivo de banano. Esas aplicaciones provocaron altos niveles de cobre total y cobre disponible en la capa arable del suelo. La acumulación de este metal se dio entre los años de 1930 a 1950, cuando en el cultivo de banano se realizaban alrededor de 20 aplicaciones/año a 30 aplicaciones/año a razón de 5 kg cobre/ha/aplicación, aportando de 100 kg/ha/año a 150 kg/ha/año de cobre, causando alteraciones en suelos que tenían un alto potencial agrícola (Cordero y Ramírez, 1979).

En suelos de viñedos de Cataluña, España, la Agencia de Residuos de Cataluña ha analizado muestras de suelo provenientes de prados, lugares con pastos y tierras forestales con un contenido medio de cobre de 22 mg.kg<sup>-1</sup>, con un mínimo de 1 mg.kg<sup>-1</sup> y un máximo de 330 mg.kg<sup>-1</sup>. En Francia, muestras analizadas presentan una concentración media de 20 mg.kg<sup>-1</sup> de cobre con un rango muy variable en distintos suelos. Estos valores corresponden a niveles de cobre extraído con agua regia (Giralt Vidal, Lluís; Perna Armengol, Elisabet; Masqué Tell, Carmen; Carbonell Galimany, Jordi; Valiente Masdeu, Josep; Calaf Vidales, Ester; Fernández de Larrinoa Arriola, Lorea; Serra Antolí, Lluís; y Elorduy Vidal, 2020).

### 2.1.10. Opciones para el manejo de suelos con altas concentraciones de cobre

Algunas medidas que pueden tomarse para el manejo de este problema son las siguientes:

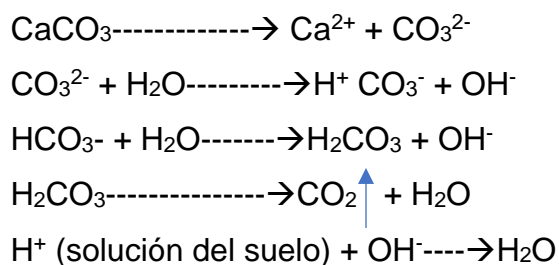
#### A. Enmiendas que eleven el pH

Esta práctica consiste en aplicar enmiendas calcáreas para elevar el pH a 6 o 6.50 y provocar la insolubilización del cobre según Cordero y Ramírez (1979). La cal dolomítica suele dar buenos resultados, pero cuando el suelo presenta una concentración muy alta de cobre, aun dosis masivas de esta enmienda no consiguen disminuir el efecto de la toxicidad de cobre en las plantas.

En el caso de suelos en los que se requiera una cantidad muy grande de cal para modificar el pH es recomendable utilizar  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  para conseguir una elevación del pH a 6.50 o 7 para precipitar el cobre soluble en forma de carbonatos de cobre, considerando el aporte de sodio al suelo (Cordero y Ramírez, 1979).

El uso de enmiendas que eleven el pH del suelo se fundamenta en la reducción de la solubilidad del cobre, que, al elevarse el pH, esta disminuye por lo que aún al estar presente en el suelo, no será propenso a ser absorbido por las plantas (García et al., 2002).

El carbonato de calcio es una enmienda apropiada para el aumento del pH del suelo. El ion carbonato proveniente de la disociación del carbonato de calcio reacciona con el agua del suelo (hidrólisis) separándola en un ion  $\text{H}^+$  y un ion  $\text{OH}^-$  y formando bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) y agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), este bicarbonato hidroliza al agua y forma ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) e hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ), este ácido carbónico se disocia como dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el cual se volatiliza a la atmósfera y deja libre una molécula de agua. El ion hidroxilo que quedó libre de la hidrólisis del bicarbonato y el agua del suelo, reacciona con el hidrógeno ( $\text{H}^+$ ) del suelo y forma agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) neutralizando de esta forma la acidez del suelo (Espinoza & Molina, 1999).



Se observa la disociación de la molécula de carbonato de calcio y los productos formados para lograr la neutralización de la acidez del suelo, para que la reacción anteriormente descrita se lleve a cabo, es imprescindible que exista humedad en el suelo.

## B. Abonos orgánicos

El suministro masivo de materia orgánica contribuye a disminuir la cantidad de cobre disponible. El cobre presenta una gran afinidad para enlazarse y formar complejos muy estables con la materia orgánica del suelo, indisponibilizándolo para las plantas (Chamorro M et al., 1972; Cordero y Ramírez, 1979; Fresno García, 2017).

Para reducir la biodisponibilidad del cobre en el suelo, es recomendable el uso de abonos orgánicos como compost y restos urbanos orgánicos, con la salvedad de asegurarse que estos materiales no aporten metales pesados al suelo, compostándolos, para evitar problemas sanitarios en los cultivos (García et al., 2002).

## C. Abonos fosfatados

El fósforo puede generar antagonismo para la absorción de cobre y según señala Cordero y Ramírez (1979) autores como Reuter, Smith y Scudder encontraron disminución de síntomas de toxicidad de cobre en cítricos al aumentar el contenido de fósforo en el suelo. Bingham, Martin y Chastian encontraron disminución de la disponibilidad de cobre (Cu) y ante niveles ascendentes de fósforo en el suelo. Esta indisponibilidad de cobre fue atribuida

a la formación de cobre insoluble en el exterior de las raíces.

Mannix y Rodríguez citados por Cordero y Ramírez (1979), lograron producir en suelos de Costa Rica con altos niveles de cobre, un incremento en el peso de las plántulas de arroz a través incrementos del fósforo en el suelo. Los autores de este estudio señalan que el fósforo ayuda a precipitar parte del cobre, ya que estos suelos poseían altos niveles de fósforo disponible. En dicho estudio el fósforo no creó antagonismo con el hierro, pero sí lo hizo con el cobre del suelo (Cordero y Ramírez, 1979). El exceso de fósforo, interacciona de forma negativa con el cobre, zinc y el hierro del suelo, ya que tiene mucha facilidad de formar moléculas insolubles con estos metales (Del Rey, 2019).

## **2.2. Marco referencial**

El suelo utilizado en la presente investigación proviene de la finca Sololá, perteneciente al ingenio La Unión, la cual está ubicada en el municipio de Tiquisate, departamento de Escuintla, Guatemala, Centroamérica.

Esta finca fue utilizada para el cultivo de banano por parte de la United Fruit Company en los años de 1899 a 1970, luego tras el cese de operaciones de la bananera en el país, se utilizó para la producción ganadera y el cultivo de pastos, finalmente, hace aproximadamente 10 años, la finca fue adquirida por el ingenio La Unión para el cultivo de caña de azúcar el cual continúa hasta la actualidad.

### **2.2.1. Ubicación geográfica donde se realizó el ensayo**

El ensayo se realizó bajo condiciones controladas en un invernadero con una dimensión de 50 m<sup>2</sup> en el Centro Experimental Docente de Agronomía (CEDA), este se encuentra dentro de la ciudad universitaria, zona 12 de la Ciudad Capital de Guatemala, Guatemala.

### **2.2.2. Clima del CEDA**

El CEDA cuenta con una precipitación media anual de 1,216.20 mm, una temperatura media anual de 18.30 °C, una humedad relativa media del 79 % y una insolación de 6.65 h/día radiación: 0.33 cal/cm<sup>2</sup>/min (Camel Franco, 2011).

### **2.2.3. Enmiendas evaluadas en suelos con alto contenido de cobre**

#### **A. Enmiendas orgánicas**

##### **a. Cachaza**

La cachaza es un residuo producido durante el procesamiento de la caña para obtener azúcar crudo, particularmente, en la clarificación de los jugos donde se le agrega fosfato de calcio para sedimentar las impurezas (Mercado Azúcar, 2020).

Según Cengicaña (2017), la cachaza es un subproducto en forma de sedimento que resulta de la clarificación del jugo de la caña en la obtención de azúcar. Aproximadamente se obtienen 30 kg de cachaza/ T de caña molida. Se estima que en una zafra se producen más de 750,000 T de cachaza (Cengicaña, 2017). Se estima que la producción promedio de cachaza se sitúa entre el 4 % al 4.50 % por tonelada de caña molida (Central Azucarera Tempisque S.A., 2012).

En el cuadro 2 se puede observar la composición química de la cachaza.

Cuadro 2. Composición de la cachaza.

<b>Elemento</b>	<b>Concentración</b>
Nitrógeno	0.88 %
Fósforo	0.85 %
Potasio	0.61 %
Azufre	0.22 %
Zinc	113 mg.kg <sup>-1</sup>
Boro	24 mg.kg <sup>-1</sup>
Relación C/N	32.60
% C.O.	28.73 %
% Humedad	70 %

Fuente: Central Azucarera Tempisque S.A., 2012.

En el cuadro 3 se puede observar la composición química promedio, en base seca, de la cachaza para distintos ingenios de Guatemala.

Cuadro 3. Composición promedio de cachaza (base seca) de ingenios de Guatemala.

<b>Análisis</b>	<b>Valor</b>
Agua (%)	75
pH	5.80
N (%)	1.20
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	2.20
K <sub>2</sub> O (%)	0.60
CaO (%)	1
MgO (%)	0.60
C (%)	40
Relación C/N	33

Fuente: Cengicaña, 2017.

En el cuadro 4 se aprecia el contenido de nutrientes totales y disponibles por tonelada de cachaza fresca con el 75 % de humedad.

Cuadro 4. Nutrientes totales y disponibles por tonelada de cachaza fresca.

Nutriente	Nutrientes totales (kg/T cachaza fresca)	Nutrientes disponibles (kg/T cachaza fresca)
N	3.00	0.60-1.50
P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	5.50	3.30
K (K <sub>2</sub> O)	1.50	0.90

Fuente: Cengicaña, 2017.

## **b. Compost**

El compost de restos de caña de azúcar puede tener una composición variable en función de las materias primas y método de compostaje. Este compost puede contener cachaza, bagazo y ceniza procedente del proceso de obtención de azúcar, residuos que se aprovechan para la elaboración de abonos orgánicos (López Bravo et al., 2017).

## **B. Enmiendas inorgánicas**

### **a. Ceniza de bagazo de caña de azúcar**

Este subproducto de la industria cañera proviene de la quema del bagazo de caña en las calderas donde se obtiene el azúcar (Chávez Bazán, 2017). El bagazo de la caña es el residuo del tallo de la caña de azúcar después de haber sido exprimido en el proceso de obtención de azúcar (Basanta et al., 2009).

Este material se quema debido su alta de relación carbono/nitrógeno, lo que ocasionaría

un proceso de descomposición lento bajo condiciones normales. La composición química de las cenizas provenientes de bagazo de caña suele ser variable, dependiendo de la edad del cañaveral y el tipo de suelo donde este fue cultivado.

En el cuadro 5 se observa la composición química de la ceniza de bagazo de caña de azúcar.

Cuadro 5. Composición química de la ceniza de bagazo de caña.

Compuesto	Contenido (%)
ZrO <sub>2</sub>	0.006
Cl	0.017
SrO	0.031
MnO	0.095
TiO <sub>2</sub>	0.395
SO <sub>3</sub>	0.399
Na <sub>2</sub> O	0.509
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.15
MgO	1.59
CaO	3.556
K <sub>2</sub> O	4.145
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.921
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.726
SiO <sub>2</sub>	62.33

Fuente: Tórres Rivas et al., 2014.

## b. Cal dolomita

La cal dolomita está constituida por carbonato de calcio y magnesio (CaCO<sub>3</sub>\*MgCO<sub>3</sub>). Este material en estado puro contiene 21.60 % de calcio y 13.10 % de magnesio (Espinoza & Molina, 1999). Este producto es obtenido a partir de la pulverización la roca dolomítica en su estado natural. Tiene propiedades que reducen la acidez del suelo y favorece suelos pobres en magnesio (Calera San Miguel, 2016).

La cal dolomita también es conocida como cal dolomítica, es un polvo fino de color blanco y tiene un poder real de neutralización total (PRNT) del 98 % (Disagro, n.d.).

En el cuadro 6 se observa la composición química teórica de la cal dolomita.

Cuadro 6. Composición química de la cal dolomita.

Compuesto	Concentración (%)
Carbonato de Calcio ( $\text{CaCO}_3$ )	45-46
Carbonato de Magnesio ( $\text{MgCO}_3$ )	35-37
Dióxido de Silicio ( $\text{SiO}_2$ )	3
Trióxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	1
Trióxido de Aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	2

Fuente: Disagro, n.d.

#### 2.2.4. Antecedentes de investigación

Según la investigación de Fresno García, (2017), España, en un suelo contaminado con arsénico (As) y cobre (Cu) aplicar materiales orgánicos como enmienda puede inmovilizar el cobre, pero aumentar la movilidad del arsénico, por lo que evaluó una combinación de sulfato de hierro para promover la inmovilización del arsénico debido a la formación de óxidos de hierro, que controlan su movilidad y materia orgánica para fijar el cobre.

El suelo fue tratado con sulfato de hierro y materiales orgánicos, como residuos de la industria papelera, compost de alperrujo (concentrado obtenido del proceso de obtención de aceite de oliva) o restos de poda urbanos y biochar de restos de poda de encino y olivo. Se aplicó carbonato de calcio y sulfato de hierro en proporción 1:1 (% p/p), sulfato de hierro en combinación con residuos de la industria papelera en proporción 1:1 (% p/p), sulfato de hierro con compost de alperrujo en proporción 1:3 (% p/p) y sulfato de hierro con biochar de encino en proporción 1:3 (% p/p) agregando 600 g de cada mezcla en un contenedor con capacidad de  $240 \text{ dm}^3$  ( $0.243 \text{ m}^3$ ).

La extracción de cobre redujo debido al aumento del pH del suelo al utilizar carbonato de calcio y sulfato de hierro en proporción 1:1 (% p/p), con lo que se consiguió el máximo aumento del pH del suelo (de 5.50 a 6.73) a los 45 días de establecido el ensayo.

El menor contenido de cobre extraído (datos no publicados) con  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  a los 45 días se obtuvo con la aplicación de sulfato de hierro y residuos de la industria papelera en proporción 1:1 (% p/p). No existió diferencias significativas en el cobre extraíble con  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  entre la aplicación de sulfato de hierro + carbonato de calcio y sulfato de hierro + compost de alperujo. La aplicación de sulfato de hierro y biochar aumentó la concentración de cobre extraíble en un 200 % respecto al testigo a los 45 días de establecido el ensayo.

No se encontraron diferencias significativas entre el cobre extraído con  $\text{CaCl}_2$  0.10 M de los tratamientos y el testigo, pero la adición de sulfato de hierro + biochar aumentó la su concentración de  $42.40 \text{ mg.kg}^{-1}$  a  $52 \text{ mg.kg}^{-1}$  (Fresno García, 2017).

Según la investigación de Xiong (2015), en Sevilla España, se utilizaron como enmiendas para tratar suelos contaminados con metales pesados compost de biosólidos (lodos de depuradora de aguas residuales y restos de poda de parques y jardines urbanos), mezcla de compost de alperujo compostado con restos de leguminosas y estiércoles procedentes de agricultura ecológica y un testigo sin adición de enmiendas.

Los tratamientos evaluados fueron testigo,  $30 \text{ T.ha}^{-1}$  de compost de biosólidos y  $30 \text{ T.ha}^{-1}$  de compost de alperujo, aplicados en un suelo neutro no contaminado, un suelo neutro contaminado y un suelo ácido contaminado con metales pesados. Se realizaron 3 muestreos, uno el mismo año de montaje del ensayo a los 6 meses (noviembre 2011) y los dos siguientes al año (mayo 2012) y dos años (mayo 2013) después del montaje del ensayo, se realizó una aplicación extra de  $25 \text{ T.ha}^{-1}$  de cada enmienda un año después de establecido el ensayo (noviembre 2012). El experimento se llevó a cabo en contenedores con suelo bajo condiciones de semi-campo.

En el suelo ácido se obtuvo el mayor aumento del pH con los tres tratamientos, aunque las diferencias estadísticamente significativas se mostraron en los muestreos realizados uno y

dos años después de la primera aplicación de enmienda debido a la segunda aplicación de 25 T.ha<sup>-1</sup> de cada enmienda al año siguiente de establecido el ensayo, el pH varió en el suelo ácido contaminado de 3.86 a 4.50 con el compost de alperujo en el año de establecimiento del ensayo, a 5.40 un año después y a 6.50 dos años después. En el suelo ácido contaminado y con aplicación de compost de biosólidos de 3.86 a 4.50, 4.70 y 6.60 al primer, segundo y tercer después de establecido el ensayo, respectivamente.

En los 3 suelos las concentraciones más altas de cobre se encontraron en el primer muestreo, disminuyendo con el tiempo en los siguientes dos muestreos realizados en todos los tratamientos. Para el contenido de cobre extraído con CaCl<sub>2</sub> 0.01 M las diferencias causadas por la aplicación de las enmiendas fueron significativas en el suelo ácido contaminado, donde la aplicación de compost de alperujo y compost de biosólidos redujo la extracción de cobre en el periodo de estudio (Datos no publicados) (Xiong, 2015).

Según la investigación llevada a cabo por Martínez Madrid y Marrugo-Negrete (2021), en contenedores con capacidad de 2 L de suelo, quienes evaluaron biochar (0.50 %, 2 % y 4 %), vermicompost (5 %, 10 % y 15 %) y carbonato de calcio (0.50 %, 1 % y 2 %) como enmienda y un testigo sin enmienda, encontraron aumento del pH respecto al testigo, de 5.65, a 6.31, 6.38 y 6.73 con aplicación de biochar al 0.50 %, 2 % y 4 % respectivamente; con aplicación de vermicompost se tuvo un aumento del pH a 6.42, 6.57 y 6.73 con niveles de 5 %, 10 % y 15 % de este material respectivamente; con la aplicación de carbonato de calcio el pH llegó a 6.99, 6.64 y 7.11 con 0.50 %, 1 % y 2 % de esta enmienda.

El testigo sin aplicación de enmienda presentaba un contenido de 8.10 mg.kg<sup>-1</sup> de cobre extraído con CaCl<sub>2</sub>, utilizando las enmiendas evaluadas se logró reducir el contenido de cobre a 2.02 mg.kg<sup>-1</sup>, 2.01 mg.kg<sup>-1</sup> y 1.21 mg.kg<sup>-1</sup> con la aplicación de biochar en dosis de 0.50 %, 2 % y 4 %; con la aplicación de vermicompost se redujo el contenido de cobre a 1.03 mg.kg<sup>-1</sup>, 1.11 mg.kg<sup>-1</sup> y 1.31 mg.kg<sup>-1</sup> con niveles de 5 %, 10 % y 15 % de este material respectivamente y, con la aplicación de carbonato de calcio, el cobre se redujo a 0.72 mg.kg<sup>-1</sup>, 0.82 mg.kg<sup>-1</sup> y 0.31 mg.kg<sup>-1</sup> utilizando este material a razón del 0.50 %, 1 % y 2 %, respectivamente (Martínez Madrid & Marrugo-Negrete, 2021).

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. Objetivo general**

Evaluar cachaza y compost como enmiendas orgánicas y ceniza de bagazo de caña de azúcar y cal dolomita como enmiendas inorgánicas para amortiguar el efecto de la biodisponibilidad de cobre en el suelo de la finca Sololá del Ingenio La Unión, bajo condiciones de invernadero en el Centro Experimental Docente de Agronomía (CEDA), USAC, Guatemala, Guatemala. C.A.

#### **3.2. Objetivos específicos**

1. Determinar las fuentes orgánicas o inorgánicas evaluadas que tengan el mejor efecto en la reducción del contenido de cobre extraíble con la solución extractora Mehlich I en el suelo procedente de la finca Sololá del ingenio La Unión.
2. Cuantificar la producción de biomasa aérea y radicular en base seca después de la aplicación de fuentes orgánicas e inorgánicas como enmienda para amortiguar el efecto de la disponibilidad del cobre en el suelo de la finca Sololá del ingenio La Unión.

### **4. HIPÓTESIS**

- La aplicación de al menos uno de los materiales orgánicos o inorgánicos evaluados como enmienda reducirá la disponibilidad de cobre en el suelo, por lo que habrá menor contenido de cobre extraíble expresado en miligramos por kilogramo de suelo.
- La aplicación de al menos uno de los materiales orgánicos o inorgánicos evaluados como enmienda reducirá la disponibilidad de cobre en el suelo, lo que provocará un aumento significativo en la producción de biomasa aérea y radicular en base seca.

## 5. METODOLOGÍA

La metodología empleada para esta investigación fue la siguiente:

### 5.1. Fase de laboratorio

Esta fase consistió en la caracterización físico-química del suelo y caracterización química de los materiales orgánicos e inorgánicos utilizados en la investigación.

En el cuadro 7 se describen los parámetros determinados y las metodologías utilizadas en el laboratorio para la caracterización físico-química del suelo y la caracterización química de las enmiendas.

Cuadro 7. Determinaciones realizadas al suelo y enmiendas evaluadas.

Material	Determinación	Método
Suelo	Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	Extracción con cloruro de sodio pH 2, destilación microkjeldahl y titulación manual.
	Bases Intercambiables	Extracción con acetato de amonio pH 7 y cuantificación por espectrofotometría de absorción atómica
	Macro y microelementos	Extracción con solución extractora Mehlich I (Carolina del Norte) y cuantificación por espectrofotometría de absorción atómica
	pH	Método potenciométrico relación suelo:agua 1:2.5
	Conductividad eléctrica	Conductímetro
	Materia Orgánica	Walkley-Black modificado
	Textura	Hidrómetro de Bouyucos
	Densidad Aparente	Método de la probeta

## Continuación cuadro 7.

Materiales orgánicos (cachaza y compost)	Contenido mineral Carbono orgánico pH Conductividad eléctrica Relación C/N	Espectrofotometría de absorción atómica Método de Walkley-Black modificado Método potenciométrico Conductivímetro Carbono orgánico por método de Walkley-Black modificado y nitrógeno total por método de Kjendahl
Materiales inorgánicos (ceniza de bagazo de caña)	Contenido mineral (aplica en el caso de la ceniza de bagazo de caña) pH Conductividad eléctrica Relación C/N	Espectrofotometría de absorción atómica  Método potenciométrico Conductivímetro Walkley-Black modificado y Kjendahl
Cal dolomita	Calcio Magnesio	Espectrofotometría de absorción atómica Espectrofotometría de absorción atómica

Fuente: elaboración propia, 2021.

## 5.2. Fase de invernadero

### 5.2.1. Pre-ensayo

Se realizó un pre-ensayo a nivel de laboratorio evaluando niveles crecientes de cada enmienda y 3 mezclas para identificar aquellos tratamientos donde se obtuvieran los mayores valores de pH y menores valores de cobre extraído. Este experimento se montó en macetas con 200 g de suelo secado al aire, tamizado a 2 mm y homogenizado, las cuales se incubaron aplicando únicamente 50 ml de agua diariamente durante 40 días.

Se midió el pH a todas las unidades experimentales y se cuantificó el contenido de cobre extraíble en suelo a los niveles máximos de cada enmienda evaluada.

En el cuadro 8 se describen los tratamientos evaluados en la subfase de pre-ensayo.

Cuadro 8. Tratamientos evaluados en el pre-ensayo.

Material	Nivel (T.ha <sup>-1</sup> )	Dosis/maceta (g/maceta)
Cachaza	10	0.8474
	20	1.695
	30	2.542
	40	3.39
Ceniza de bagazo de caña de azúcar	2	0.1695
	4	0.339
	6	0.5084
	8	0.678
	10	0.8474
Compost	2	0.1695
	4	0.339
	6	0.5084
	8	0.678
	10	0.8474
Cal dolomita	2	0.1695
	4	0.339
	6	0.5084
	8	0.678
	10	0.8474
Mezcla 1	3 T.ha <sup>-1</sup> cal dolomita+3 T.ha <sup>-1</sup> ceniza + 3 T.ha <sup>-1</sup> compost + 10 T.ha <sup>-1</sup> cachaza	0.2542 g/maceta de cal dolomita, ceniza y compost y 0.8474 g/maceta de cachaza
Mezcla 2	6 T.ha <sup>-1</sup> cal dolomita + 6 T.ha <sup>-1</sup> ceniza + 6 T.ha <sup>-1</sup> compost + 20 T.ha <sup>-1</sup> cachaza	0.5084 g/maceta de cal dolomita, ceniza y compost y 1.695 g/macea de cachaza
Mezcla 3	10 T.ha <sup>-1</sup> cal dolomita + 10 T.ha <sup>-1</sup> ceniza + 10 T.ha <sup>-1</sup> compost + 40 T.ha <sup>-1</sup> cachaza	0.8474 g/maceta de cal, ceniza y compost y 3.39 g/maceta de cachaza

Fuente: elaboración propia, 2021.

## **5.2.2. Ensayo**

### **A. Muestreo de suelos**

El muestro se realizó recorriendo el terreno en zig-zag para tener mayor representatividad del área estudiada. Entre cada punto de muestreo hubo una distancia de 5 m. La profundidad de muestreo fue de 0.20 m. La cantidad de suelo recolectada fue de aproximadamente de 100 kg.

### **B. Muestreo de enmiendas**

Se colectó de manera aleatoria una muestra de 1 kg de cachaza, ceniza de bagazo de caña, compost y se tomó una cantidad de cal dolomita a partir de su empaque para analizar en laboratorio.

### **C. Preparación del suelo**

En la subfase de ensayo, se preparó el suelo secándolo al aire, homogenizándolo y tamizándolo a 2 mm con ayuda de un tamiz de este diámetro.

### **D. Llenado de macetas**

Se procedió a pesar 3 kg de suelo por cada maceta y se introdujo en las mismas.

### **E. Aplicación de los tratamientos**

El suelo de cada maceta fue introducido en una bolsa plástica limpia y se mezcló con la enmienda correspondiente en los niveles determinados, se agitó la bolsa para homogenizar el suelo con la enmienda, se aplicó 400 ml de agua, se agitó nuevamente y luego se vertió el contenido de dicha bolsa en la maceta.

### **F. Planta indicadora**

Se utilizó sorgo forrajero (*Sorghum bicolor* L.) como planta indicadora dada su sensibilidad a cambios químicos en el suelo, a su rápido desarrollo y su amplio uso en ensayos biológicos.

### **G. Diseño experimental**

Se utilizó un Diseño Completamente al Azar (DCA) debido a que el ensayo se montó bajo condiciones controladas, reduciéndose las gradientes de variabilidad que pudieran haber alterado el efecto de los tratamientos.

### **H. Unidad experimental**

La unidad experimental consistió en una maceta con 3 kg de suelo y 10 plantas de sorgo por maceta. Se evaluaron 6 tratamientos con 4 repeticiones cada uno, para un total de 24 unidades experimentales.

En la figura 1 se observa la unidad experimental utilizada.



Fuente: elaboración propia, 2021.

Figura 1. Unidad experimental.

## I. Tratamientos evaluados

En el cuadro 9 se observan los tratamientos evaluados en el ensayo de la investigación.

Cuadro 9. Tratamientos evaluados.

Tratamiento	Enmienda	Dosis (T.ha <sup>-1</sup> )	Dosis (g/maceta de 3 kg de suelo)
T1	Testigo absoluto	0	0
T2	Cachaza	40	42.38
T3	Ceniza de bagazo de caña de azúcar	10	10.60
T4	Compost	10	10.60
T5	Cal dolomita	10	10.60
T6	Mezcla (6-6-6-20)	6 T.ha <sup>-1</sup> ceniza+ 6 T.ha <sup>-1</sup> compost+ 6 T.ha <sup>-1</sup> cal + 20 T.ha <sup>-1</sup> cachaza	6 T.ha <sup>-1</sup> =6.356 20 T.ha <sup>-1</sup> = 21.20

Fuente: elaboración propia, 2021.

## **J. Variables de respuesta**

Se midió el contenido de cobre extraíble en suelo, pH del suelo, biomasa aérea y radicular en base seca.

### **a. Cobre extraíble en suelo**

La extracción de cobre en el suelo se realizó 60 días después de establecido el ensayo con la solución extractora Mehlich I y la cuantificación por espectrofotometría de absorción atómica.

### **b. pH del suelo**

Se midió el pH del suelo 60 días después de establecido el ensayo a través del método potenciométrico.

### **c. Biomasa aérea en base seca**

El material vegetal cosechado 60 días después de establecido el ensayo se colocó en el horno de convección forzada a una temperatura de 65 °C hasta obtener peso constante, el cual se cuantificó con ayuda de una balanza analítica.

### **d. Biomasa radicular en base seca**

El material vegetal colectado 60 días después de establecido el ensayo se colocó en el horno de convección forzada a una temperatura de 65 °C hasta obtener peso constante, el cual se cuantificó con ayuda de una balanza analítica.

## **K. Manejo del ensayo**

### **a. Riego**

Se aplicó un riego diario de 100 ml para mantener el suelo a capacidad de campo.

### **b. Desmalezado**

El ensayo se desmalezó de forma manual semanalmente.

### **c. Fertilización**

Se aplicó 100 kg N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O.ha<sup>-1</sup> en dos dosis del 50 % cada una, a los 7 días después y 15 días después de la germinación utilizando el fertilizante triple veinte (20-20-20).

### **d. Cosecha**

La cosecha del ensayo se realizó a los 60 días después de la siembra. Para esto, se agitó las macetas sobre una cartulina para separar el suelo del sistema radicular y este se separó de la parte aérea de la planta con ayuda de una tijera, el material vegetal se guardó en bolsas de papel craft identificadas por tratamiento y repetición.

### **e. Colecta del suelo**

El suelo de cada maceta se introdujo en una bolsa plástica, la cual se agitó para homogenizar y se tomó una muestra de cada unidad experimental. Dicha muestra se secó al aire y tamizó para llevar al laboratorio a analizar.

#### **f. Análisis de la información**

Los datos de cada variable de respuesta se ordenaron en Excel por tratamiento y repetición para poder ser analizados el software estadístico Infostat 2018 versión libre.

El análisis estadístico realizado consistió en un análisis de varianza (ANDEVA) al 5 % de significancia para un diseño experimental completamente al azar y una prueba de comparación múltiple de medias de Tukey, también al 5 % de significancia.

#### **g. Modelo estadístico-matemático utilizado**

El modelo estadístico-matemático utilizado fue el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + T_i + \epsilon_{ij}$$

Donde:

$Y_{ij}$  = Valor observado en la ij-ésima unidad experimental.

$\mu$  = Media general de la variable de respuesta.

$T_i$  = Efecto del i-ésimo tratamiento.

$\epsilon_{ij}$  = Error asociado a la ij-ésima unidad experimental.

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1. Caracterización físico-química del suelo utilizado en la investigación

En el cuadro 10 se observa el análisis físico-químico realizado al suelo utilizado en la presente investigación.

Cuadro 10. Análisis químico y físico de suelo.

Id.	pH*	pH**	C.E. μS/cm	-----mg.kg <sup>-1</sup> -----					----- Meq/100 g-----				-----%-----		
				P	Cu	Zn	Fe	Mn	CIC	Ca	Mg	Na	K	SB	M.O
R.	6-6.50	-	1,500-2,000	12-16	2-4	4-6	10-15	10-15	20-25	4-8	1.50-2	-	0.27- 0.38	75-90	4-5
M.	5.40	10.50	252.00	2.13	60	5.50	6	7.50	22.08	6.24	0.95	0.19	0.18	34.21	6.53

Identificación	-----%-----			Clase textural
	Arcilla	Limo	Arena	
M-1	9.66	20.24	70.10	Franco arenoso

\*pH medido en agua

\*\*pH medido en NaF

El pH del suelo es ligeramente ácido. El elemento que se encuentra en mayor concentración es el cobre ( $60 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) y el que se encuentra en menor concentración es el fósforo ( $2.13 \text{ mg.kg}^{-1}$ ). La CIC y el contenido de materia orgánica son altos ( $22.08 \text{ meq/100 g}$  y  $6.53 \%$  respectivamente). El suelo presenta un valor de pH en NaF (10.50) superior a 8.00 (pH del reactivo), lo que indica presencia de arcilla amorfa, por lo que este suelo presenta alta fijación de fósforo. El suelo tiene una clase textural franco arenosa.

## 6.2. Caracterización química de los materiales evaluados como enmienda

En el cuadro 11 se observa el análisis químico realizado a los materiales utilizados como enmienda en la presente investigación.

Cuadro 11. Análisis químico de los materiales evaluados como enmiendas.

Id.	pH	C.E. mS/cm	-----%-----				-----mg.kg <sup>-1</sup> -----						-----%-----		C:N
			P	K	Ca	Mg	Cu	Zn	Fe	Mn	Na	C.O	NT		
Ceniza	8.90	4.10	0.22	1.81	0.50	0.26	15	40	3,000	125	1,500	---	---	---	
Compost	6.80	12.10	1.07	1.50	2.69	0.26	10	110	6,950	440	500	6.62	0.60	11:1	
Cal	8.70	39.65	---	---	38	35.75	---	---	---	---	---	---	---	---	
Cachaza	9.00	43.65	1.15	0.36	2.19	0.19	30	130	4,000	495	275	22.18	1.82	12:1	

En la caracterización química de las enmiendas evaluadas, se observan los valores totales de minerales de cada uno de estos materiales, pH, conductividad eléctrica y carbono orgánico, nitrógeno total y relación carbono;nitrógeno para los materiales orgánicos. El material con pH más alto (básico) es la cachaza con un valor de 9, seguido de la ceniza de bagazo de caña de azúcar con un pH de 8.90, la cal dolomita con un pH de 8.70 y el compost con un pH de 6.80.

La cachaza es el material más rico en fósforo (1.15 %) y el material que tiene una mayor conductividad eléctrica (43.65 mS/cm), lo que indica mayor contenido de sales solubles. La relación carbono:nitrógeno de los materiales orgánicos es muy similar. La cachaza es la que tiene un mayor contenido de carbono orgánico (22.18 %) respecto al compost, el cual tiene 6.62 %. La cachaza tiene 1.82 % de nitrógeno total y el compost tiene 0.60 %. La cal dolomita tiene los máximos valores de calcio y magnesio, 38 % y 35.75 % respectivamente.

### 6.3. Aporte nutricional teórico de las enmiendas

En el cuadro 12 se observan los aportes nutricionales totales de las enmiendas evaluadas expresados de  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  de cada elemento.

Cuadro 12. Aporte nutricional total de las enmiendas evaluadas.

Enmienda	P	K	Ca	Mg	Cu	Zn	Fe	Mn
----- $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ -----								
Cachaza (40 T. $\text{ha}^{-1}$ )	460	144	876	76	1.20	5.20	160	19.80
Mezcla	307.40	270.60	4,429.40	3,644.20	0.75	3.50	139.70	13.29
Compost (10 T. $\text{ha}^{-1}$ )	107	150	269	26	0.10	1.10	69.50	4.40
Ceniza (10 T. $\text{ha}^{-1}$ )	22	181	50	26	0.15	0.40	30	1.25
Cal dolomita (10 T. $\text{ha}^{-1}$ )	-	-	3,800	3,575	-	-	-	-

Se observa que la cachaza es el material que tiene un mayor aporte de nutrientes, principalmente fósforo ( $460 \text{ kg P}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) y calcio ( $876 \text{ kg Ca}\cdot\text{ha}^{-1}$ ). El compost es el segundo material más rico en nutrientes, probablemente porque contiene cachaza. La enmienda con menor aporte de nutrientes es la ceniza de bagazo de caña de azúcar. La enmienda que aporta más calcio y magnesio es la cal dolomita ( $3,800 \text{ kg Ca}\cdot\text{ha}^{-1}$  y  $3,575 \text{ kg Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ). La mezcla tiene un alto aporte de fósforo ( $307.40 \text{ kg P}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), potasio ( $270.60 \text{ kg K}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), calcio ( $4,429.40 \text{ kg Ca}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) y magnesio ( $3,644.20 \text{ kg Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ).

#### 6.4. Pre-ensayo

Se determinó el pH del suelo a todas las unidades experimentales del pre-ensayo (cuadro 20A), también se determinó el contenido de cobre extraíble con la solución Mehlich I a los valores máximos de cada enmienda evaluada, donde se esperaba mayores valores de pH y/o valores menores de cobre extraído.

En el cuadro 13 se observan los resultados obtenidos del pre-ensayo de la investigación, donde se presentan valores promedio de pH y contenido de cobre extraíble en suelo después la aplicación de las enmiendas.

Cuadro 13. Resultados promedio de pH y cobre extraíble del pre-ensayo.

Tratamiento	pH promedio	Cobre extraíble promedio (mg.kg <sup>-1</sup> )
Testigo	5.40	52.50
Cachaza 40 T.ha <sup>-1</sup>	5.80	42.50
Compost 10 T.ha <sup>-1</sup>	5.70	50.00
Cal 10 T.ha <sup>-1</sup>	6.10	35.00
Ceniza 10 T.ha <sup>-1</sup>	5.70	52.50
Mezcla 1	6.00	42.50
Mezcla 2	6.25	35.00
Mezcla 3	6.05	36.25

El pH promedio del testigo fue de 5.40, al aplicar la cachaza en dosis de 40 T.ha<sup>-1</sup> se observó el aumento del pH a 5.80 y a 5.70 con el compost. El pH obtenido con la aplicación de 10 T.ha<sup>-1</sup> de cal dolomita fue de 6.10, mientras que con la aplicación de ceniza fue de 5.70, el mismo pH obtenido que con la aplicación de 10 T.ha<sup>-1</sup> de compost, esto muestra que la aplicación de ceniza no aumenta el pH de la forma en la que lo hacen otras enmiendas como la cachaza y la cal dolomita y que la aplicación de compost no tiene efecto sobre la modificación del pH del suelo. En cuanto a las mezclas evaluadas, con la mezcla 1 el pH obtenido fue de 6.00, con la mezcla 2 se obtuvo un pH promedio de 6.25 y con la mezcla 3 el pH promedio obtenido de las 2 repeticiones analizadas fue de 6.05.

Respecto al cobre en el suelo, el testigo tuvo un contenido promedio de  $52.50 \text{ mg.kg}^{-1}$ , la cachaza redujo el contenido de cobre obtenido en la extracción con la solución Mehlich I a  $42.50 \text{ mg.kg}^{-1}$ , con  $10 \text{ T.ha}^{-1}$  de compost a  $50 \text{ mg.kg}^{-1}$ , con la aplicación de cal dolomita en dosis de  $10 \text{ T.ha}^{-1}$  redujo a  $35 \text{ mg.kg}^{-1}$ . La aplicación de  $10 \text{ T.ha}^{-1}$  de ceniza de bagazo de caña de azúcar no mostró reducir el contenido de cobre en el suelo, ya que en esta muestra se obtuvieron  $52.50 \text{ mg.kg}^{-1}$  de cobre. Con la aplicación de la mezcla 1 ese valor medio redujo a  $42.50 \text{ mg.kg}^{-1}$ , con la aplicación de la mezcla 2 a  $35 \text{ mg.kg}^{-1}$  y con la aplicación de la mezcla 3 redujo a  $36.25 \text{ mg.kg}^{-1}$ .

Debido a que la mezcla 2 fue la que presentó un menor contenido de cobre promedio al final del pre-ensayo y el mayor aumento del pH del suelo y es la mezcla que mejores resultados mostró con una menor inversión económica de materiales, se eligió para su evaluación en el ensayo definitivo de esta investigación.

## **6.5. Ensayo**

### **6.5.1. Cobre extraíble en suelo y pH**

En el cuadro 14 se observan los resultados obtenidos de cobre extraíble en suelo con solución Mehlich I y pH por tratamiento, repetición y sus respectivas medias. Los menores valores de cobre se obtuvieron con la aplicación de  $10 \text{ T.ha}^{-1}$  de cal dolomita con un valor promedio de  $36.25 \text{ mg.kg}^{-1}$  y la mezcla donde se obtuvo  $38.13 \text{ mg.kg}^{-1}$  de cobre, tratamientos con los valores promedio más altos de pH, 6.03 y 6.10 respectivamente.

Cuadro 14. Resultados de cobre extraíble en suelo y pH.

Tratamiento	Cobre extraíble					pH				
	-----mg.kg <sup>-1</sup> -----					-----				
	R1	R2	R3	R4	Media	R1	R2	R3	R4	Media
Cal dolomita	35.00	37.50	40.00	32.50	36.25	6.00	6.00	6.00	6.10	6.03
Mezcla	42.00	40.00	35.00	35.00	38.13	6.00	6.10	6.20	6.20	6.10
Cachaza	47.50	47.50	42.50	42.50	45.00	5.70	5.80	5.80	5.90	5.80
Compost	50.00	45.00	50.00	47.50	48.13	5.40	5.50	5.40	5.40	5.43
Ceniza	57.50	55.00	50.00	50.00	53.13	5.30	5.30	5.40	5.40	5.35
Testigo	57.50	52.50	52.50	55.00	54.38	5.40	5.40	5.40	5.40	5.40

### A. Análisis de varianza para las variables cobre extraíble en suelo y pH

En el cuadro 15 se observa el análisis de varianza realizado al 5 % de significancia para las variables cobre extraíble en suelo y pH.

Cuadro 15. Análisis de varianza para la variable cobre extraíble en suelo y pH.

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV		Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> aj	CV	
Cobre suelo	24	0.87	0.83	6.80		pH suelo	24	0.97	0.96	1.06	
F.V.	SC	gl	CM	F	P-Valor	F.V.	SC	gl	CM	F	P-valor
Modelo	1133.33	5	226.67	23.31	<0.0001	Modelo	2.25	5	0.45	124.52	<0.0001
Tratamiento	1133.33	5	226.67	23.31	<0.0001	Tratamiento	2.25	5	0.45	124.52	<0.0001
Error	175.00	18	9.72			Error	0.07	18	3.60		
Total	1308.33	23				Total	2.31	23			

Según el análisis de varianza realizado al 5 % de significancia, se encontró diferencia significativa en al menos uno de los tratamientos sobre el cobre extraíble en suelo. El pH del suelo mostró el mismo comportamiento estadístico que el cobre extraíble. Debido a la existencia de un efecto diferenciado entre los tratamientos evaluados, se procedió a realizar una prueba de comparación múltiple de medias de Tukey al 5 % de significancia.

## B. Prueba de comparación múltiple de medias para cobre extraíble y pH

En el cuadro 16 se observa la prueba de comparación múltiple de medias de Tukey realizada al 5 % de significancia para las variables cobre extraíble en el suelo y pH.

Cuadro 16. Prueba de medias de Tukey para cobre extraíble en suelo y pH.

Variable: Cobre extraíble en suelo					Variable: pH del suelo				
Alfa= 0.05 DMS=7.00691					Alfa= 0.05 DMS= 0.13504				
Error: 9.7222                      gl: 18					Error: 0.0036                      gl: 18				
Tratamiento	Medias	n	E.E		Tratamiento	Medias	n	E.E	
T5	36.25	4	1.56	A	T6	6.10	4	0.03	A
T6	38.13	4	1.56	AB	T5	6.03	4	0.03	A
T2	45.00	4	1.56	BC	T2	5.80	4	0.03	B
T4	48.13	4	1.56	CD	T4	5.43	4	0.03	C
T3	53.13	4	1.56	D	T1	5.40	4	0.03	C
T1	54.38	4	1.56	D	T3	5.35	4	0.03	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p>0.05$ )

Según la prueba de medias de Tukey, el mejor tratamiento para la disminuir la extracción de cobre en el suelo fue la aplicación de cal dolomita en dosis de 10 T.ha<sup>-1</sup> (T5). El cobre en el suelo disminuyó de 54.38 mg.kg<sup>-1</sup> a 36.25 mg.kg<sup>-1</sup>, un 33.34 %. Esto se debió al aumento del pH del suelo a causa de la reacción de neutralización que se da entre el ion carbonato proviente del carbonato de calcio y magnesio de la enmienda, y el agua del suelo, lo que provocó la insolubilización del cobre (Cordero y Ramírez, 1979; Espinoza & Molina, 1999; Fresno García, 2017). La aplicación de la mezcla produjo la segunda media más baja de cobre en el suelo, 38.13 mg.kg<sup>-1</sup>, probablemente por la interacción del aumento del pH que provocó la cal dolomita y la cachaza y, en menor medida, la complejación entre la materia orgánica de la cachaza y el compost con el cobre del suelo (Fresno García, 2017).

En la figura 2 se observa la tendencia del cobre extraíble en suelo hacia la disminución a medida que aumenta el pH del suelo. A medida que el pH del suelo se incrementa, la solubilidad del cobre disminuye.

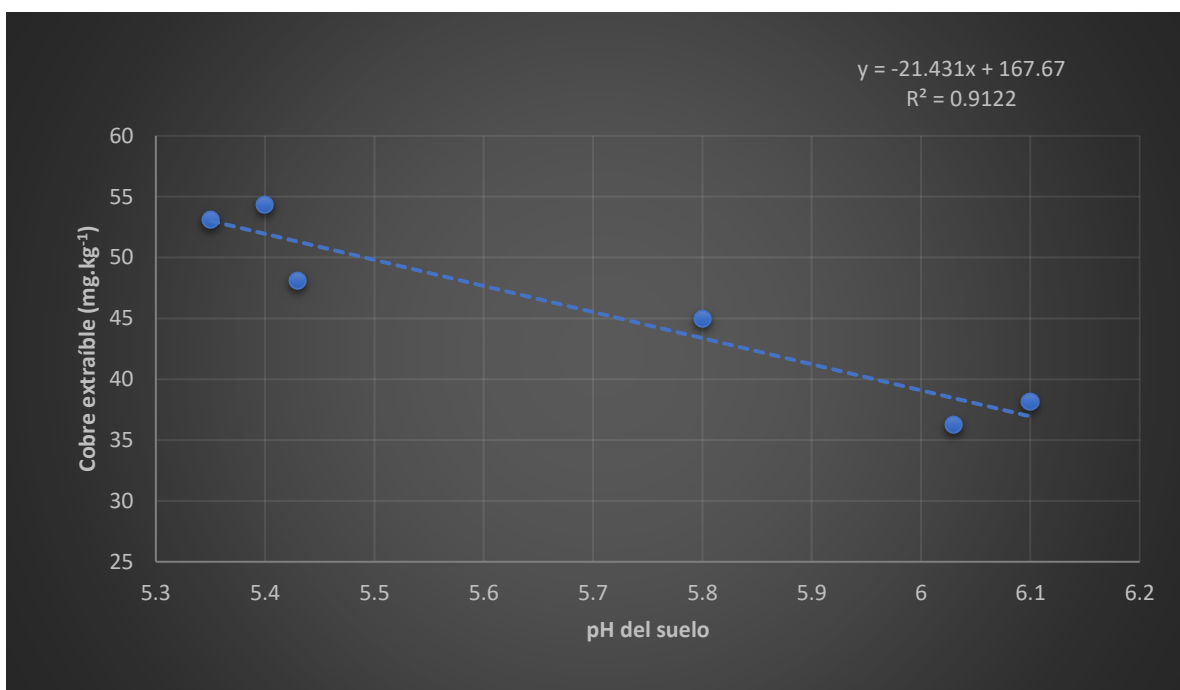


Figura 2. Comportamiento del cobre extraíble en función del pH del suelo.

El contenido de cobre después de la aplicación de cachaza en dosis de 40 T.ha<sup>-1</sup> redujo un 17.25 % respecto al testigo, debido al aumento del pH que produjo esta enmienda de 5.40 a 5.80 (7.40 % de aumento) y, en menor medida, la formación de complejos entre la materia orgánica de la cachaza y el cobre del suelo.

El compost redujo la extracción de cobre un 11.49 % por efecto de complejación entre este elemento y la materia orgánica aportada, ya que el pH del suelo después de su aplicación no varió respecto al testigo, por lo que este parámetro no influyó en el contenido de cobre (Chamorro M et al., 1972; Cordero y Ramírez, 1979; Fresno García, 2017). El compost no aumentó el pH, por ser un material orgánico, se esperaba que el pH disminuyera o no se

modificara por el efecto acidificante que tiene los grupos funcionales del humus de la materia orgánica, los cuales se comportan como ácidos débiles y liberan pequeñas cantidades de hidrógeno, disminuyendo el pH del medio (Campillo R & Sadzawka R, 2020). La aplicación de ceniza no redujo el contenido de cobre en el suelo porque no produjo ningún aumento del pH y no aportó materia orgánica.

Al analizar la variable pH del suelo, el comportamiento fue inverso al presentado para el cobre extraído. Los mayores valores se obtuvieron con la mezcla y la cal dolomita en dosis de 10 T.ha<sup>-1</sup> (T6 y T5, con pH's de 6.10 y 6.03, respectivamente), seguido de la cachaza 40 T.ha<sup>-1</sup> (T2) con un pH promedio de 5.80 y por ultimo el compost y la ceniza, ambos en dosis de 10 T.ha<sup>-1</sup> con pH's de 5.43. y 5.35, respectivamente y el testigo absouto (T1).

### 6.5.2. Biomasa aérea y radicular en base seca

En el cuadro 17 se observan los resultados de biomasa aérea y radicular en base seca de la planta de sorgo (*Sorghum bicolor* L.) expresados en gramos. Tanto a nivel aéreo como radicular, los mayores valores promedio se alcanzaron con la aplicación de cachaza en dosis de 40 T.ha<sup>-1</sup> (3.51 g parte aérea y 8.32 g parte radicular) y la mezcla (3.09 g parte aérea y 7.17 g parte radicular).

Cuadro 17. Resultados de biomasa aérea y radicular en base seca.

Tratamiento	Biomasa aérea en base seca					Biomasa radicular en base seca				
	g									
	Repeticiones				Media	Repeticiones				Media
R1	R2	R3	R4	R1		R2	R3	R4		
Cachaza	3.6315	3.4781	3.3523	3.5909	3.51	6.8110	8.5515	7.9769	9.9409	8.32
Mezcla	4.0634	2.3278	2.3914	3.5972	3.09	8.8131	6.7676	6.0665	7.0470	7.17
Compost	2.5056	3.1149	1.7267	1.3062	2.16	3.8488	3.5754	2.9289	3.5894	3.49
Cal dolomita	0.8253	0.6769	0.7966	0.6280	0.73	2.4305	1.5735	1.5070	1.6543	1.79
Ceniza	0.8079	0.6061	0.4983	0.5944	0.63	1.2693	1.1788	1.2125	2.4159	1.52
Testigo	0.5608	0.4964	0.4198	0.6580	0.53	0.8654	1.0399	1.1234	1.6919	1.18

## A. Análisis de varianza para biomasa aérea y radicular en base seca

En el cuadro 18 se observa el análisis de varianza realizado para las variables biomasa aérea y radicular en base seca.

Cuadro 18. Análisis de varianza para biomasa aérea y radicular en base seca.

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV		Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> aj	CV	
Biomasa aérea*	24	0.89	0.86	27.75		Biomasa radicular*	24	0.94	0.93	20.56	
F.V.	SC	gl	CM	F	P-Valor	F.V.	SC	gl	CM	F	P-valor
Modelo	35.45	5	7.09	29.16	<0.0001	Modelo	191.75	5	38.35	59.27	<0.0001
Tratamiento	35.45	5	7.09	29.16	<0.0001	Tratamiento	191.75	5	38.35	59.27	<0.0001
Error	4.38	18	0.24			Error	11.65	18	0.65		
Total	39.83	23				Total	203.39	23			

\*Datos expresados en base seca.

Según el análisis de varianza realizado para las variables biomasa aérea y radicular en base seca, se encontró diferencia significativa en al menos uno los tratamientos.

Debido a que existe un efecto diferenciado entre los tratamientos evaluados, se realizó una prueba de comparación múltiple de medias de Tukey al 5 % de significancia para identificar el o los tratamientos que difirieron de los demás.

## B. Prueba de medias de Tukey para biomasa aérea y radicular en base seca

En el cuadro 19 se observa la prueba de comparación múltiple de medias realizada para las variables biomasa aérea y radicular en base seca.

Cuadro 19. Prueba de comparación múltiple de medias para biomasa aérea y radicular.

Variable: Biomasa aérea *				Variable: Biomasa radicular*					
Alfa= 0.05 DMS= 1.10812				Alfa= 0.05 DMS= 1.80763					
Error: 0.2432 gl: 18				Error: 0.6470 gl: 18					
Tratamiento	Medias	n	E.E	Tratamiento	Medias	n	E.E		
T2	3.51	4	0.25	A	T2	8.32	4	0.40	A
T6	3.09	4	0.25	AB	T6	7.17	4	0.40	A
T4	2.16	4	0.25	B	T4	3.49	4	0.40	B
T5	0.73	4	0.25	C	T5	1.79	4	0.40	BC
T3	0.63	4	0.25	C	T3	1.52	4	0.40	C
T1	0.53	4	0.25	C	T1	1.18	4	0.40	C

\*En base seca.

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Según la prueba de comparación múltiple de medias de Tukey, la mayor producción de biomasa aérea se alcanzó con los tratamientos T2 (cachaza en dosis de 40 T.ha<sup>-1</sup>) con una media de 3.51 g y T6 (mezcla de 6 T.ha<sup>-1</sup> compost, 6 T.ha<sup>-1</sup> ceniza, 6 T.ha<sup>-1</sup> cal dolomita y 20 T.ha<sup>-1</sup> de cachaza) con una media de 3.09 g y en tercer lugar el T4 (10 T.ha<sup>-1</sup> compost) con una media de 2.16 g. Los valores más bajos le correspondieron a los tratamientos T5, T3 y T1 (10 T.ha<sup>-1</sup> cal dolomita, 10 T.ha<sup>-1</sup> de ceniza y testigo absoluto, respectivamente) con un valor medio de 0.63 g. Se puede observar que los valores mayores corresponden a los tratamientos donde se aplicaron enmiendas orgánicas y los más bajos fueron para los tratamientos en donde se aplicaron las enmiendas inorgánicas.

La aplicación de 10 T.ha<sup>-1</sup> de cal dolomita (T5), 10 T.ha<sup>-1</sup> de ceniza de bagazo de caña de azúcar (T3) y el testigo absoluto (T1) tuvieron un efecto estadísticamente igual sobre la

producción de biomasa aérea, los cuales fueron superados un 363.49 % por los mejores tratamientos.

Este comportamiento no está directamente relacionado con la disminución de la solubilidad del cobre en el suelo como lo demuestran los resultados de la aplicación de cal dolomita 10 T.ha<sup>-1</sup>, donde se encontraron los valores más bajos de cobre (36.25 mg.kg<sup>-1</sup>) con valores de biomasa aérea (0.63 g) estadísticamente iguales al testigo absoluto, lo que indica la existencia de otros factores que limitaron la producción de biomasa aérea del sorgo, independientemente de los valores de cobre muy por encima del rango de suficiencia (2 mg.kg<sup>-1</sup> a 4 mg.kg<sup>-1</sup>).

El rendimiento relativo (R.R.) de la cachaza comparado con el testigo, la ceniza y cal dolomita, fue de 17.95 %, con una respuesta a la aplicación de cachaza del 82.05 %. La cachaza aumentó la producción de biomasa aérea en base seca un 562.24 % y radicular en un 605.08 %. El R.R. al aplicar la mezcla comparado con el testigo, la ceniza y la cal dolomita, fue del 20.38 %, con una respuesta del 79.62 %. Esta pudo ser producto del aporte nutricional de la mezcla, la cual contenía cachaza (20 T.ha<sup>-1</sup>) y compost de residuos de caña (6 T.ha<sup>-1</sup>), lo que hizo aumentar la producción de biomasa aérea un 483.02 % y radicular un 507.63 %.

La aplicación de 10 T.ha<sup>-1</sup> de compost tuvo un efecto menor a la aplicación de 40 T.ha<sup>-1</sup> de cachaza y la mezcla para el aumento de la biomasa aérea y radicular en base seca, posiblemente por la cantidad aplicada de cachaza, 30 T.ha<sup>-1</sup> más que el compost, y al mayor aporte de fósforo de la cachaza, 152.60 kg P.ha<sup>-1</sup> más. Su rendimiento relativo al aplicar el compost fue del 29.17 %, con una respuesta del 70.83 %.

La mayor producción de biomasa de los tratamientos T2 y T6 se debió al aporte de nutrientes esenciales como se observa en el (cuadro 11 y 12) en donde la cachaza por su composición con alto contenido de potasio y fósforo, este último como producto del fosfato de calcio que se le aplica durante la clarificación de los jugos de la caña, fue la que aportó este elemento en mayor cantidad (Cengicaña, 2017; Mercado Azúcar, 2020).

El aporte de nutrientes pudo ser la causa del mejor desarrollo del sorgo repercutiendo en la mayor producción de biomasa aérea y radicular. Los dos tratamientos que produjeron las mayores biomásas, tenían en común el material orgánico cachaza el cual es rico en fósforo, siendo el aporte teórico de  $460 \text{ kg P.ha}^{-1}$  para la cachaza  $40 \text{ T.ha}^{-1}$  y  $307.40 \text{ kg P.ha}^{-1}$  para la mezcla. Cabe mencionar que el suelo donde se desarrolló la investigación pertenece al orden de los Andisoles, los cuales tienen como característica la alta fijación de fósforo debido a la presencia de arcillas amorfas como lo confirma los resultados de la prueba cualitativa de pH con NaF el cual reportó un valor de 10.50 (cuadro 10 y figura 7A) y la prueba de campo (figura 6A).

La mezcla fue la enmienda que aportó mayor cantidad de potasio ( $270.60 \text{ kg K.ha}^{-1}$ ), incluso más que la cachaza ( $144 \text{ kg K.ha}^{-1}$ ), esto indica que el elemento más limitante en el suelo fue el fósforo.

El comportamiento de la producción de biomasa radicular fue similar, donde los mayores valores fueron para los tratamientos T2 y T6. Es decir donde se aplicó el mayor contenido de fósforo a través de las fuentes orgánicas. Existe una relación directa entre el mayor aporte de fósforo y el desarrollo radical (Bertsch, 1995).

En la figura 3 se observa la producción de biomasa aérea en base seca en función del contenido de cobre extraíble en suelo. La aplicación de cal dolomita en dosis de  $10 \text{ T.ha}^{-1}$ , aumentó el pH del suelo, lo que disminuyó la extracción de cobre significativamente (33.34 %) (cuadro 16 y figura 2), a pesar de esto, no se produjeron las mayores medias de biomasa aérea y radicular con este tratamiento. No se encontró relación entre bajos contenidos de cobre extraíble en suelo y alta producción de biomasa aérea y radicular, esto demuestra que el alto contenido de cobre del suelo no es el verdadero factor limitante para el desarrollo vegetal en el suelo evaluado.

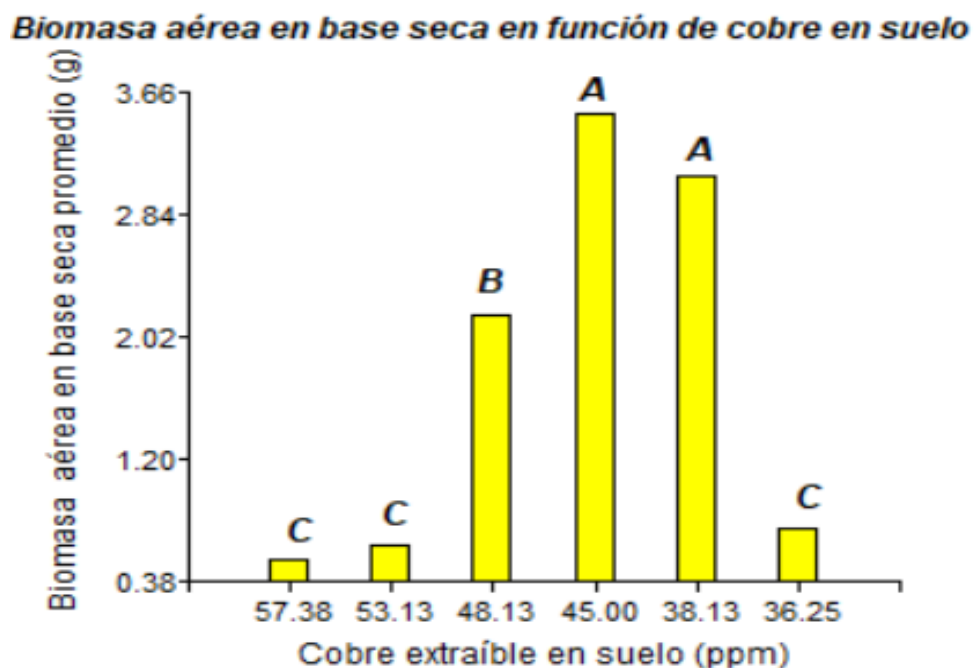


Figura 3. Producción de biomasa aérea en función de cobre extraíble en suelo.

Considerando la fijación de fósforo del suelo se realizó un post-ensayo (cuadro 22A) con aplicación de niveles crecientes de fósforo ante niveles constantes de nitrógeno y potasio para comprobar el efecto del fósforo sobre el desarrollo de las plantas y la diferencia en el crecimiento de estas fue evidente al aumentar la dosis de fósforo aplicada tal como se muestra en la figura 12A.

## 7. CONCLUSIONES

1. La cal dolomita aplicada en dosis de  $10 \text{ T.ha}^{-1}$  fue la enmienda que presentó una menor extracción de cobre con la solución Mehlich I, la cual disminuyó un 33.34 % respecto al testigo absoluto.
2. La mayor producción de biomasa aérea y radicular en base seca se alcanzó con la aplicación de cachaza en dosis de  $40 \text{ T.ha}^{-1}$  y la mezcla ( $20 \text{ T.cachaza.ha}^{-1}$ ,  $6 \text{ T.compost.ha}^{-1}$ ,  $6 \text{ T.ceniza.ha}^{-1}$  y  $6 \text{ T.cal dolomita.ha}^{-1}$ ). El compost de residuos de caña de azúcar, aplicado en dosis de  $10 \text{ T.ha}^{-1}$ , tuvo un efecto medio en la producción de biomasa aérea y radicular en base seca. La aplicación de ceniza de bagazo de caña de azúcar y cal dolomita, ambas en dosis de  $10 \text{ T.ha}^{-1}$ , no produjeron aumento significativo de la biomasa aérea y radicular en base seca.

## 8. RECOMENDACIONES

1. Aplicar cal dolomita en dosis de  $10 \text{ T.ha}^{-1}$  para reducir la solubilidad del cobre en el suelo consecuentemente, su disponibilidad para las plantas.
2. Utilizar cachaza y/o compost de residuos de la industria cañera como segunda alternativa para un manejo integral en la reducción de la disponibilidad de cobre en el suelo evaluado.
3. Evaluar niveles de nutrientes, principalmente fósforo, a través de una función de respuesta en este suelo y su efecto sobre el desarrollo vegetal a nivel aéreo y radicular.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

1. Basanta, R., García Delgado, M. A., Cervantes Martínez, J. E., Mata Vásquez, H., & Bustos Vásquez, G. (2009). *Sostenibilidad del reciclaje de residuos de la agroindustria azucarera: una revisión sustainable recycling of waste from sugarcane agroindustry: a review* [Archivo PDF]. *CyTA-Journal of Food*, 14.  
<https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/11358120709487704>
2. Bertsch, F. (1995). *La Fertilidad de los Suelos y su Manejo*.
3. Cabalceta, G., & Molina, E. (2006). *Niveles críticos de nutrimentos en suelos de Costa Rica utilizando la solución extractora Mehlich 3*. 30. [Archivo PDF].  
[https://www.mag.go.cr/rev\\_agr/v30n02\\_031.pdf](https://www.mag.go.cr/rev_agr/v30n02_031.pdf)
4. Calera San Miguel. (2016). *Cal dolomítica*.  
<http://www.calerasanmiguel.com/productos/agricola/cal-dolomitica#:~:text=Cal>
5. Camel Franco, J. M. (2011). *Evaluación de cuatro frecuencias de fertirriego en hidroponía para la producción de minituberculos de papa (Solanum tuberosum L.) Variedad Loman, para producción de semilla prebásica con calidad fitosanitaria, diagnóstico y servicios desarrollados en el Centro Experimental Doente de Agrobomía-CEDA-USAC*. [Tesis de licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala]. [http://www.repositorio.usac.edu.gt/6661/1/Trabajo de Graduacion Julia Camel.pdf](http://www.repositorio.usac.edu.gt/6661/1/Trabajo%20de%20Graduacion%20Julia%20Camel.pdf)
6. Campillo R, R., & Sadzawka R, A. (2020). *La acidificación de los suelos. Origen y mecanismos involucrados* [Archivo PDF]. <https://www.profertil.com.ar/wp-content/uploads/2020/08/la-acidificacion-de-los-suelos-origen-y-mecanismos-involucrados.pdf>
7. Cengicaña. (Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar, Guatemala). (2017). *Guía de buenas prácticas agrícolas en caña de azúcar*. [Archivo PDF]. <https://cengicana.org/files/20170425171748989.pdf>
8. Central Azucarera Tempisque S.A. (2012). *La cachaza y su empleo como abono orgánico en plantaciones de caña de azúcar* [Archivo PDF]. <https://www.catsa.net/wp-content/uploads/2018/11/LA-CACHAZA-Y-SU-EMPLEO-COMO-ABONO-ORGANICO-EN-PLANTACIONES-DE-CAÑA-DE-AZÚCAR.pdf>
9. Chamorro M, B., Echeverría P, C., Guerrero R, R., & Gamboa J, J. (1972). *Aluminio*,

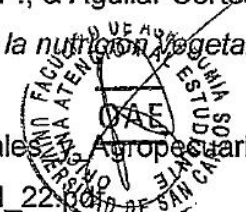


- boro, cobre, cobalto, hierro, manganeso y zinc disponibles en los suelos volcánicos de la sabana de Tuquerres, departamento de Nariño, Colombia.* [Archivo PDF].  
file:///C:/Users/Equipo/Downloads/Dialnet-AluminioBoroCobreCobaltoHierroManganesoYZincDispon-6191438.pdf
10. Chávez Bazán, C. H. (2017). *Empleo de la ceniza de bagazo de caña de azúcar (cbca) como sustituto porcentual del agregado fino en la elaboración del concreto hidráulico* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Cajamarca Perú].  
[https://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/UNC/1048/T016\\_44477012\\_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/UNC/1048/T016_44477012_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
11. Cordero y Ramírez, G. (1979). *Acumulación de cobre en los suelos del pacífico sur de Costa Rica y sus efectos detrimentales en la agricultura.* [Archivo PDF].  
[https://www.mag.go.cr/rev\\_agr/v03n01\\_063.pdf](https://www.mag.go.cr/rev_agr/v03n01_063.pdf)
12. Del Rey, I. (2019). *Relación entre nutrientes, diagrama de Mulder.*  
<https://www.tiloom.com/relacion-entre-nutrientes-diagrama-de-mulder/>
13. Disagro. (n.d.). *Calcimag.* [Archivo PDF].  
[https://www.disagro.com/sites/default/files/panfleto\\_producto/ht\\_calcimag.pdf](https://www.disagro.com/sites/default/files/panfleto_producto/ht_calcimag.pdf)
14. Espinoza, J., & Molina, E. (1999). *Acidez y encalado de los suelos.* [Archivo PDF].  
[http://www.cia.ucr.ac.cr/pdf/libros/Acidez\\_y\\_encalado\\_de\\_suelos\\_libro\\_por\\_J\\_Espinoza\\_y\\_E\\_Molina.pdf](http://www.cia.ucr.ac.cr/pdf/libros/Acidez_y_encalado_de_suelos_libro_por_J_Espinoza_y_E_Molina.pdf)
15. Facsa. (2017). *Metales pesados.* <https://www.facsa.com/metales-pesados/>
16. Fresno García, M. T. (2017). *Enmiendas de hierro y materiales orgánicos para la recuperación de suelos contaminados con arsénico y cobre* [Tesis de doctorado, Universidad Autónoma de Madrid].  
[https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/677776/fresno\\_garcia\\_teresa.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/677776/fresno_garcia_teresa.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
17. García, C., Moreno, J. L., Hernández, M. T., & Polo, A. (2002). *Metales pesados y sus implicaciones en la calidad del suelo.* 14. [Archivo PDF].  
[https://digital.csic.es/bitstream/10261/111812/1/Metales\\_pesados\\_y376.pdf](https://digital.csic.es/bitstream/10261/111812/1/Metales_pesados_y376.pdf)
18. Giralte Vidal, Lluís; Perna Armengol, Elisabet; Masqué Tell, Carmen; Carbonell Galimany, Jordi; Valiente Masdeu, Josep; Calaf Vidales, Ester; Fernández de Larrea Arriola, Lorea; Serra Antolí, Lluís; y Elorduy Vidal, X. (2020, February). *Contenido de*

- cobre en suelos de viñedo ecológicos en denominaciones de origen catalanas.*  
[http://www.acenologia.com/cienciaytecnologia/cobre\\_suelos\\_do\\_cienc174\\_0220.htm](http://www.acenologia.com/cienciaytecnologia/cobre_suelos_do_cienc174_0220.htm)
19. Kyrkby, E., & Romheld, V. (2008). *Micronutrientes en la fisiología de las plantas: Funciones, Absorción y Movilidad*. 16. [Archivo PDF].  
<http://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/MicronutrientesenlaFisiologia.pdf>
  20. Lenntech. (2016). *Cobre - W Propiedades químicas del Cobre - Efectos del Cobre sobre la salud - Efectos ambientales del cobre*. Lenntech, 1, 2.  
<https://www.lenntech.es/periodica/elementos/cu.htm>
  21. Lezcano, I. (2000). *Conozca la deficiencia de cobre*. *Informaciones Agronómicas*, 4(3), 12. <https://www.mendeley.com/catalogue/a46af6eb-c26c-36fb-940f-4131274076ef>
  22. López Bravo, E., Andrade Rivera, A. J., Herrera Suárez, M., González Cueto, O., & García de la Figal, A. (2017). *Propiedades de un compost obtenido a partir de residuos de la producción de caña*. In *scielo*.  
[http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0253-57852017000300007](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0253-57852017000300007)
  23. Lora Silva, R. (2018). *Contaminación por elementos menores y posibles soluciones*. 16. [Archivo PDF]. file:///C:/Users/Equipo/Downloads/559-Texto del artículo-929-1-10-20180808.pdf
  24. Martínez Madrid, D. E., & Marrugo-Negrete, J. L. (2021, June). *Efecto de la adición de enmiendas en la inmovilización de metales pesados en suelos mineros del sur de Bolívar, Colombia*. 2272. [Archivo PDF].  
<http://revista.corpoica.org.co/index.php/revista/article/view/2272/894>
  25. Mengel, K., & Kirkby, E. A. (2000). *Principios de nutrición vegetal*. [Archivo PDF].  
[https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/66737/mod\\_resource/content/2/PRINCIPIOS DE NUTRICIÓN VEGETAL.pdf](https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/66737/mod_resource/content/2/PRINCIPIOS DE NUTRICIÓN VEGETAL.pdf)
  26. Mercado Azúcar. (2020). *La cachaza de caña es un gran fertilizante para el campo*.  
<https://mercadoazucar.com/la-cachaza-de-cana-es-un-gran-fertilizante-para-el-campo/#:~:text=La cachaza es un residuo,y una fuente de contaminación.>
  27. Ministerio de Transición Ecológica de España. (n.d.). *Metales Pesados*.  
[https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/prob-amb/metales\\_pesados.aspx](https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/prob-amb/metales_pesados.aspx)
  28. Molina, E. (2002). *Análisis de suelo y su interpretación*. 8. [Archivo PDF].



- <http://www.infoagro.go.cr/Inforegiones/RegionCentralOriental/Documents/Suelos/SUELOS-AMINOGROWanalisisinterpretacion.pdf>
29. Ochoa, J. (2019). *Ciclo biogeoquímico del cobre*. <https://prezi.com/p/h25eave-juiv/ciclo-biogeoquimico-del-cobre/>
  30. Pérez Leal, F. (2017). *Fisiología vegetal, parte III, nutrición mineral*. [Archivo PDF]. <http://repositorio.unu.edu.pe/bitstream/handle/UNU/3201/000026082L.pdf?sequence=6&isAllowed=y>
  31. Rodríguez, A. (2006). *Ciclos biogeoquímicos*. <https://es.slideshare.net/Aaron356/ciclos-biogeoquimicos>
  32. Sacristán Moraga, D. (2015). *Evaluación de la toxicidad y de la bioacumulación del Cu en un cultivo acumulador (Lactuca sativa L.) y otro no-acumulador (Solanum lycopersicum L.) en suelos agrícolas mediterráneos representativos, como base para la propuesta de estrategias de gestión* [Tesis de doctorado, Universidad de Valencia]. <https://digital.csic.es/bitstream/10261/141302/1/Tesis-SacristánMoraga.pdf>
  33. Sela, G. (2019). *El cobre en las plantas*. <https://croipaia.com/es/blog/cobre-en-las-plantas/>
  34. Tasistro, A. (2015). *Aspectos básicos del manejo de micronutrientes*. [Archivo PDF]. [http://mca.ipni.net/ipniweb/region/mca.nsf/0/F2AB6B012CA5EBED85257E8F004E4EB9/\\$FILE/Aspectos básicos del manejo de micronutrientes.pdf](http://mca.ipni.net/ipniweb/region/mca.nsf/0/F2AB6B012CA5EBED85257E8F004E4EB9/$FILE/Aspectos%20b%C3%A1sicos%20del%20manejo%20de%20micronutrientes.pdf)
  35. Tórres Rivas, B. J., Gaitán Arévalo, J. R., Espinoza Pérez, L. J., & Escalanre García, J. (2014). *Valorización de ceniza de bagazo de caña de la industria azucarera Nicaragüense como sustituto parcial al cemento Portland*. 8. [Archivo PDF]. <file:///C:/Users/Equipo/Downloads/Dialnet-ValorizacionDeCenizaDeBagazoDeCanaDeLaIndustriaAzu-5179449.pdf>
  36. Vilar, R. (2018). Cobre. *Educación Química*, 13(2), 3. <http://revistas.unam.mx/index.php/req/article/view/66308>
  37. Villegas Torres, O. G., Domínguez Patiño, M. L., Martínez Jimenez, P., & Aguilar Cortés, M. (2015, March). *Cobre y níquel, microelementos esenciales en la nutrición vegetal*. [Archivo PDF]. [https://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Ciencias\\_Naturales\\_y\\_Agropecuarias/vol2num2/CienciasNaturalesyAgropecuariasVol2Num2Final\\_22.pdf](https://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Ciencias_Naturales_y_Agropecuarias/vol2num2/CienciasNaturalesyAgropecuariasVol2Num2Final_22.pdf)



38. Von-Suttner, B. (2019). *Cobre*. [http://www.ks-minerals-and-agriculture.com/eses/fertiliser/advisory\\_service/nutrients/copper.html](http://www.ks-minerals-and-agriculture.com/eses/fertiliser/advisory_service/nutrients/copper.html)
39. Xiong, J. (2015). *Recuperación y rehabilitación de suelos contaminados con elementos traza mediante la aplicación de enmiendas y el establecimiento de una cubierta vegetal natural o de una planta de crecimiento rápido (Paulownia fortunei)*. [Tesis de doctorado, Universidad de Sevilla]. <https://core.ac.uk/download/pdf/51402576.pdf>



## 10. ANEXOS

### 10.1. Valores de pH del pre-ensayo

En el cuadro 20A se observan los valores de pH medidos a todas las unidades experimentales del pre-ensayo.

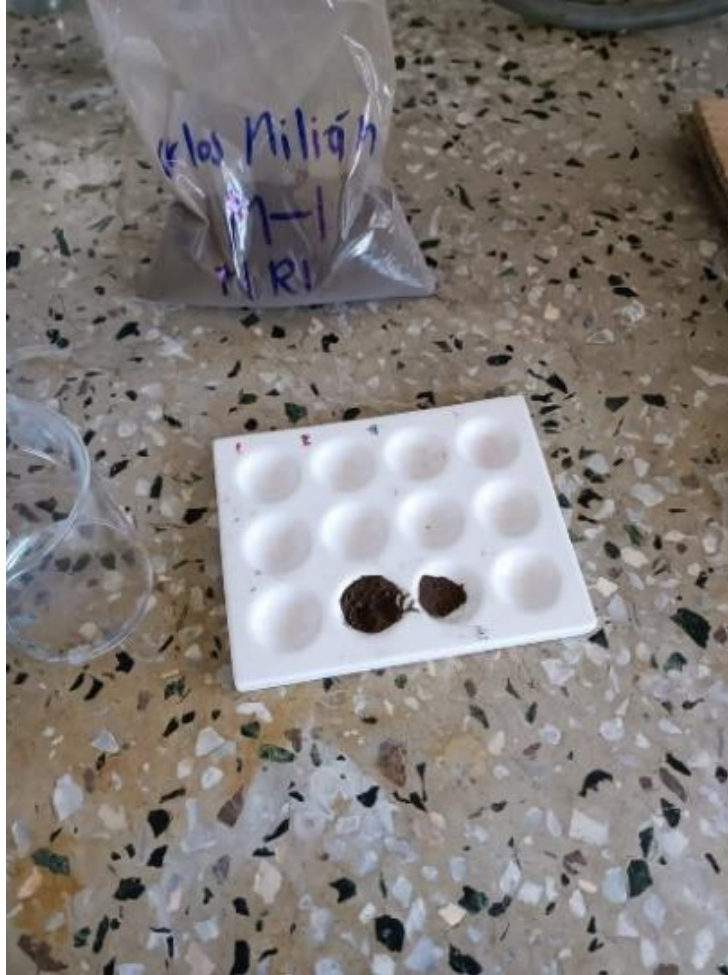
Cuadro 20A. Valores de pH del suelo para unidades experimentales del pre-ensayo.

Enmienda	Dosis (T.ha <sup>-1</sup> )	pH
Cachaza	0	5.30
	10	5.50
	20	5.60
	30	5.70
	40	5.80
Ceniza	0	5.30
	2	5.40
	4	5.40
	6	5.40
	8	5.40
Compost	10	5.40
	0	5.30
	2	5.40
	4	5.40
	6	5.40
Cal dolomita	8	5.40
	10	5.40
	0	5.40
	2	5.50
	4	5.60
Mezcla 1 (3-3-3-10)	6	5.80
	8	5.90
	10	6.00
Mezcla 1 (3-3-3-10)	Testigo	5.30
	Repetición 1	5.80
	Repetición 2	5.80
Mezcla 2 (6-6-6-20)	Testigo	5.30
	Repetición 1	6.20
	Repetición 2	6.30
Mezcla 3 (10-10-10-40)	Testigo	5.30
	Repetición 1	6.00
	Repetición 2	6.10

Fuente: elaboración propia, 2021.

## 10.2. Determinación de presencia de arcilla amorfa en suelo

En la figura 4A se observa la preparación de la muestra en una placa de porcelana previo a agregar los reactivos.



Fuente: elaboración propia, 2021.

Figura 4A. Preparación de la muestra.

En la figura 5A se observa la muestra de suelo después de agregar unas gotas de NaF.



Fuente: elaboración propia, 2021.

Figura 5A. Muestra después de agregar NaF.

En la figura 6A se observa la muestra de suelo de la derecha después de agregar unas gotas de fenolftaleína. La coloración púrpura indica que existe presencia de arcilla amorfa en la muestra de suelo.



Fuente: elaboración propia, 2021.

Figura 6A. Resultado de presencia de arcilla amorfa en suelo.

### 10.3. Medición de pH en NaF

En la figura 7A se observa la medición de pH en NaF del suelo con ayuda de un potenciómetro.



Fuente: elaboración propia, 2021.

Figura 7A. Medición de pH en NaF con potenciómetro.

#### 10.4. Croquis del ensayo en el diseño completamente al azar utilizado

En el cuadro 21A se observa la disposición de las unidades experimentales en el diseño completamente al azar utilizado.

Cuadro 21A. Disposición de las unidades experimentales del ensayo.

T4R2	T1R3	T5R3	T3R2
T6R2	T3R1	T6R4	T2R4
T4R1	T6R1	T1R2	T1R4
T2R1	T4R4	T3R4	T2R2
T1R1	T5R4	T4R3	T3R3
T5R1	T2R3	T5R2	T6R3

Fuente: elaboración propia, 2021.

### 10.5. Estado del ensayo previo a la cosecha

En la figura 8A se observa una repetición completa del ensayo ordenada por tratamiento. De izquierda a derecha se observa el testigo absoluto, la aplicación de cachaza en dosis de  $40 \text{ T.ha}^{-1}$ , ceniza de bagazo de caña de azúcar en dosis de  $10 \text{ T.ha}^{-1}$ , compost  $10 \text{ T.ha}^{-1}$ , cal dolomita  $10 \text{ T.ha}^{-1}$  y la mezcla evaluada.



Fuente: elaboración propia, 2021.

Figura 8A. Repetición completa del ensayo.

En la figura 9A se observa la comparación entre el testigo absoluto y las enmiendas orgánicas evaluadas. De izquierda a derecha se tiene el testigo absoluto, compost aplicado en dosis de 10 T.ha<sup>-1</sup>, cachaza 40 T.ha<sup>-1</sup> y la mezcla.



Fuente: elaboración propia, 2021.

Figura 9A. Comparación entre testigo absoluto y enmiendas orgánicas evaluadas.

En la figura 10A se observa la comparación entre el testigo absoluto y las enmiendas inorgánicas evaluadas. De izquierda a derecha se tienen el testigo absoluto, la ceniza de bagazo de caña de azúcar aplicada en dosis de  $10 \text{ T.ha}^{-1}$  y la cal dolomita aplicada en dosis de  $10 \text{ T.ha}^{-1}$ .



Fuente: elaboración propia, 2021.

Figura 10A. Comparación entre testigo absoluto y enmiendas inorgánicas evaluadas.

## 10.6. Ensayo cosechado

En la figura 11A se observan las partes aéreas y los sistemas radiculares de las plantas cosechadas una repetición del ensayo. De izquierda a derecha se observa el testigo absoluto, cachaza 40 T.ha<sup>-1</sup>, ceniza de bagazo de caña de azúcar 10 T.ha<sup>-1</sup>, compost 10 T.ha<sup>-1</sup>, cal dolomita 10 T.ha<sup>-1</sup> y mezcla.



Fuente: elaboración propia, 2021.

Figura 11A. Plantas cosechadas.

## 10.7. Post-ensayo de niveles de fósforo

Debido a que se encontró crecimiento reducido en el tratamiento que produjo la menor media de cobre en suelo (T5, cal dolomita 10 T.ha<sup>-1</sup>), y sabiendo que el suelo evaluado contenía arcilla amorfa (cuadro 10), la cual se caracteriza por fijar fósforo, se realizó un post-ensayo evaluando 200 kg de nitrógeno.ha<sup>-1</sup> y 200 kg K<sub>2</sub>O.ha<sup>-1</sup> ante niveles crecientes de fósforo para observar el crecimiento de las plantas.

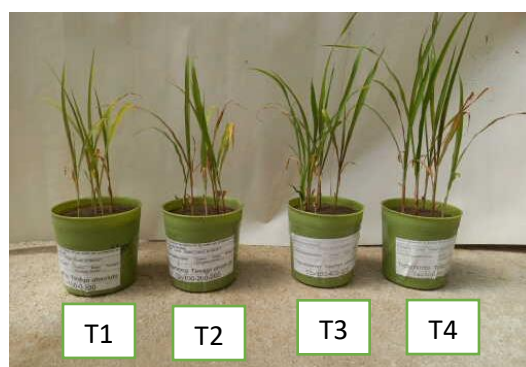
En el cuadro 22A se observan los niveles crecientes de fósforo evaluados ante niveles constantes de nitrógeno y potasio.

Cuadro 22A. Tratamientos evaluados en post-ensayo.

Tratamiento	Nitrógeno (kg N.ha <sup>-1</sup> )	Fósforo (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> .ha <sup>-1</sup> )	Potasio (kg K <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> )
T1	200	0	200
T2	200	200	200
T3	200	400	200
T4	200	500	200

Fuente: elaboración propia, 2021.

En la figura 12A se observa la mayor altura de las plantas a mayor dosis de fósforo aplicada.



Fuente: elaboración propia, 2021.

Figura 12A. Plantas utilizadas en post-ensayo.



**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**  
**FACULTAD DE AGRONOMIA**  
**COORDINACIÓN AREA INTEGRADA –EPS-**



Ref. SAIEPSA.01 Seg.S.2022

Guatemala, 26 de agosto de 2022

**TRABAJO DE GRADUACIÓN:** EVALUACIÓN DE FUENTES ORGÁNICAS E INORGÁNICAS COMO ENMIENDA PARA AMORTIGUAR EL EFECTO DEL COBRE EXTRAÍBLE EN SUELOS DE LA FINCA SOLOLÁ DEL INGENIO LA UNIÓN, BAJO CONDICIONES DE INVERNADERO EN EL CENTRO EXPERIMENTAL DOCENTE DE AGRONOMÍA (CEDA), USAC, GUATEMALA, GUATEMALA, C.A.

**ESTUDIANTE:** Carlos Rafael Milián Vásquez

**No. CARNÉ** 201603471

Dentro del Trabajo de Graduación se presenta el Capítulo II que se refiere a la Investigación Titulada:

“EVALUACIÓN DE FUENTES ORGÁNICAS E INORGÁNICAS COMO ENMIENDA PARA AMORTIGUAR EL EFECTO DEL COBRE EXTRAÍBLE EN SUELOS DE LA FINCA SOLOLÁ DEL INGENIO LA UNIÓN, BAJO CONDICIONES DE INVERNADERO EN EL CENTRO EXPERIMENTAL DOCENTE DE AGRONOMÍA (CEDA), USAC, GUATEMALA, GUATEMALA, C.A.

LA CUAL HA SIDO EVALUADA POR LOS PROFESIONALES: Dr. Aníbal Sacbajá  
 Ing. Agr. Margarita Asturias

Los Asesores de Investigación, Docente Asesor de EPSA y la Coordinación del Área Integrada, hacen constar que ha cumplido con las normas universitarias y Reglamento de la Facultad de Agronomía. En tal sentido, pase a Decanatura.

**“Id y Enseñad a Todos”**

A handwritten signature in black ink, appearing to read "PPR", with a long horizontal line extending to the right.

Vo. Bo. Ing. Agr. M.A. Pedro Peláez Reyes  
**Coordinador Área Integrada – EPS**



cc.archivo  
 PPR/acms



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA - FAUSAC -  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGRONÓMICAS  
Y AMBIENTALES -IIA-



REF. Sem. 25/2022

LA TESIS TITULADA:

"EVALUACIÓN DE FUENTES ORGÁNICAS E INORGÁNICAS COMO ENMIENDA PARA AMORTIGUAR EL EFECTO DEL COBRE EXTRAÍBLE EN SUELOS DE LA FINCA SOLOLÁ DEL INGENIO LA UNIÓN, BAJO CONDICIONES DE INVERNADERO EN EL CENTRO EXPERIMENTAL DOCENTE DE AGRONOMÍA (CEDA), GUATEMALA C.A."

DESARROLLADA POR EL ESTUDIANTE:

CARLOS RAFAEL MILIÁN VÁSQUEZ

CARNE:

201603471

HA SIDO EVALUADO POR LOS PROFESIONALES:

Dr. Ovidio Anibal Sacabajá Galindo  
Inga. Agr. Romelia Margarita Asturias

El Asesor y las Autoridades de la Facultad de Agronomía, hacen constar que ha cumplido con las Normas Universitarias y Reglamentos de la Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

  
Dr. Ovidio Anibal Sacabajá Galindo  
ASESOR

  
Inga. Agr. Romelia Margarita Asturias  
ASESOR

  
Ing. Agr. Carlos Fernando López  
DIRECTOR DEL IIA



IMPRIMASE

  
Ing. Agr. Waldemar Nuño Reyes  
DECANO



CFLB/mm  
c.c. Archivo