

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ciencias y Humanidades



Excelencia que trasciende



Impacto de la aplicación de ceniza volante sobre algunos parámetros químicos del suelo y sobre la producción y composición de la biomasa de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) bajo condiciones de invernadero

Mónica Espinoza Rivera

**Guatemala
2002**

**Impacto de la aplicación de ceniza volante sobre algunos
parámetros químicos del suelo y sobre la producción y
composición de la biomasa de frijol común (*Phaseolus
vulgaris* L.) bajo condiciones de invernadero**

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ciencias y Humanidades

**Impacto de la aplicación de ceniza volante sobre algunos
parámetros químicos del suelo y sobre la producción y
composición de la biomasa de frijol común (*Phaseolus
vulgaris* L.) bajo condiciones de invernadero**

**Trabajo de investigación presentado para optar al grado
académico de Licenciatura en Ingeniería Agrícola**

Mónica Espinoza Rivera

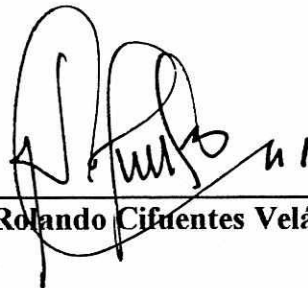


**Guatemala
2002**


Vo.Bo.:

(f) 
Ph D Rolando Cifuentes Velásquez
Asesor

Tribunal:

(f) 
Ph.D. Rolando Cifuentes Velásquez
Terna

(f) 
Ingeniero Rodolfo Ortiz Quevedo
Terna

(f) 
M.Sc. Carlos Humberto Aguirre
Terna

Fecha de aprobación: 27 de febrero de 2002

Dedicada a:
Margarita y Sofia

PREFACIO

Este trabajo de investigación se originó por la inquietud de que en nuestro país se producen muchos desechos industriales, tales como la ceniza volante, de los cuales no se tiene mucha información y hay desconocimiento sobre métodos adecuados para su manejo y reutilización. La ceniza volante es un material que puede proveer muchos beneficios cuando se utiliza en la agricultura y su uso de alguna forma puede reducir la acumulación de materiales contaminantes en nuestro medio.

Es necesario mencionar que en Guatemala no se ha realizado algún tipo de estudios en relación con el manejo o utilización de ceniza volante. Por tanto, se espera que esta tesis pueda contribuir a promover la investigación, tanto en la agricultura como en otras áreas y despertar el interés por buscar formas alternativas para el manejo de éste y otros desechos.

La realización de este proyecto involucró tiempo y mucha dedicación. De forma personal agradezco al grupo DISAGRO por haber financiado los análisis químicos de suelo y material foliar, el interés y ayuda de las personas que de alguna forma contribuyeron a su elaboración y muy especialmente a mi asesor, Dr. Rolando Cifuentes quien invirtió tiempo y esfuerzo para sacar adelante este trabajo.

CONTENIDO

	Página
LISTA DE CUADROS.....	xi
LISTA DE FIGURAS.....	xiii
RESUMEN.....	xiv
Capítulos	
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	3
III. HIPÓTESIS.....	4
IV. REVISIÓN DE LITERATURA	5
A. El carbón mineral	
B. Desechos generados durante la combustión del carbón mineral	
C. Propiedades químicas de la ceniza volante	
D. Usos de la ceniza volante	
1. Construcción	
2. Reclamación y estabilización de desechos	
3. Agricultura	
a. Efecto de la ceniza volante en el suelo	
1. Propiedades físicas	
1.1 <i>Modificación de la textura</i>	
1.2 <i>Modificación de la densidad del suelo</i>	
1.3 <i>Capacidad de retención de agua</i>	
1.4 <i>Otros Usos</i>	
2. Propiedades Químicas	
2.1 <i>pH del Suelo</i>	
2.2 <i>Nutrientes</i>	
b. Efecto de la ceniza volante en algunos cultivos	
c. Aspectos negativos de la aplicación de ceniza volante en la agricultura	

Capítulos	Página
E. Beneficios ambientales del reciclaje de la ceniza volante	
F. Tolerancia de los cultivos a las sales	
V. MATERIALES Y MÉTODOS	21
A. Localización del estudio	
B. Suelo	
C. Planta indicadora	
D. Ceniza volante	
E. Plan experimental	
F. Manejo de las muestras	
G. Manejo de las plantas en el invernadero	
H. Recolección y manejo de muestras foliares y de raíces	
I. Análisis	
1. Análisis de algunos parámetros físicos y químicos del suelo	
2. Análisis químico de biomasa	
3. Análisis estadístico	
VI. RESULTADOS	29
VII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	37
VIII. CONCLUSIONES.....	44
IX. RECOMENDACIONES.....	46
X. BIBLIOGRAFÍA.....	47
XI. APÉNDICE	50

LISTA DE CUADROS

Cuadro	Página
1. Composición química de los diferentes tipos de ceniza volante.....	11
2. Tolerancia de algunos cultivos a las sales.....	20
3. Características químicas del suelo y de la ceniza volante utilizada en el ensayo de invernadero.....	22
4. Tratamientos y cantidad de ceniza volante utilizada en el experimento de invernadero.....	23
5. Metodología utilizada para el análisis de suelo.....	27
6. Efecto de la aplicación de ceniza volante sobre algunos parámetros químicos del suelo. Guatemala, 2001.....	33
7. Efecto de la aplicación de ceniza volante sobre la textura del suelo. Guatemala, 2001.....	34
8. Efecto de la aplicación de ceniza volante sobre algunos parámetros de composición química de biomasa de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.). Guatemala, 2001.....	35
9. Efecto de la aplicación de ceniza volante sobre la germinación y producción de biomasa de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L). Guatemala, 2001.....	36
A1. Impacto de la aplicación de ceniza volante sobre algunos parámetros químicos del suelo. Guatemala, 2001.	52
A2. Impacto de la aplicación de ceniza volante sobre la textura del suelo Guatemala, 2001.	53

A3. Impacto de la aplicación de ceniza volante sobre la concentración de algunos nutrientes esenciales en la parte aérea (tallo + hojas) de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.). Guatemala, 2001.	54
A4. Impacto de la aplicación de ceniza volante sobre la producción de biomasa de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.). Guatemala, 2001.	55
A5. Suma de cuadrados del análisis de varianza efectuado a los parámetros de suelo cuantificados en el estudio de invernadero Guatemala, 2001.	56
A6. Suma de cuadrados del análisis de varianza efectuado al análisis de textura del suelo. Guatemala, 2001.	57
A7. Suma de cuadrados del análisis de varianza efectuado a la concentración de elementos esenciales en la parte aérea del frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.). Guatemala, 2001.	57
A8. Suma de cuadrados del análisis de varianza efectuado a la producción de biomasa de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.). Guatemala, 2001.	58
A9. Resultados del análisis de pasta saturada. Guatemala, 2001.	58

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1. Proceso de carbonización para la formación de carbón mineral.....	6
2. Proceso de producción de ceniza volante	9
3. Partículas de ceniza volante (pleurosferas).....	10
4. Partículas de ceniza volante (cenosferas).....	10
5. Relación entre el rendimiento relativo de los cultivos y la salinidad del suelo.....	19
A1. Efecto de la aplicación de la ceniza volante al suelo sobre la apariencia de las plantas de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.).....	50
A2. Efecto de la aplicación de la ceniza volante al suelo sobre la apariencia de las plantas de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.).....	50
A3. Efecto de la aplicación de la ceniza volante al suelo sobre el desarrollo de las raíces de las plantas de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.).....	51

RESUMEN

El carbón mineral es la principal materia prima utilizada en la producción de energía eléctrica a nivel mundial. Durante el proceso de combustión del carbón se generan diferentes tipos de desechos y la ceniza volante es la que se produce en mayor cantidad.

En Guatemala cerca del 12 % de la electricidad se genera a partir de la combustión del carbón mineral y anualmente se producen alrededor de 44,000 t de ceniza volante. Ésta es un residuo que puede ser un potencial contaminante del ambiente si no se utiliza en programas de reutilización.

Este estudio se realizó con el fin de evaluar el uso alternativo de la ceniza volante en la agricultura, al aprovechar los posibles beneficios que su aplicación pueda tener sobre algunas propiedades físicas y químicas de un suelo ácido y sobre la producción y composición de biomasa de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.).

Los tratamientos evaluados incluyeron las aplicaciones de 0, 0.2428, 2.428, 8.01, 16.02, 24.28, 242.8 y 500 t de ceniza volante/Ha. Las unidades experimentales consistieron en bolsas plásticas conteniendo 500 g de suelo seco. Una vez aplicada la ceniza, la mezcla se humedeció hasta alcanzar capacidad de campo y se incubó por 4.5 meses en un laboratorio.

Después del período de incubación, el suelo fue analizado, transferido a macetas plásticas en el invernadero y se sembró frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.). El diseño experimental utilizado en el invernadero fue completamente al azar con tres repeticiones. Las plantas fueron cosechadas 45 días después de la siembra. Las variables de respuesta evaluadas fueron pH, CE, CICE, saturación de Ca, K, Mg y Al +H, NO₃-N, K, Ca, Mg, B,

Fe, Mn y Zn en el suelo, la producción de biomasa foliar y de raíces, así como la concentración de P, K, Mg, B, Fe, Cu, Zn y Mn en la parte aérea (hojas + tallos) de las plantas.

La aplicación de ceniza volante en el suelo incrementó el pH, la CE y la CICE, en donde los valores más altos fueron encontrados para los tratamientos de 242.8 y 500 t de CV/Ha. La acidez intercambiable y el Al mostraron disminuciones dramáticas a valores de 0 para los tratamientos de 242.8 y 500 t de CV/Ha. También se observó un aumento en las concentraciones de N, K, Ca, Mg y B. La saturación de potasio en el complejo de intercambio mostró una tendencia a disminuir, mientras que la de la saturación de calcio fue a aumentar. Los niveles más altos de Fe y Zn se obtuvieron a partir de aplicaciones de 242.8 t de CV/Ha, mientras que para el Mn se obtuvieron los valores más altos con el control y las aplicaciones de 0.2428 y 2.428 t de CV/Ha.

Con las aplicaciones de ceniza volante no se modificó la textura del suelo, pero se observó un aumento significativamente en el contenido de limo.

Los resultados del análisis químico de biomasa mostraron un aumento en las concentraciones de P para los tratamientos de 242.8 y 500 t/Ha. La tendencia del boro fue a aumentar, caso contrario al Mn, mientras que el Ca y Mg no presentaron un patrón definido al aumento de la aplicación del material.

La germinación/emergencia de plántulas de frijol fue de 100 % para todos los tratamientos. La producción de biomasa foliar y de raíces incrementó con la aplicación de hasta 16.01 t de CV/Ha. Por encima de este valor, el crecimiento de las plantas se redujo significativamente.

A partir de la aplicación de 8.01 t/Ha todas las plantas presentaron síntomas de toxicidad caracterizados como manchas necróticas y cloróticas que empezaron en las hojas primarias de las plantas y posteriormente se extendieron a las hojas más jóvenes. Esto se debió al incremento significativo del B en el suelo y a la absorción/acumulación de este elemento por las plantas. La cantidad de ceniza volante que optimizó el rendimiento sin manifestación de síntomas de toxicidad por B está entre 2.428 y 8.01 t/Ha.

Se concluye que la aplicación de ceniza volante al suelo influyó significativamente sobre los parámetros evaluados, tanto en el suelo como en la producción y composición de biomasa de frijol común. El principal factor limitante de la aplicación de ceniza volante en este estudio estuvo asociado con la toxicidad de boro, debido a la alta concentración de este elemento en el material original. Por tanto, se recomienda conducir otros estudios para determinar en que cultivos y tipos de suelo es recomendable la aplicación de ceniza volante.

I. INTRODUCCIÓN

El carbón mineral es la principal fuente de combustible usada para la generación de energía eléctrica. Más de la mitad de la producción total de carbón a nivel mundial provee actualmente cerca del 40 % de la electricidad del planeta (www.wci-coal.com/spanish.htm). En Guatemala se utiliza carbón mineral para generar aproximadamente el 12 % de la energía eléctrica del país (Veliz, 2001).

Durante la combustión del carbón mineral existe producción de residuos inorgánicos que incluyen: ceniza volante, ceniza de fondo, escoria de caldera y materiales de la desulfurización de flujo de gas (Hoffman, 1998c). De estos materiales, la ceniza volante es el que se produce en mayor volumen.

La ceniza volante es un subproducto sólido que es arrastrado y llevado hacia afuera de las calderas en el flujo de gases después que el carbón es consumido (Hoffman, 1998c). Este tipo de desecho se acumula rápidamente y puede causar enormes problemas de desperdicio a menos que sea utilizado en programas de reutilización.

Se reporta que en muchos países las cantidades producidas de este material son elevadas. Por ejemplo, en la India se generan 50 millones de toneladas (t) de ceniza volante al año (Kumar et. al., 2000), en Estados Unidos alrededor de 45 millones de t, en Gran Bretaña 10 millones de t y en Australia 8 millones de t (www.geocities.com/CapeCanaveral/Launchpad/2095/flyash.html).

La ceniza volante tiene un gran potencial para ser utilizada en la agricultura, construcción, reclamación y estabilización de desechos. Se ha demostrado que el uso de este producto mejora tanto las propiedades físicas (textura, densidad, capacidad de retención de agua) como químicas (pH, disponibilidad de nutrientes) del suelo y es considerada como un material que puede proveer algunos nutrientes esenciales que requieren las plantas (Kumar et. al., 2000).

Algunos factores desfavorables del uso de la ceniza volante en el suelo incluyen la presencia de boro y sales solubles, disponibilidad a largo plazo de molibdeno, selenio y posiblemente arsénico. La concentración extremadamente alta de estos elementos en el suelo podría provocar problemas de toxicidad en las plantas y de sodicidad en los suelos (Adriano y Weber, 2001).

En Guatemala se cuenta únicamente con la planta termoeléctrica San José. Se reporta que se producen 120 toneladas diarias de ceniza volante (aproximadamente 44,000 t/año). Su uso actual es como aditivo para la construcción de blocks y en la fabricación de cemento (Veliz, 2001). No se han realizado en nuestro país investigaciones sobre el uso de este material en la agricultura.

La ceniza volante que se produce en Guatemala es de naturaleza alcalina y salina. Debido a su alto valor de pH (12.4) podría ser utilizada en la corrección de suelos ácidos. Sin embargo, su alto contenido de sales puede ser limitante para su uso en suelos en donde se producen plantas sensitivas a las sales tales como el frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.).

Con este estudio se pretende encontrar un uso alternativo de la ceniza volante que de otra forma puede llegar a ser un potencial contaminante del ambiente.

II. OBJETIVOS

1. GENERAL

- Proponer un uso alternativo en la agricultura a los desechos producidos durante la combustión del carbón mineral en la generación de energía eléctrica.

2. ESPECÍFICOS

- Evaluar el efecto de la cantidad de ceniza volante aplicada al suelo sobre algunos parámetros químicos (pH, capacidad de intercambio catiónico, saturación de bases intercambiables, acidez extractable y estatus nutricional) de un suelo ácido.
- Evaluar el efecto de la cantidad de ceniza volante aplicada al suelo sobre la producción y composición (fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, zinc, cobre, manganeso y boro) de la biomasa de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.).

III. HIPÓTESIS

- Existe una cantidad óptima de ceniza volante que se puede utilizar sin detrimento de la calidad del suelo, así como de la producción y composición del frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.).

IV. REVISIÓN DE LITERATURA

A. El carbón mineral

El carbón es una roca sedimentaria, combustible, de origen orgánico compuesta principalmente de carbono, hidrógeno y oxígeno (www.wci-coal.com/spanish.htm). También contiene cantidades menores de nitrógeno y azufre y cantidades variables de humedad e impurezas minerales (Kirk y Othmer, 1961).

El carbón mineral proviene de restos alterados de vegetación prehistórica que originalmente se acumuló como plantas en pantanos y turberas. La acumulación de limos y otros sedimentos, junto con los movimientos en la corteza terrestre enterraron estos pantanos y turberas, en algunos casos a gran profundidad (Kirk y Othmer, 1961).

A medida que iban quedando enterradas, las plantas fueron sometidas a temperaturas y presiones elevadas las cuales causaron cambios físicos y químicos en la vegetación, transformándolas en carbón. Inicialmente la turba precursora del carbón fue transformada en lignito (figura 1) (www.wci-coal.com/spanish.htm), el cual contiene de 30 a 40 % de carbono (Montgomery, 1987). Luego de muchos millones de años, la continuidad de los efectos de la temperatura y presión produjeron cambios adicionales al lignito e incrementaron progresivamente su madurez y lo transformaron al rango conocido como carbones subbituminosos (www.wci-coal.com/spanish.htm) formados de 40 – 50 % de carbono (Montgomery, 1987).

A medida que este proceso continuó ocurrieron cambios físicos y químicos de los carbones subbituminosos que los volvieron más duros y maduros hasta formar los carbones bituminosos con valores de 50 a 80 % de carbono. Bajo las condiciones adecuadas, el incremento progresivo en la madurez orgánica continuó hasta formar la antracita (www.wci-coal.com/spanish.htm) con valores de 80 a 95 % de carbono (Montgomery, 1987).

Los carbones de bajo rango como el lignito o el carbón subbituminoso son típicamente más blandos, fácilmente desmenuzables, opacos, con apariencia a tierra, que se caracterizan por tener altos niveles de humedad y bajo contenido de carbono y, por consiguiente, menos energía. Los carbones de alto rango son más duros, fuertes y con un contenido mayor de carbono (www.wci-coal.com/spanish.htm).

Figura 1. Proceso de carbonización para la formación de carbón mineral



Fuente: <http://www.powerworks.com.au/pw075coalsequence.htm>

B. Desechos generados durante la combustión de carbón mineral

El carbón mineral es una de las principales materias primas para la producción de energía eléctrica. Actualmente más de la mitad de la producción total de carbón provee cerca del 40 % de la electricidad generada en el mundo. Datos de 1996 indican que el porcentaje de energía eléctrica que depende del carbón mineral en algunos países es el

siguiente: Polonia 95 %, Sudáfrica 93 %, Dinamarca 77 %, Australia 83 %, China 75 %, Grecia 69 %, Alemania 53 % y los Estados Unidos de América 53 % (www.wci-coal.com/spanish.htm). En Guatemala, aproximadamente el 12 % de la energía eléctrica depende del carbón mineral (Veliz, 2001).

Los residuos inorgánicos que quedan a partir de la combustión del carbón pulverizado incluyen varios tipos de materiales: cenizas volantes, cenizas de fondo, escoria de caldera y materiales de la desulfurización de flujo de gas (Hoffman, 1998c).

Las cenizas volantes son un subproducto sólido que es arrastrado con los gases de la combustión (www.geocities.com/CapeCanaveral/Launchpad/2095/flyash.html). Estas partículas son removidas de los precipitadores electrostáticos, colectadas y almacenadas secas para su desecho o reutilización (figura 2) (Hoffman, 1998c).

Las cenizas de fondo constituyen residuos sólidos cuyas partículas individuales son más grandes que las cenizas volantes y caen al fondo durante el flujo de aire para después ser removidos a través de tuberías (Adriano y Weber, 2001).

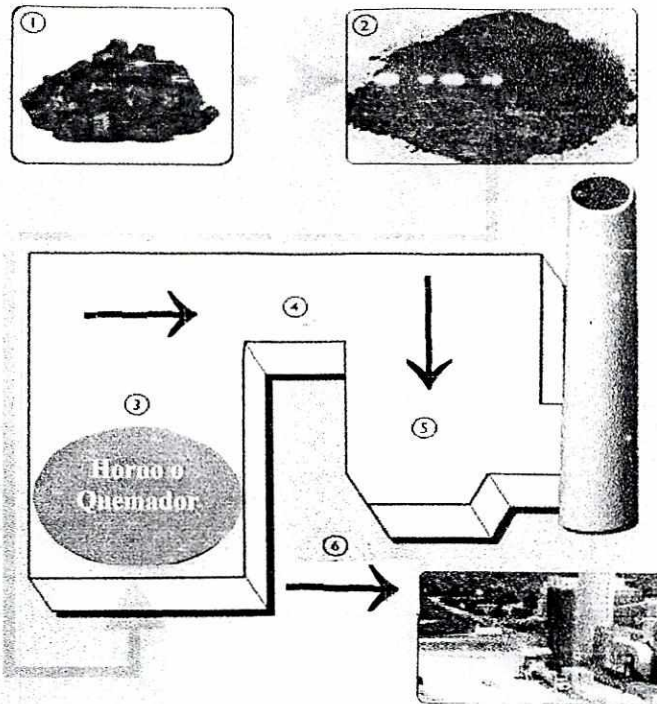
La escoria de caldera es un tipo de ceniza de fondo producida en las calderas de combustión. Es el desecho que se forma a partir del derretimiento de los minerales residuales presentes en el carbón que luego son enfriados y producen partículas duras y vidriosas (Hoffman, 1998c). Este tipo de material representa aproximadamente del 20 al 50 % de los residuos que permanecen en las calderas o quemadores (www.tfhr.gov/hnr20/recycle/waste/cbabs1.htm).

Los materiales de la desulfurización de flujo de gas consisten en el material sólido que queda al remover el dióxido sulfúrico gaseoso en las pilas de la caldera durante el proceso conocido como desulfurización de flujo de gas (www.tfhr.gov/hnr20/recycle/waste/cbabs1.htm).

De los diferentes subproductos de la combustión del carbón la ceniza volante se produce en mayor volumen. Algunas estadísticas reportan que en Estados Unidos en 1998 se produjeron 74.9 millones de toneladas de subproductos de la combustión del carbón, de los cuales 44.9 millones de toneladas (60 %) fueron de ceniza volante. En plantas generadoras de electricidad de Gran Bretaña se producen 10 millones de toneladas de cenizas de desecho. En Australia alrededor de 8 millones de toneladas de ceniza volante (www.geocities.com/CapeCanaveral/Launchpad/2095/flyash.html), mientras que en la India se obtienen 50 millones de toneladas anualmente (Kumar et. al., 2000). En Guatemala se producen aproximadamente 44,000 toneladas de ceniza volante al año (Veliz, 2001).

La generación de productos de la combustión del carbono a escala mundial puede causar enormes problemas de contaminación si dichos residuos no son manejados en proyectos de recuperación o reutilización (Adriano y Weber, 2001).

Figura 2. Proceso de producción de ceniza volante



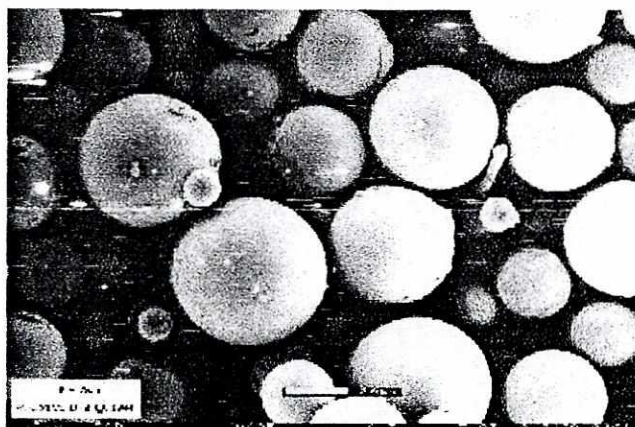
1. Trozos de carbón.
2. Carbón pulverizado.
3. El carbón pulverizado es quemado y los minerales inorgánicos derretidos.
4. Las partículas de las cenizas se solidifican en el vapor de aire.
5. Las partículas de ceniza volante son colectadas.
6. Las partículas de ceniza volante son transportadas.

Fuente: www.seaflyash.com/flyash_collection.htm

C. Propiedades químicas de la ceniza volante

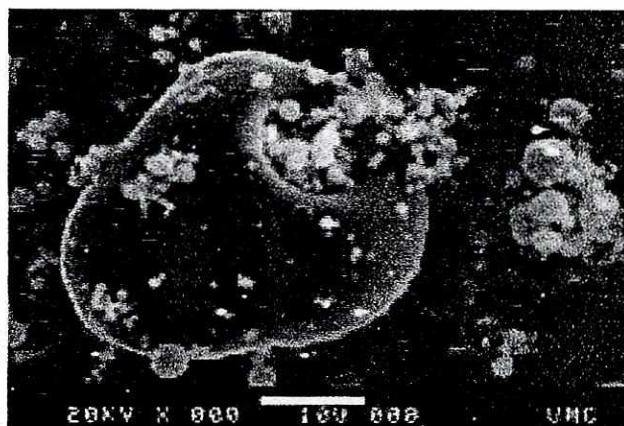
La ceniza volante está compuesta por partículas de forma esferoidal. Físicamente pueden ser agrupadas en pleurosferas o esferas rellenas (figura 3) y en cenosferas o cenizas agujereadas (figura 4) (Adriano y Weber, 2001).

Figura 3. Partículas de ceniza volante (pleurosferas)



Fuente: www.geocities.com/CapeCanaveral/Launchpad/2095/images.htm

Figura 4. Partículas de ceniza volante (cenosferas)



Fuente: Misra, 2001

Químicamente la composición de la ceniza volante varía, de acuerdo a la calidad del carbón utilizado y las condiciones de operación de las estaciones térmicas de poder. Contienen del 95 al 99 % de sílice, aluminio, hierro y calcio, cerca de 0.5 - 3 % de sodio, fósforo, potasio y azufre y el resto está compuesto de elementos traza como arsénico,

bario, boro, cromo, plomo, molibdeno, níquel, selenio, estroncio y zinc. En general, la ceniza volante consiste prácticamente de todos los elementos presentes en el suelo con excepción de carbono orgánico y nitrógeno (Kumar et. al., 2000).

Existen dos tipos de cenizas volantes, la clase C y la clase F. El primer tipo normalmente se origina de lignito o carbón subbituminoso, lo que produce que contenga un alto contenido de calcio (17 - 32 % de CaO) (www.geocities.com/CapeCanaveral/Launchpad/2095/chemistry.html). También contiene más del 50 % de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ y existen principalmente como una fase vidriosa (Hoffman, 1998b).

La ceniza tipo F se produce a partir de la combustión de carbones tipo bituminoso y subbituminoso (www.geocities.com/CapeCanaveral/Launchpad2095/chemistry.html). Este tipo de ceniza es generalmente baja en calcio: Menos del 7 %, pero contiene más del 70 % de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_3\text{O}_2$ (Hoffman, 1998b). La ceniza volante tipo F puede dividirse en clase F baja en hierro (6 - 16 % de Fe_2O_3) y alta en hierro (16 - 24 % de Fe_2O_3) (cuadro 1). En nuestro medio aparentemente se genera ceniza volante tipo F.

Cuadro 1. Composición química de los diferentes tipos de ceniza volante

Compuesto	Clase F baja en hierro (%)	Clase F alta en hierro (%)	Clase C (%)
SiO_2	46-57	42-54	25-42
Al_2O_3	18-29	16.5-24	15-21
Fe_2O_3	6-16	16-24	5-10
CaO	1.8-5.5	1.3-3.8	17-32
MgO	0.7-2.1	0.3-1.2	4-12.5
K_2O	1.9-2.8	2.1-2.7	0.3-1.6
Na_2O	0.2-1.1	0.2-0.9	0.8-6
SO_3	0.4-2.9	0.5-1.8	0.4-5
TiO_2	1-2	1-1.5	< 1

Fuente: www.geocities.com/CapeCanaveral/Launchpad/2095/chemistry.html

D. Usos de la ceniza volante

Actualmente la ceniza volante es importante en la industria de la construcción, en la agricultura y en programas de restauración de desechos.

1. Construcción

Algunos de los usos de la ceniza volante en construcción incluyen:

- a. Producción de concreto y productos de concreto.
- b. Manufactura de cemento, rellenos estructurales y materiales de construcción como blocks y ladrillos.
- c. Producción de asfalto.
- d. Estabilización de suelos, bases de caminos y plataformas.

(Hoffman, 1998).

2. Reclamación y estabilización de desechos

Los productos de la combustión del carbón contienen grandes cantidades de compuestos de calcio con pH de 11 - 12.5, lo que permite utilizarlos para la neutralización de desperdicios. Adicionalmente los silicatos, aluminatos y anhídrita presentes en dichos materiales tienen propiedades cementantes que pueden solidificarlos ([www.cpmash.com/ Other_Ash.htm](http://www.cpmash.com/Other_Ash.htm)). Como compuesto puzolánico, la ceniza volante se utiliza principalmente para materiales inorgánicos (LaGrega et. al., 1996).

Un reporte de la literatura indica cómo un lodo procedente de un tanque de digestión Imhoff fue tratado con ceniza volante y cal para estabilizar altos niveles de cadmio, cromo, cobre, hierro, plomo, magnesio, manganeso, selenio, plata y zinc. Los ensayos de lixiviación indicaron que el proceso de estabilización reducía significativamente la velocidad de lixiviación de varios de estos elementos (LaGrega et. al., 1996).

En general, la ceniza volante puede tener efectos beneficiosos en la estabilización tanto de compuestos orgánicos como inorgánicos (LaGrega et. al., 1996).

3. Agricultura

El potencial de la ceniza volante como un recurso para utilizar en la agricultura está bien establecido, ya que cada vez más investigadores están convencidos que posee una utilidad potencial en el campo. El mayor atributo que hace que la ceniza volante sea utilizada en la agricultura es su textura y el hecho de que contiene casi todos los elementos nutritivos esenciales para las plantas con excepción de nitrógeno y carbono orgánico. Aunque la ceniza volante no puede sustituir a los fertilizantes químicos o abonos naturales, puede combinarse con estos para conseguir beneficios adicionales como mejoramiento de las propiedades físicas del suelo e incrementos de rendimiento. Esto implica que la aplicación de grandes cantidades de ceniza volante en suelos agrícolas y hortícolas mejoran las propiedades físicas y químicas del suelo (Adriano y Weber, 2001).

a. Efecto de la ceniza volante en el suelo

1. Propiedades físicas

1.1 Modificación de la textura

En suelos con alta cantidad de arcilla existe una reducción de infiltración e incremento de la resistencia a través de costras que impiden la emergencia de semillas. La ceniza volante a causa de su textura y contenidos de calcio puede aliviar estos problemas al utilizarse como enmienda (Salé et. al., 1996). Se ha reportado que la adición de 70 t/ha de ceniza volante puede alterar la textura de suelos arenosos y arcillosos a limosos. Esto implica que la porción más importante de partículas que constituyen la ceniza volante es el limo (Kumar et. al., 2000).

1.2 Modificación de la densidad del suelo

El tamaño de las partículas de ceniza volante es variable, pero la mayoría de ellas tiene un diámetro parecido a las del limo (0.05 - 0.002 mm). En un experimento

efectuado en cinco tipos de suelo la densidad aparente cambió de 0.89 a 1.01 g/cm³ al aplicar cantidades considerables de ceniza volante. En suelos con alta densidad aparente (1.25 - 1.60 g/cm³) se pudo observar que las aplicaciones de ceniza volante cambiaron esta característica a valores más pequeños. Contar con una óptima densidad aparente del suelo ayuda a mejorar su porosidad, la penetración de raíces, la capacidad de retención de humedad y su manejo (Kumar et. al., 2000).

1.3 Capacidad de retención de agua

Se ha demostrado que las aplicaciones de ceniza volante incrementan la disponibilidad de agua en los suelos de texturas arcillosas y en suelos arenosos. En la India, se ha reportado que las aplicaciones de este material aumentaron la porosidad de suelos algodoneros, disminuyeron la porosidad de los suelos arenosos y redujeron el gasto de agua por irrigación, esto como resultado de un aumento en la capacidad de retención de agua en el suelo (Kumar et. al., 2000).

Reportes efectuados por Chang et. al. (1977) mencionan que la capacidad de retención de agua del suelo se incrementó al adicionar 8 % de ceniza volante mientras que la conductividad hidráulica mejoró a bajas cantidades de aplicación, pero se deterioró cuando la ceniza excedió en un 20 % en suelos calcáreos y un 10 % en suelos ácidos (Kumar et. al., 2000).

1.4 Otros usos: Cobertura del suelo

El USDA ha demostrado que el uso de la ceniza volante y otros productos de la combustión del carbón son una opción viable como material para cobertura de suelos. Su aplicación sirve para reducir el crecimiento de malezas y pastos alrededor de árboles e incrementar la retención de humedad en el suelo. Adicionalmente pueden ser una fuente importante de nutrientes esenciales para plantaciones de árboles ya establecidas (www.cpmash.com/Other_Ash.htm).

2. Propiedades químicas

2.1 pH del suelo

Grandes cantidades de ceniza volante tienden a ser de naturaleza alcalina. Esta propiedad puede ser explotada para neutralizar suelos ácidos. La aplicación de ceniza volante no sólo mejora el pH del suelo sino que simultáneamente aporta nutrientes esenciales para las plantas y modifica sus propiedades físicas. Kumar et. al. (2000) han reportado que la adición de ceniza volante incrementó el pH del suelo de 5.4 a 9.9. Esto puede ser un factor determinante en la mitigación de la toxicidad de aluminio, especialmente en subsuelos de suelos extremadamente ácidos. Estudios adicionales han demostrado que las aplicaciones excesivas de ceniza volante puede causar un aumento en la salinidad del suelo, especialmente con el uso de cenizas no intemperizadas (Adriano y Weber, 2001).

Debido a que algunas cenizas volantes son ácidas por la presencia de azufre (Adriano y Weber, 2001) su aplicación puede ser importante para la recuperación de suelos alcalinos. Se ha demostrado que con el uso de ceniza de este tipo se puede llegar a modificar el pH de suelos alcalinos hasta valores cerca de la neutralidad (Kumar et. al., 2000).

2.2 Nutrientes

Análisis efectuados demuestran que la ceniza volante contiene todos los elementos presentes en el suelo (Kumar et. al., 2000) incluyendo los elementos esenciales requeridos por las plantas (www.wvu.edu/~research/techbriefs/coalashte.chbrief.html). Por tanto, pueden considerarse como una fuente de nutrientes que puede ser empleado adicionalmente a los fertilizantes convencionales. Esto es de utilidad particularmente en la formulación de mezclas físicas de fertilizantes en donde se necesita de un material de relleno para completar el 100 % del peso.

En general, las cenizas volantes no poseen cantidades significativas de fósforo o de potasio, pero pueden proveer calcio, azufre, boro, molibdeno y selenio (Vance, 1996).

b. Efecto de la ceniza volante sobre algunos cultivos

La aplicación de ceniza volante tiene un impacto sobre el crecimiento y rendimiento de varios cultivos. Kumar et. al. (2000) reportan un aumento en los rendimientos del 45 % en papa y arveja, 40 % en tomate y 29 % en repollo respecto a los controles establecidos cuando se realizaron aplicaciones de ceniza volante en proporciones del 25 % del peso total del suelo. También se observó que las aplicaciones de 10 t/Ha de ceniza volante incrementaron el rendimiento de trigo de 21.5 a 24.1 qq/Ha, en algodón de 1245 a 1443 kg/Ha y un aumento en el rendimiento del 25 % de girasol cuando se aplicó un total de 60 t/Ha de ceniza volante.

Kumar et. al. (2000) indicaron que la aplicación de 10 t/Ha al suelo en combinación con otras fuentes orgánicas e inorgánicas incrementó la concentración de macronutrientes (nitrógeno, fósforo, calcio y magnesio) en granos de arroz y otros cultivos como papa y mostaza comparada con los tratamientos control. Además, cultivos como arroz, mostaza, trigo y girasol que fueron tratados con aplicaciones de ceniza volante mostraron ser más resistentes a enfermedades, insectos y plagas comparados con aquellos a los cuales no se les aplicó ceniza volante.

Salé et. al. (1996) reportan que las aplicaciones de ceniza volante pueden retardar la emergencia de plántulas de cebada, no afectando el rendimiento del grano y biomasa del cultivo, pero se observan efectos detrimentales de algunos elementos como boro y selenio con aplicaciones ≥ 50 % de ceniza volante en peso.

Aitkin y Bell (1985) encontraron que las aplicaciones de mas de 30 % en peso de ceniza volante intemperizada a un suelo franco limoso redujeron significativamente el rendimientos de ejote francés (*Phaseolus vulgaris* L.) en un 48 % y del pasto Rhodes (*Chloris gayana* Kunth) en un 18 % cuando se realizaron aplicaciones de más de 70 % de ceniza volante en peso. Estas reducciones de rendimiento fueron asociadas con efectos de toxicidad de boro en las plantas (Salé et. al., 1996).

Fail (1987) aplicó 70 t/ha de ceniza volante (pH 11) a un suelo de una mina y determinó que para el segundo año del experimento la biomasa de un pasto Rhode Island (*Agrostitis tenuis* Sibth.) incrementó su rendimiento 30 veces y 20 veces para *Festuca arundinaceous* Schreb (Salé et. al., 1996).

Es necesario mencionar que cultivos como la papa, arroz y tomate son moderadamente sensibles a la salinidad del suelo, mientras que el trigo es moderadamente tolerante (cuadro 2). Esto implica una respuesta diferente en cuanto a rendimiento por la presencia de sales en el suelo.

c. Aspectos negativos del uso de ceniza volante en la agricultura

Aunque la ceniza volante puede ser un material importante para aplicaciones en la agricultura, se deben tomar en cuenta algunas precauciones con su uso, debido a los niveles de radioactividad natural y la presencia de elementos pesados y tóxicos. De acuerdo a la información disponible hasta ahora, no parece existir mucha preocupación con metales pesados y radiactividad (Kumar et. al., 2000).

Los factores desfavorables o detrimentales para su uso en el suelo incluyen la presencia de boro y sales solubles, especialmente en materiales no intemperizados, disponibilidad a largo plazo de molibdeno, selenio y posiblemente arsénico, alta equivalencia de carbonato de calcio en ciertos productos, deficiencia potencial de micronutrientes o imbalances de nutrientes, potencial de sodicidad para los suelos, altos costos económicos de manejo, reparto y aplicación y regulaciones restrictivas, Además, puede reducir la infiltración y percolación en algunos casos y ocasionar alta erosividad (Adriano y Weber, 2001).

E. Beneficios ambientales del reciclaje de la ceniza volante

- La utilización de la ceniza volante conserva energía y reduce la demanda de los materiales típicos del pavimento, tales como la cal, el cemento, el pedrín y la piedra, los cuales requieren energía para producirse (www.geocities.com/CapeCanaveral/Launchpad/2095/flyash.html).
- La ceniza volante también puede sustituir a la arcilla, arena, piedra caliza y la grava, y ahorra los costos de energía al minar tales materiales (www.geocities.com/CapeCanaveral/Launchpad/2095/flyash.html).
- Reducción en la producción de CO₂ durante la fabricación de productos de la construcción. Por cada tonelada de ceniza volante reciclada utilizada para la producción de cemento o cal se reduce la emisión de una tonelada de CO₂, que es el principal gas de invernadero producido (Hoffman, 1998a).
- Mejora la condición físico-química del suelo (Hoffman, 1998a).
- Se le encuentra un uso alternativo a la gran cantidad de desechos de la combustión del carbón mineral.

F. Tolerancia de los cultivos a las sales

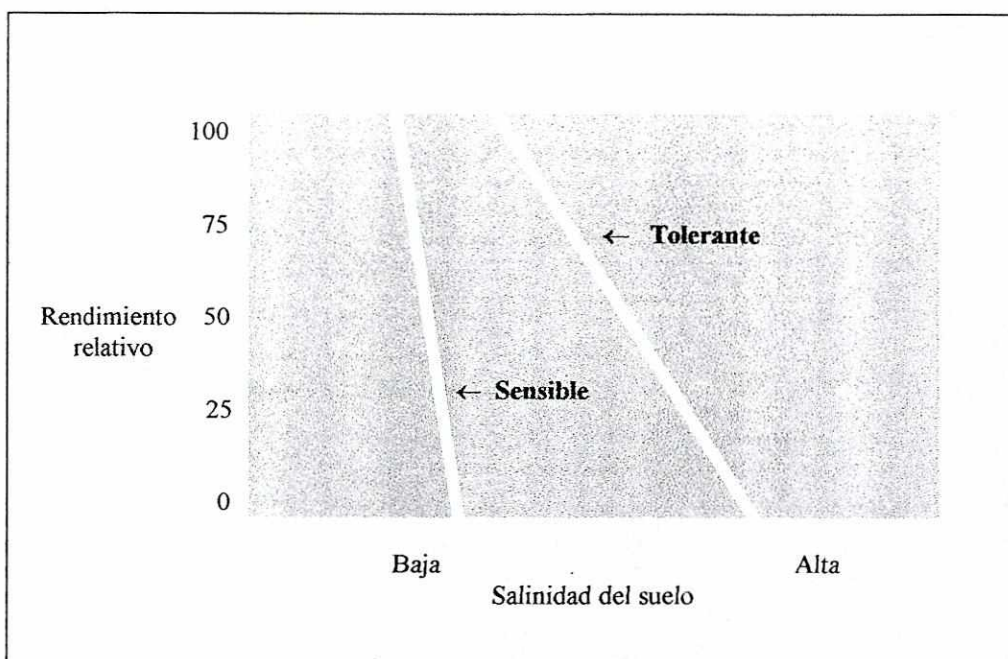
Debido al alto contenido de sales de la ceniza volante, es necesario determinar su impacto sobre plantas sensitivas a la salinidad del suelo.

Investigaciones bajo condiciones controladas (cuadro 2) indican que los cultivos varían en su respuesta a la presencia de sales, la cual va desde cultivos muy sensitivos a tolerantes. Uno de los cultivos más sensitivos a la presencia de sales es el frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) el cual reduce su producción en un 19 % cuando se cultiva en sitios con una conductividad eléctrica en pasta saturada mayor a 1 dS/m. El cultivo más

tolerante es la cebada, la cual reduce en sólo un 5 % su producción cuando se siembra en un medio con una conductividad eléctrica mayor a los 8 dS/m (Maas, 1984).

El contar con un suelo con bajo nivel de salinidad es importante, ya que como lo indica la figura 5, en presencia de altos contenidos de sales el rendimiento de los cultivos se reduce.

Figura 5. Relación entre el rendimiento relativo de los cultivos y la salinidad del suelo.



Fuente: Maas, 1984

Cuadro 2. Tolerancia de algunos cultivos a las sales

Cultivos	Máxima salinidad del suelo sin disminución del rendimiento (dS/m)	Disminución del rendimiento (% por dS/m)
Sensibles		
Frijol	1.0	19
Zanahoria	1.0	14
Cebolla	1.2	16
Naranja	1.7	16
Durazno	1.7	21
Toronja	1.8	16
Moderadamente sensibles		
Maíz	1.7	12
Papa	1.7	12
Caña de azúcar	1.7	5.9
Repollo	1.8	9.7
Tomate	2.5	9.9
Arroz	3.0	12
Moderadamente tolerantes		
Remolacha roja	4.0	9.0
Zucchini	4.7	9.4
Soya	5.0	20
Trigo	6.0	7.1
Cebada de forraje	6.0	7.1
Sorgo	6.8	16
Tolerantes		
Dátil	4.0	3.6
Gramma bermuda	6.9	6.4
Remolacha azucarera	7.0	5.9
Algodón	7.7	5.2
Cebada	8.0	5.0

Fuente: Maas, 1984

V. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Localización del estudio

Para alcanzar los objetivos del estudio se implementó un experimento bajo condiciones de invernadero. El estudio estuvo localizado en el campus central de la Universidad del Valle de Guatemala en la ciudad capital.

B. Suelo

Se utilizó un suelo ácido obtenido a través del laboratorio comercial "Soluciones Analíticas" (cuadro 3).

C. Planta indicadora

Se utilizó frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) como planta indicadora. Se seleccionó este cultivo porque se considera muy sensitivo a las sales (Maas, 1984). El tipo de frijol utilizado fue ICTA Altense que es una variedad de frijol negro cuyo hábito de crecimiento es de tipo indeterminado arbustivo. Es bastante tolerante a la mancha de la hoja causada por *Ascochyta*, antracnosis (*Colletotrichum lindemuthianum*), roya (*Uromyces phaseoli*) y el picudo de la vaina (*Apion godmani*). Se adapta muy bien a altitudes entre 1800 y 2300 metros sobre el nivel del mar y el ciclo de siembra a cosecha en el campo es de 120 días, con un rendimiento de 2500 kilogramos por hectárea (ICTA-MAGA, 1996).

D. Ceniza volante

La ceniza volante fue obtenida de la planta termoeléctrica San José ubicada en la Costa Sur de Guatemala. Algunas características químicas de dicho material se describen en el cuadro 3.

Cuadro 3. Características químicas del suelo y de la ceniza volante utilizada en el ensayo de invernadero.

Parámetro	Suelo ácido	Ceniza volante
pH	5.4	12.4
Conductividad eléctrica (dS/m)	0.07	9.64
Materia orgánica (%)	2.1	1.7
C.I.C.e (meq/100g suelo)	3.0	41.2
Saturación de potasio (%)	4.8	0.9
Saturación de calcio (%)	47.6	85.4
Saturación de magnesio(%)	13.4	13.7
Saturación de Al + H (%)	34.1	0.0
Nitrato-N (mg/L suelo)	10.9	< 5.0
Fósforo (mg/L suelo)	109.6	147.5
Potasio (mg/L suelo)	55.77	136.6
Calcio (mg/L suelo)	282.1	7035.1
Magnesio (mg/L suelo)	47.7	678.3
Cobre (mg/L suelo)	26.1	3.5
Hierro(mg/L suelo)	161.0	489.8
Manganeso (mg/L suelo)	16.0	12.5
Zinc (mg/L suelo)	1.9	4.2
Aluminio (mg/L suelo)	89.9	<8.0
Clase textural ¹	Areno francosa	Franco limosa

¹ Determinada en la Universidad del Valle de Guatemala.

Fuente: Reporte del análisis de suelo (Soluciones Analíticas).

E. Plan experimental

Los tratamientos a evaluar incluyeron las aplicaciones de 0, 0.2428, 2.428, 8.01, 16.02, 24.28, 242.8 y 500 toneladas de ceniza volante por hectárea. Para cada tratamiento se triplicó la evaluación y se utilizaron 500 g de suelo seco a los cuales se les adicionó la cantidad apropiada de ceniza (cuadro 4).

Para este experimento se utilizó un diseño completamente al azar. El modelo estadístico se define a continuación:

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

En donde:

Y_{ij} = observación j -ésima del i -ésimo tratamiento

μ = media general

T_i = el efecto del i -ésimo tratamiento

ϵ_{ij} = el efecto aleatorio de la ij -ésima observación

Cuadro 4. Tratamientos y cantidad de ceniza volante utilizada en el experimento de invernadero.

Tratamientos t de ceniza volante / Ha	g ceniza volante / 500 g suelo de suelo seco
0	0
0.2428	0.067
2.428	0.607
8.01	2.00
16.02	4.01
24.28	6.07
242.8	60.7
500.0	125

La mezcla de ceniza volante y suelo fue humedecida hasta alcanzar un nivel aproximado a la capacidad de campo, que es la cantidad máxima de agua que el suelo puede retener en contra de la gravedad. Posteriormente, los tratamientos fueron incubados por 4.5 meses en bolsas plásticas agujereadas. Durante el tiempo de incubación, el suelo fue mantenido húmedo mediante reposición del agua perdida. Los ajustes de agua se realizaron cada dos semanas por pérdida de peso.

F. Manejo de las muestras de suelo

Previo a la siembra de las plantas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) se tomó una muestra de 100 g de suelo de cada una de las tres réplicas de los tratamientos preparados. Se tomó la repetición 1 y 2 y la tercera fue repartida entre las dos anteriores para hacer un total de dos muestras compuestas, que se colocaron en bolsas de plástico con su respectivo código de identificación. Ambas muestras fueron llevadas a un laboratorio comercial para el análisis de los parámetros físicos y químicos establecidos en el cuadro 5. El análisis de textura se realizó en la Universidad del Valle de Guatemala.

El suelo restante fue transferido a macetas plásticas con un volumen de 450 cm³. Cada maceta fue identificada con su respectivo nombre de tratamiento y el número de repetición.

G. Manejo de las plantas en el invernadero

En cada maceta se sembraron 3 semillas de frijol ICTA Altense y se agregó agua desmineralizada hasta alcanzar una humedad adecuada para su germinación. Se tomaron datos del número de plantas germinadas por unidad experimental y se calculó el porcentaje de emergencia de cada tratamiento. Ocho después de la germinación de las semillas se realizó el raleo y se dejó una planta por maceta.

En las macetas se colocaron varas de bambú como soporte para el crecimiento de las plantas de frijol. Las plantas fueron regadas con agua desmineralizada (40 - 60 ml por riego) tres veces por semana con la misma cantidad de agua para todos los tratamientos.

Como parte de la fertilización se aplicó al suelo nitrógeno, potasio y calcio mediante el uso de nitrato de calcio (15 % N y 48 % Ca) y muriato de potasio (60 % K₂O). Se agregó el equivalente de 75, 30 y 113 kg/Ha de N, K y Ca respectivamente.

La primera fertilización se realizó a los 13 días después de la siembra con la aplicación de 60 kg/Ha de N, 30 kg/Ha de K y 90 kg/Ha de Ca. La segunda fertilización

se realizó 20 días después de la primera fertilización con la aplicación de 15 kg/Ha de N y 23 kg/Ha de calcio.

El control de plagas de insectos se efectuó por medio de la aplicación de Metasistox (profenofos y cipermetrina) en una concentración de 0.75 ml del insecticida en 750 ml de agua desmineralizada. El control de hongos se realizó con la aplicación de Bavistín (carbendazin 50 %) con base a las recomendaciones de la etiqueta del fungicida (0.5 L/Ha). Las aplicaciones de ambos productos se realizaron por medio de roceadores plásticos.

H. Recolección y manejo de las muestras foliares y de raíces

Las plantas de frijol fueron cosechadas 45 días después de la siembra, cuando la mayoría de las plantas tenía un botón floral. Se cortó cada planta desde la base del suelo y fue colocada en una bolsa de papel previamente identificada con los datos del tratamiento colectado y número de repetición.

Se tomó el peso fresco de cada planta en una balanza analítica (Fisher Scientific Isotemp 500 series). Las muestras fueron colocadas en un horno (Denver Instrument M-12) a una temperatura de 65°C hasta alcanzar un peso constante. Transcurrido el tiempo de secado de las plantas se pesaron para determinar su peso seco.

Las muestras secas fueron trituradas en una licuadora Oster y transferidas a bolsas plásticas de 4 onzas, bien identificadas. De las tres repeticiones de cada tratamiento se tomaron las dos muestras que presentaron mayores pesos secos de material vegetal y la repetición con menor peso fue repartida entre las dos anteriores para así obtener dos muestras compuestas. Las muestras compuestas fueron enviadas a un laboratorio comercial para el análisis foliar.

Después de la cosecha, las raíces fueron dejadas durante una semana en sus respectivas macetas. Transcurrida la semana, el suelo fue vaciado en bolsas plásticas y se separó la mayor cantidad posible de material radicular de cada tratamiento.

Las raíces fueron lavadas rápidamente con agua de chorro y luego colocadas en bolsas de papel con su respectivo código de identificación de tratamiento y número de repetición. El material fue secado en un horno (Fisher Scientific Isotemp 500 series) a 65°C hasta alcanzar peso constante. Por último se tomó el peso seco de cada raíz.

I. Análisis

1. Análisis de algunos parámetros físicos y químicos del suelo

El análisis químico se realizó en un laboratorio comercial e incluyó los parámetros de pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico efectiva, saturación de potasio, magnesio, calcio y aluminio + hidrógeno, nitrógeno, fósforo, potasio, calcio magnesio, boro, cobre, hierro manganeso, zinc y aluminio (cuadro 5).

El análisis de textura de las muestras de suelo se realizó en la Universidad del Valle de Guatemala. Se utilizó el Método del Hidrómetro propuesto por Doran y Jones (1996).

Cuadro 5. Metodología utilizada para el análisis de suelo

Parámetro	Metodología
pH, Conductividad eléctrica y N-NO ₃	Extracción con agua, relación 2:1. Determinación potenciométrica para pH y NO ₃ y conductométrica para la C.E.
Materia orgánica	Oxidación de dicromato de potasio y determinación por volumetría redox. Método Wakley-Black
K,Ca, Mg, Cu, Fe, Mn, Zn	Extracción con solución Melich III, relación 1:10 y determinación por espectrofotometría de emisión atómica (ICP).
P	Extracción con solución Melich III, relación 1:10 y determinación por espectrofotometría visible.
Al	Extracción de cloruro de potasio 1 M, relación 1:10. Determinación por volumetría de neutralización.
B	Extracción con fosfato de calcio 0.01035 M, relación 1:10. Determinación por absorción en espectrofotometría visible.
Clase textural ¹	Método del hidrómetro

¹Determinada en la Universidad del Valle de Guatemala

Fuente: Soluciones Analíticas con base a Handbook of Reference Methods for Soil Testing (1996).

2. Análisis químico de biomasa

Las muestras compuestas fueron enviadas a un laboratorio comercial en donde se realizó el análisis de composición química de la biomasa de las plantas. El análisis consistió en la determinación de fósforo, potasio, calcio magnesio, cobre, hierro manganeso, zinc y boro.

El boro fue determinado a partir de una disolución de cenizas con ácido clorhídrico 6 N por absorción en espectrofotometría visible. El resto de los elementos se determinó en una disolución de cenizas con ácido clorhídrico 6 N por espectrofotometría de emisión atómica en plasma (ICP). La metodología utilizada se basó en la literatura propuesta por Isaac y Jonson (1984).

3. Análisis estadístico

El análisis estadístico se llevó a cabo mediante el uso del paquete MSTAT (MSTAT, 1988). Se realizó un análisis de varianza de las diferentes variables de respuesta. Se utilizó Tuckey como prueba de comparación múltiple de medias para determinar el mejor tratamiento de ceniza volante de los parámetros establecidos con un nivel de significancia ≤ 0.05 .

VI. RESULTADOS

1. Impacto sobre el suelo

Los resultados del análisis de suelo se presentan en los cuadros 6 y 7 y los análisis de varianza se muestran en los cuadros A5 y A6 del anexo. Los cuadros 6 y 7 muestran el valor promedio de los parámetros químicos cuantificados y la comparación múltiple de medias.

No se encontró diferencia significativa entre tratamientos para el contenido de materia orgánica, saturación de magnesio y la cantidad disponible de fósforo y cobre. El resto de las variables cuantificadas (pH, conductividad eléctrica (CE), capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICe), saturación de potasio, calcio y acidez intercambiable (Al+H), así como la disponibilidad de nitrógeno, potasio, calcio, magnesio, boro, hierro, manganeso, zinc y aluminio) presentaron diferencia estadística.

Para los parámetros de pH, CE, CICe, potasio, calcio y magnesio, los tratamientos que presentaron los resultados más altos fueron los de 242.8 y 500 toneladas de ceniza volante/Ha. La saturación de potasio fue más alta para los tratamientos de 0 y 0.2428 toneladas de ceniza volante/Ha mientras que para la saturación de calcio fueron los tratamientos con 242.8 y 500 t/Ha. La tendencia de la saturación de potasio fue a disminuir con el incremento en la cantidad de ceniza volante aplicada, mientras que la saturación de calcio aumentó.

La disponibilidad de nutrientes incrementó significativamente con la aplicación de ceniza volante para los elementos de nitrógeno, boro, hierro y zinc. Los niveles más altos se obtuvieron con aplicaciones a partir de 242.8 toneladas de ceniza volante/Ha. Excepto por el nivel de 500 toneladas de ceniza volante/Ha, la disponibilidad de manganeso tendió a disminuir con la aplicación de ceniza volante. El nivel más alto de manganeso se obtuvo con el control y la aplicación de 0.2428 y 2.428 t de ceniza/Ha.

Se observó una disminución dramática en el contenido de aluminio para los tratamientos de 242.8 y 500 t/Ha, mientras que el nivel de aluminio en los otros tratamientos fue similar. La saturación de Al+H fue mayor para el tratamiento control y disminuyó a medida que aumentaron las cantidades aplicadas de ceniza volante. En los tratamientos de 242.8 y 500 t/Ha la acidez intercambiable llegó a niveles de 0.

El cuadro 7 muestra los valores promedio de las proporciones de arena, limo y arcilla de cada tratamiento evaluado. Se encontró diferencia significativa entre tratamientos para los contenidos de arcilla, limo y arena. La aplicación a partir de 242.8 toneladas de ceniza volante/Ha incrementó significativamente el contenido de limo y redujo el contenido de arena. Sin embargo, no se modificó la clase textural del suelo (areno francosa) para ninguno de los tratamientos.

2. Impacto sobre la composición de la biomasa

Los resultados del análisis químico de biomasa se presentan en el cuadro 8. El cuadro muestra el valor promedio de cada variable, así como la comparación múltiple de medias. El análisis de varianza para los parámetros cuatificados se muestra en el cuadro A7 del anexo.

No se encontró diferencia estadística significativa para la concentración de los elementos potasio, cobre, hierro y zinc. El resto de las variables (fósforo, calcio, magnesio, boro y manganeso) presentaron diferencia estadística entre tratamientos.

La concentración de fósforo en la planta incrementó a medida que aumentaron las cantidades de ceniza volante utilizada. El tratamiento que presentó mayor concentración de fósforo fue el de 500 t/Ha el cual fue estadísticamente superior al resto. Los tratamientos de 0, 0.2428 y 2.428 t/Ha fueron estadísticamente iguales y presentan los menores valores de fósforo.

La absorción y acumulación de calcio no siguió un patrón definido, excepto por la aplicación de 24.28 t/Ha, el nivel de calcio en el resto de los tratamientos evaluados fue similar al control.

La absorción y acumulación de magnesio tampoco siguió un patrón definido. Los tratamientos que reportan la concentración más alta de magnesio fueron los de aplicación de 2.428 y 24.28 t CV/Ha.

La aplicación de ceniza volante incrementó la concentración de boro en la planta. La concentración más alta fue encontrada en el tratamiento de 24.28 t/Ha siendo superior al resto, seguido por el de 16.02 t/Ha, 500 t/Ha, 8.01 y 242.8 que son estadísticamente iguales. El contenido de boro con la aplicación de 2.428 y 0.2428 t/Ha fue similar al control.

Aparentemente la absorción y acumulación de manganeso disminuyó con la aplicación de ceniza volante. La concentración más baja de manganeso se obtuvo con las adiciones de 242.8 y 500 t ceniza volante/Ha.

3. Impacto sobre la germinación y producción de biomasa

La germinación y emergencia de las plántulas de frijol común fue de 100 % para todos los tratamientos (cuadro 9). La germinación/emergencia del tratamiento de 500 t/Ha de CV se retrasó aproximadamente 3 días.

En el cuadro 9 se muestran los resultados promedio obtenidos para la germinación y producción de biomasa mientras que en el cuadro A8 se presenta la comparación múltiple de medias.

La producción de biomasa foliar y de raíces se incrementó con la aplicación hasta de 16.01 t ceniza volante/Ha. Las aplicaciones de ceniza volante por encima de ese valor

redujeron significativamente el crecimiento y desarrollo de las plantas. La producción de la biomasa total seca siguió el mismo comportamiento.

Las plantas de frijol de los tratamientos de 8.01, 16.02, 24.28, 242.8 y 500 t de ceniza volante/Ha presentaron síntomas de toxicidad debido al efecto de las sales en el suelo, como resultado del incremento de las aplicaciones de ceniza volante. Se observó la aparición de manchas cloróticas y necróticas que comenzaron de las puntas y los bordes hacia el interior en las hojas más viejas (hojas primarias). En los casos más severos, los síntomas de toxicidad se extendieron también a las hojas nuevas.

Las plantas de los tratamientos de 24.28, 242.8 y 500 t de ceniza volante/Ha también presentaron una disminución en el tamaño de las hojas sanas y enfermas, así como defoliación temprana de aquellas con síntomas de toxicidad (figuras A1 y A2).

Cuadro 6. Efecto de la aplicación de ceniza volante sobre algunos parámetros químicos del suelo. Guatemala, 2001.

Ceniza volante t/Ha	pH	Conductividad eléctrica dS/m	MO ¹ %	CICe ¹ meq/100g	Saturación %						NO ₃ -N mg/L suelo	
					K	Ca	Mg	Al+H				
0	5.2	0.19	1.90	1.90	5.05	48.90	21.65	24.45	24.45	A	25.85	D
0.2428	5.25	0.18	2.15	1.95	5.25	49.90	24.25	20.60	20.60	A	37.80	BC
2.428	5.30	0.22	1.95	2.05	4.85	51.90	24.45	17.80	17.80	A	44.75	AB
8.01	5.45	0.18	2.00	2.05	4.80	51.95	24.80	18.45	18.45	A	28.75	D
16.02	5.45	0.18	2.10	2.10	4.75	55.05	25.95	14.20	14.20	A	30.65	CD
24.28	5.40	0.24	2.10	2.85	4.15	59.75	25.40	10.70	10.70	A	50.85	A
242.8	6.65	0.58	2.20	8.60	2.20	70.60	27.25	0.00	0.00	D	52.00	A
500	7.50	0.77	2.0	12.20	1.85	70.80	25.75	0.00	0.00	D	51.30	A
C.V. ¹ (%)	0.87	7.30	12.79	6.61	5.50	3.16	7.19	18.48	18.48		5.27	

Ceniza volante t/Ha	mg/L suelo										
	P	K	Ca	Mg	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Al	
0	120.55	74.7	185.9	49.30	2.20	23.70	193.20	35.7	1.45	41.40	A
0.2428	118.35	78.7	192.2	46.00	2.35	23.50	174.05	34.2	1.25	35.10	A
2.428	121.65	79.3	216.0	63.80	2.35	22.20	171.80	33.3	1.40	32.40	A
8.01	121.25	78.2	216.9	62.00	2.50	22.85	167.55	32.0	1.25	34.20	A
16.02	116.50	79.0	233.2	65.85	2.80	23.80	178.65	32.5	1.50	27.00	A
24.28	120.90	92.3	339.4	86.55	3.00	23.45	164.45	30.6	1.55	27.00	A
242.8	116.15	146.1	1214.0	281.3	25.50	23.80	201.70	19.6	4.46	0.00	B
500	114.70	173.5	1728.1	379.0	21.65	22.50	334.45	36.1	6.00	0.00	B
C.V. ¹ (%)	2.76	10.08	3.50	20.29	22.18	4.21	8.32	2.80	14.06	15.61	

1 = Abreviaturas: MO : Materia orgánica CICe : Capacidad de intercambio catiónico efectiva C.V. : Coeficiente de variación

2 = Tratamientos con la misma letra son estadísticamente iguales (p<0.05)

Cuadro 7. Efecto de la aplicación de ceniza volante sobre la textura del suelo. Guatemala, 2001.

Ceniza volante t/Ha	%			Clase textural
	Arena	Limo	Arcilla	
0	85.50 A	10.50 B	4.00 B	Areno francosa
0.2428	82.00 B ²	9.50 BC	8.50 A	Areno francosa
2.428	82.50 AB	9.00 BC	8.50 A	Areno francosa
8.01	81.50 B	9.75 BC	8.75 A	Areno francosa
16.02	82.00 B	8.00 BC	10.00 A	Areno francosa
24.28	82.00 B	7.00 C	11.00 A	Areno francosa
242.8	75.00 C	15.50 A	9.50 A	Areno francosa
500	72.00 C	18.00 A	10.00 A	Areno francosa
C.V. ¹ (%)	1.03	7.69	7.67	

1 = C.V. : Coeficiente de variación

2 = Tratamientos con la misma letra son estadísticamente iguales ($p < 0.05$)

Cuadro 8. Efecto de la aplicación de ceniza volante sobre algunos parámetros de composición química de la biomasa en frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.). Guatemala, 2001.

Ceniza volante t/Ha	%						mg/Kg materia seca											
	P	K	Ca	Mg	B		Cu	Fe	Mn	Zn								
0	0.075	E ²	1.55	A	1.50	ABC	0.375	ABC	15.00	CD	90.70	A	101.75	A	42.30	AB	120.0	A
0.2428	0.070	E	1.50	A	1.95	AB	0.430	AB	11.40	D	29.45	A	91.25	A	41.15	AB	35.65	A
2.428	0.075	E	1.45	A	1.85	AB	0.445	A	19.85	CD	69.45	A	106.20	A	41.95	AB	32.50	A
8.01	0.095	C	1.70	A	1.05	AB	0.285	CD	33.48	BCD	12.00	A	79.40	A	42.05	AB	32.95	A
16.02	0.100	C	1.60	A	1.15	ABC	0.295	CD	63.20	B	14.46	A	88.75	A	42.60	A	29.45	A
24.28	0.090	D	1.80	A	2.05	A	0.465	A	101.5	A	156.3	A	94.10	A	39.75	AB	31.55	A
242.8	0.105	B	1.30	A	0.80	C	0.240	D	35.55	BCD	102.6	A	60.15	A	12.05	C	13.20	A
500	0.185	A	2.10	A	1.60	ABC	0.305	BCD	45.85	BC	177.5	A	110.20	A	18.75	BC	18.80	A
C.V. ¹ (%)	13.55		18.07		16.82		10.86		20.72		67.33		13.80		17.12		92.32	

1= C.V. : Coeficiente de variación

2 = Tratamientos con la misma letra son estadísticamente iguales ($p < 0.05$)

Cuadro 9. Efecto de la aplicación de ceniza volante sobre la germinación y producción de biomasa de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.). Guatemala, 2001.

Ceniza volante t/Ha	Germinación %	g/planta						Presencia de síntomas de toxicidad		
		Producción de biomasa foliar fresca	Producción de biomasa foliar seca	Producción de biomasa de raíces seca	Producción de biomasa total seca					
0	100	4.58	AB ¹	1.02	AB	0.40	ABC	1.42	AB	-
0.2428	100	4.84	AB	1.07	AB	0.40	ABC	1.47	AB	-
2.428	100	5.79	AB	1.19	AB	0.38	BC	1.57	AB	-
8.01	100	6.11	AB	1.35	AB	0.56	AB	1.91	A	+
16.02	100	6.37	A	1.37	A	0.60	A	1.97	A	++
24.28	100	3.79	BC	0.78	BC	0.25	CD	1.03	BC	++
242.8	100	1.63	C	0.27	C	0.09	D	0.36	C	+++
500	100	1.73	C	0.27	C	0.08	D	0.35	C	+++
C.V ¹ (%)	0	18.94		22.38		23.37		20.05		

1 = C.V. : Coeficiente de variación

2 = Tratamientos con la misma letra son estadísticamente iguales ($p < 0.05$)

3 = Severidad de los síntomas: - sin síntomas, + síntomas muy ligeros, ++ = síntomas moderados y +++ = síntomas severos

VII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Impacto sobre el suelo

El incremento obtenido en el pH del suelo es el resultado de la naturaleza alcalina del material aplicado (pH=12.4). Alcanzar un pH cercano a la neutralidad en el suelo ácido utilizado requiere de por lo menos 242.8 t ceniza volante/Ha. Esto sería una práctica antieconómica no sólo por el costo del material, sino también por los costos de transporte y mano de obra para la aplicación.

La neutralización del Al^{3+} con 24.28 t de CV/Ha incrementó ligeramente el pH del suelo. Esto dio como consecuencia la reducción de la acidez intercambiable en un 50 % para alcanzar un valor de 10.7 %, el cual puede ser tolerado por plantas sensitivas al aluminio. Los resultados de pH y saturación de acidez intercambiable sugieren que la ceniza volante puede ser una opción para la corrección de suelos ácidos. Esto concuerda con lo reportado por Salé et. al. (1996), Adriano y Weber (2001) y Vance (1996).

Los cambios de pH del suelo influenciaron directamente otros factores analizados, como la CICE, disponibilidad de nitrógeno y los microelementos Fe y Mn. El incremento en la CICE observada con el aumento de pH fue debido a la presencia de cargas variables en el suelo. Esto concuerda con lo reportado por Kumar et. al. (2000) quienes mencionan que la aplicación de ceniza modifica estas propiedades químicas en los suelos.

Kumar et. al (2000) mencionan que la ceniza volante puede aportar todos los elementos presentes en la corteza terrestre con excepción de nitrógeno y carbono orgánico. Esta afirmación junto con el análisis químico realizado al material original (cuadro 3) sugiere que la ceniza utilizada no aportó nitrógeno al suelo y que el aumento se debió a la corrección de la acidez. En este experimento la tendencia del nitrógeno en el suelo fue aumentar con las aplicaciones de ceniza volante. La corrección de la acidez intercambiable con 24.28 t de CV/Ha duplicó la concentración de NO_3-N presente en el

suelo sin tratar (25.85 mg/L). Esto puede ser el resultado en el incremento de la mineralización y nitrificación con el aumento del pH. De acuerdo con Tisdale et. al. (1993), las condiciones óptimas para el proceso de nitrificación están alrededor de un pH de 8.5. Al aumentar el pH del suelo por el efecto de las aplicaciones de ceniza volante se crearon condiciones más adecuadas para que las bacterias que efectúan procesos de amonificación y nitrificación favorecieran su actividad y proporcionaran de esta forma mayor cantidad de $\text{NO}_3\text{-N}$ al suelo.

Uno de los aspectos negativos observados por el incremento del pH del suelo es la tendencia a reducir la disponibilidad de los micronutrientes Fe y Mn. Gangloff et. al. (1997) indican que los aumentos en el pH debido a la aplicación de ceniza volante reducen la solubilidad de los metales en la solución del suelo.

El incremento de Fe, Mn y Zn a partir de la aplicación de 242.8 y/o 500 t/Ha puede ser el resultado de las altas concentraciones de estos elementos en la ceniza volante que se agregó al suelo. Como se ilustra en el cuadro 3, el contenido de Fe y Zn disponible en la ceniza es mayor que el del suelo utilizado. Sin embargo, el aumento en el pH por efecto de la aplicación de la ceniza como enmienda muestra generalmente disminución en la disponibilidad de Zn, Cu, Fe y Ni (Sale et. al. 1996).

La ceniza volante también aportó cantidades altas de calcio, potasio y magnesio. Esto puede promover una recuperación de las bases del suelo (Ca, K, Mg y Na) lo cual es positivo en suelos fuertemente ácidos en donde el porcentaje de saturación de bases es bajo. El aumento en las concentraciones de potasio, calcio y magnesio observado con la aplicación de altas dosis de ceniza volante se debe principalmente a la naturaleza del material (cuadro 3). Esto concuerda con los reportes de Vance (1996) quien menciona que la ceniza volante puede aportar considerables cantidades de calcio y potasio al suelo. El elemento que aportó la ceniza volante en mayor proporción en relación con el control fue el calcio, lo cual incidió en un incremento del porcentaje de saturación de calcio al suelo. El exceso de calcio en el suelo redujo el porcentaje de saturación del potasio en el complejo de intercambio.

Otro de los aspectos negativos de la aplicación de ceniza volante es el incremento en la salinidad del suelo. Esto está directamente relacionado con la naturaleza de la ceniza volante la cual presenta una conductividad eléctrica muy elevada (9.64 dS/m). A pesar de ello, ninguno de los tratamientos presentó un nivel de salinidad arriba del adecuado (0.2 - 0.8 dS/m) para la mayor parte de cultivos.

Para la determinación de la salinidad del suelo se utilizó una suspensión agua:suelo de 2:1 (v/p), respectivamente. Según Maas (1984), el valor máximo de salinidad en pasta saturada sin que exista disminución en el rendimiento de frijol común es de 1 dS/m. Los valores de CE encontrados en las suspensiones de suelo con las cantidades más altas de ceniza están muy cercanos al límite de los mismos en pasta saturada. Esto sugiere que varios de esos tratamientos pueden estar arriba del límite considerado como inofensivo para el frijol común.

No existió cambio en la textura del suelo, pero si en las proporciones de las partículas de arena, arcilla y limo. Esto sugiere posibles modificaciones en la textura a medida que se incorpore más material al suelo. Estos cambios concuerdan con lo reportado por Kumar et. al. (2000) quienes indican que las adiciones de ceniza volante pueden alterar la textura de suelos arenosos y arcillosos a limosos. La fracción más grande de la ceniza volante producida en nuestro medio también es el limo (cuadro 7).

Estudios previos indican que las aplicaciones de ceniza volante no sólo modifican la textura del suelo, sino que también incrementan su capacidad de retención de agua (Adriano y Weber, 2001, Gangloff et. al., 1997 y Vance, 1996). En este experimento no se midió la capacidad de retención de agua de los tratamientos, pero si se observó que la percolación fue más lenta y la retención hídrica fue mayor para los tratamientos de 242.8 y 500 t/Ha. Este factor se debe principalmente a que las partículas de ceniza volante poseen un área superficial grande debido a su tamaño y forma esférica. Esto de alguna forma incrementa la microporosidad del suelo lo que conduce a una mejor retención de agua (Adriano y Weber, 2001). Estudios previos mencionan también que plantas que son

sembradas en lugares en donde se ha aplicado ceniza volante al suelo soportan mejor el estrés hídrico en comparación con los controles utilizados (Adriano y Weber, 2001).

La adición de ceniza volante puede ser importante si se desea mejorar la retención de la humedad en el suelo. Esto puede ser beneficioso especialmente para suelos de texturas gruesas en lugares donde existe una limitada disponibilidad de agua.

Impacto sobre las plantas

La germinación de semillas y emergencia de plántulas de frijol común no fueron afectadas en casi todos los tratamientos evaluados. Únicamente con el tratamiento de 500 t/Ha se produjo un retraso de 3 días en la emergencia de las plántulas, pero no se afectó el porcentaje de germinación de semillas.

Estudios previos realizados con cebada (Salé et. al., 1993) muestran que la emergencia de plántulas se retrasó con la incorporación de 6.25 % de material al suelo (un equivalente a 125 t de CV/Ha) y a partir de aplicaciones de 12.5 % (250 t de CV/Ha) se produjo una disminución en la emergencia. Se reporta además que los retrasos y reducciones en la emergencia de las plántulas resultan de las concentraciones excesivas de boro. Esto contrasta con los resultados obtenidos con frijol común en donde inclusive la aplicación de 242.8 t/Ha no afectó la germinación y la emergencia de las plántulas. Estos resultados indican que aún cuando el frijol común es un cultivo sensitivo al incremento en la salinidad del suelo, con las altas concentraciones de ceniza volante aplicadas (242.8 y 500 t/Ha) no se produjeron concentraciones de sales lo suficientemente altas para inhibir la germinación y emergencia de las plántulas.

Las plantas mostraron síntomas de toxicidad a partir de la aplicación de 8.01 t ceniza volante/Ha. Los mismos se caracterizaron por bordes cloróticos y necróticos en el primer par de hojas verdaderas que se fueron extendiendo hacia el interior de las hojas y hacia las hojas más jóvenes en la planta (figuras A1 y A2). La CE de dicho tratamiento fue igual al valor de la CE del control, por lo que se considera que los síntomas de

toxicidad estuvieron asociados a otros factores. Al comparar el extracto de saturación del suelo que recibió el 25 % (500 t/Ha) de ceniza volante con el suelo sin tratar (cuadro A9), se observa que la concentración del boro en el suelo es extremadamente alta. La descripción de los síntomas de toxicidad por boro reportados en la literatura coincide con aquellos presentados por las plantas de frijol de este estudio. Esto hace suponer que los síntomas de toxicidad son el resultado del incremento de boro en el suelo.

Schwartz y Gálvez (1980) indican que los síntomas de toxicidad por boro en plantas de frijol aparecen cuando las concentraciones en el suelo son superiores a 5 ppm. Todos los tratamientos evaluados con excepción de 242.8 y 500 t/Ha presentaron niveles de boro menores a ese valor. A pesar de ello, se observaron síntomas de toxicidad en las plantas al aplicar 8.01 t ceniza/Ha. Esto aparentemente es consecuencia del tipo de suelo y la solución extractora utilizada.

Salé et. al. (1996) indican que los factores más significativos que limitan el establecimiento de plantas con aplicaciones de ceniza volante son las excesivas concentraciones de sales solubles y boro. Por lo tanto, el uso de este material deberá ser dirigido a plantas tolerantes a sales, particularmente boro, ya que aun cuando se neutralice únicamente la acidez intercambiable se generan problemas de toxicidad en plantas sensitivas a ese elemento

La biomasa total seca fue mayor con la aplicación de 8.01 y 16.02 t/Ha. Estos tratamientos presentan un aumento del rendimiento de 34 y 39 % respecto al control. A pesar de estos resultados, dichos tratamientos mostraron síntomas de toxicidad por boro. El alto peso reportado se debe principalmente a que las condiciones del suelo fueron mejoradas para la absorción de la mayor parte de elementos y que la concentración de boro absorbida no fue lo suficientemente alta para inhibir el crecimiento y desarrollo de las plantas.

La disminución de la producción de las plantas de frijol en los tratamientos de 24.28, 242.8 y 500 t/Ha está relacionada directamente con las lesiones foliares producidas

por efectos de toxicidad de boro. La reducción del rendimiento de biomasa de frijol está asociada directamente con la disminución del área fotosintética, lo cual causa la menor producción de carbohidratos dentro de la planta y consecuentemente menor energía disponible para la producción tanto de biomasa foliar como de raíces.

Salé et. al. (1996) mencionan que al aplicar un 30 % en peso de ceniza volante al suelo existe una disminución de rendimiento en un 48 % para ejote francés (*Phaseolus vulgaris* L.). En este estudio se obtuvo una reducción del peso seco total para el tratamiento de 24.28 t de CV/ha de 28 % y de un 75 % para los de aplicaciones de 242.8 y 500 t de CV/ha respecto al control, lo cual indica que la variedad de frijol común que se utilizó es más sensible a la presencia de boro que el ejote francés. A partir de las aplicaciones de 242.3 t de CV/ha (12.1 %), los valores de rendimiento encontrados parecen seguir un patrón constante.

La aplicación de ceniza volante influyó sobre la absorción y acumulación de P, Ca, Mg y Mn en las plantas. A pesar de que no se determinó diferencia significativa entre las concentraciones de P en el suelo, si se observó un incremento en la concentración de este elemento en las plantas. Las aplicaciones de 242.8 y 500 t/ha de ceniza volante aumentaron en un 40 y 146 % el contenido de P en las plantas con respecto al control.

La absorción/acumulación de Ca y Mg no siguió un patrón definido, por lo que su interpretación es difícil. Con base en el incremento en el porcentaje de saturación de Ca, Mg y K, así como en la cantidad disponible de dichos elementos en el suelo, se esperaba un incremento en la cantidad de Ca y Mg absorbidos por las plantas y posiblemente la disminución en la absorción de K. Aparentemente, la reducción en la saturación de K en el suelo no tuvo efecto sobre la absorción de este elemento por las plantas, ya que el nivel disponible en el suelo fue adecuado.

La tendencia del Mn fue a disminuir a partir del tratamiento de 24.28 t/ha. Este hecho está asociado a que la disponibilidad de este elemento en el suelo se ve reducido por aumentos en el pH (Fassbender y Bornemisza, 1987). Como lo muestran los

resultados del análisis de suelo (cuadro 6), la concentración de Mn en los tratamientos de 24 y 242.8 t/Ha fueron menores que el resto.

Se considera que la cantidad de ceniza volante que optimiza la producción de biomasa total en plantas de frijol sin que existan efectos adversos por sales o boro está dentro del rango de 2.428 y 8.01 t/Ha. Sin embargo, es necesario realizar un estudio más detallado sobre el efecto que puede producir la aplicación de este material en plantas de frijol a nivel de campo. Los resultados que se obtengan pueden ser diferentes a los realizados en el invernadero, debido a la influencia de otros factores como una mayor lixiviación de nutrientes y un mayor volumen de suelo disponible para el enraizamiento de las plantas.

VIII. CONCLUSIONES

A. Impacto sobre el suelo

1. La aplicación de ceniza volante influyó significativamente sobre los parámetros de suelo: pH, CE, CICE, saturación de K, Ca y Al + H, así como en las cantidades de NO₃-N, K, Ca, Mg, B, Fe, Mn y Zn extractables.
2. La ceniza volante corrigió la acidez del suelo. Sin embargo, esto requirió de la aplicación de por lo menos 242.8 t de ceniza volante/Ha, lo cual es poco práctico y antieconómico.
3. La aplicación de ceniza volante incrementó la disponibilidad de NO₃-N como resultado del aumento en el pH del suelo y de K, Ca, B, Fe y Zn por el efecto de las altas concentraciones de estos elementos encontrados en el material utilizado.
4. La aplicación de ceniza volante aumentó significativamente el nivel de salinidad del suelo.
5. La aplicación de ceniza volante también influyó significativamente sobre las proporciones de arena y arcilla, pero no modificó la clase textural del suelo.

B. Impacto sobre las plantas

1. La germinación de semillas y emergencia de plántulas de frijol común no fueron afectadas significativamente con la aplicación de ceniza volante al suelo.

2. Como resultado de la aplicación de por lo menos 8.01 t de ceniza volante/Ha, las plantas de frijol común manifestaron síntomas de toxicidad, los cuales fueron asociados al incremento de B en el suelo y la alta acumulación de este elemento en las plantas.
3. La aplicación de ceniza volante influyó sobre las concentraciones de P, Ca, Mg, B y Mn absorbido por las plantas. El P y el B aumentaron, el Mn disminuyó y los elementos Ca y Mg no presentaron un patrón definido con la aplicación del material.
4. La aplicación de ceniza volante no influyó en la absorción y acumulación de los elementos K, Cu, Fe y Zn en las plantas.
5. La producción de biomasa de frijol común fue mayor con las aplicaciones de 8.01 y 16.02 t de ceniza volante/Ha.
6. Se determinó que la cantidad de ceniza volante que optimiza la biomasa de frijol común sin que existan síntomas de toxicidad por boro está entre 2.428 y 8.01 t/Ha.

IX. RECOMENDACIONES

Realizar otros estudios con ceniza volante en los que se incluyan distintos tipos de suelos (con diferentes pH y texturas), diversos cultivos (con niveles variables de tolerancia al boro) y niveles de aplicación de ceniza volante (incluso niveles entre el rango de 2.428 a 8.01 t/ha) con el fin de determinar su posible utilización en la agricultura.

X. BIBLIOGRAFÍA

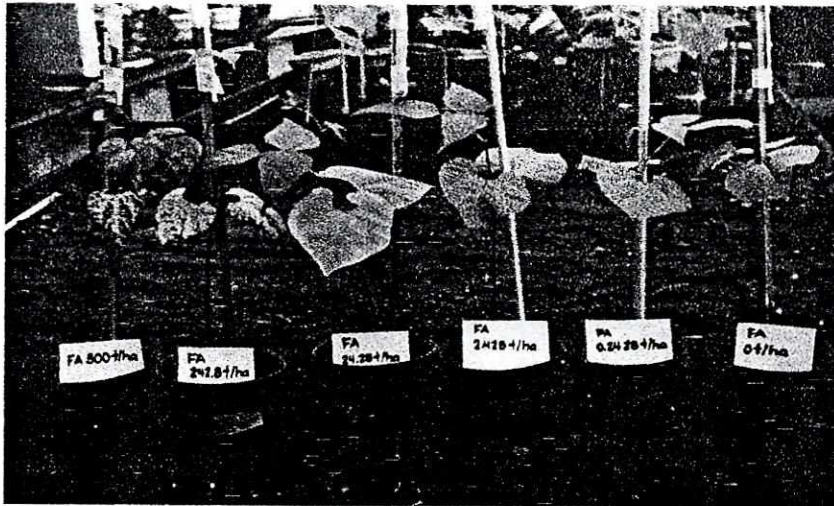
- Adriano, D.C. y J. T. Weber. 2001. «Influence of Fly Ash on Soil Physical Properties and Turfgrass». *Journal of Environmental Quality*. 30:596-601.
- Coal Bottom Ash/Boiler Slag. Material Description*
www.tfhr.gov/hnr20/recycle/waste/cbabs1.htm
- CPM-Other Ashes. Introduction.*
www.cpmash.com/Other_Ash.htm
- Doran, J. W. y A. J. Jones. 1996. *Methods for Assessing Soil Quality*. SSSA Special publication number 49. Madison, Wisconsin. 410 págs.
- Fassbender, H. W. y E. Bornemisza. 1987. *Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina*. IICA. San José, Costa Rica. 420 págs.
- Gangloff, W. J., et al. 1997. «Field influence of fly ash on leachate composition in a excessively drained soil». *Journal of Environmental Quality* 26:714-723.
- Handbook of Reference Methods for Soil Testing. 1996. The Council on Soil Testing Plant Analysis. USA. ____ pp.
- Hoffman, G. K. 1998. Application and competing materials coal combustion byproducts. Western Region Ash Group. www.wrash.org/compmat.htm
- _____; 1998a. Environmental benefits of recycling coal combustion byproducts. Western Region Ash Group. www.wrash.org/environ.htm
- _____; 1998b. Fly ash usage in the Western United States. Western Region Ash Group. www.wrash.org/westuse.htm
- _____; 1998c. What are CCP's. Western Region Ash Group. www.wrash.org/ccps.htm
- ICTA-MAGA. 1996. Dos nuevas variedades de frijol negro para el Altiplano de Guatemala: ICTA Altense e ICTA Hunapú. Publicación Técnica No. 33. Guatemala. 6 págs.

- Isaac, R. y W. Johnson. 1998. *Laboratory manual. Soil, plant and water analysis laboratory*. College of Agricultural and Environmental Sciences. Cooperative Extension Service. University of Georgia. USA. ____ págs.
- Kirk, R. E. y D. F. Othmer. 1961. *Enciclopedia de tecnología química. Tomo III. Bagazo - Caucho*. Unión Tipográfica Editorial Hispanoamericana. México, D. F. 1047 págs.
- Kumar, V., K. A. Zachria y G. Goswami. 2000. *News and views. Fly ash use in agriculture: A perspective*. TIFAC. www.tifac.org.in/news/flyagr.htm
- LaGrega, M.D., et. al. 1996. *Gestión de residuos tóxicos: Tratamiento, eliminación y recuperación. Volume II*. McGraw Hill. México, D. F. 1316 págs.
- Maas, E. V. 1984. «California special issue: Salinity in California- Crop Tolerance». *California Agriculture* 38 (10):20 - 21.
- Misra, A. 2001. *Photo gallery*. Department of Civil Engineering (UMKC). <http://web.missouri.edu/~geosclmr/ebaf/gallery.htm>
- Montgomery, C.W. 1987. *Physical Geology*. C. Brown Publishers. Estados Unidos. 530 págs.
- MSTAT, 1988. *Users Guide Statics Esast Lansing*. Crop and soil science. Michigan. 386 págs.
- Salé, L. Y., et. al. 1996. «Grown response of barley on unweathered fly ash amended soil». *Journal of Environmental Quality* 25: 684 - 691.
- Schwartz, H. F. y G. E. Gálvez. 1980. *Problemas de producción de frijol. Enfermedades, insectos, limitaciones edáficas y climáticas de Phaseolus vulgaris*. Centro Internacional de Agricultura Tropical. Cali, Colombia. 424 págs.
- SEFA Group. How fly ash is collected. www.sefaflyash.com/flyash_collection.htm
- Sparks, D. 1996. *Methods of Soil Analysis Part 3: Chemical Methods*. Soil Science Society of America. Estados Unidos. 1390 págs.
- The Coalification Sequence*. <http://www.powerworks.com.au/pw075coalsequence.htm>

- The Fly Ash Resource Center. 2001. *Coal Combustion Byproducts (CCB's)*
www.geocities.com/CapeCanaveral/Launchpad/2095/flyash.html
- The Fly Ash Resource Center. 2001. *Images*.
www.geocities.com/CapeCanaveral/Launchpad/2095/images.html
- The Fly Ash Resource Center. 2001. *Typical Chemistry of Coal Fly Ash*
www.geocities.com/CapeCanaveral/Launchpad/2095/chemistry.html
- Tisdale, S. L., et. Al.. 1993. *Soil fertility and fertilizers*. 5a. ed. McMillan Publishing Company. New York. 634 págs.
- Vance, E. D. 1996. «Land application of wood-fired and combination boiler ashes: An overview». *Journal of Environmental Quality* 25:937-944.
- Veliz, M. 2001. Compers. Termoeléctrica San José. Teléfono: (502) 889-7701.
- West Virginia University. *Coal ash for reclamation*.
www.wvu.edu/~research/techbriefs/coalashte.chbrief.html
- World Coal Institute. 1999. *Coal-Power for Progress. Versión en Español. ¿Qué es el carbón?* www.wci-coal.com/spanish.htm

XI. APÉNDICE

Figura A1. Efecto de la aplicación de la ceniza volante al suelo sobre la apariencia de las plantas de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.)



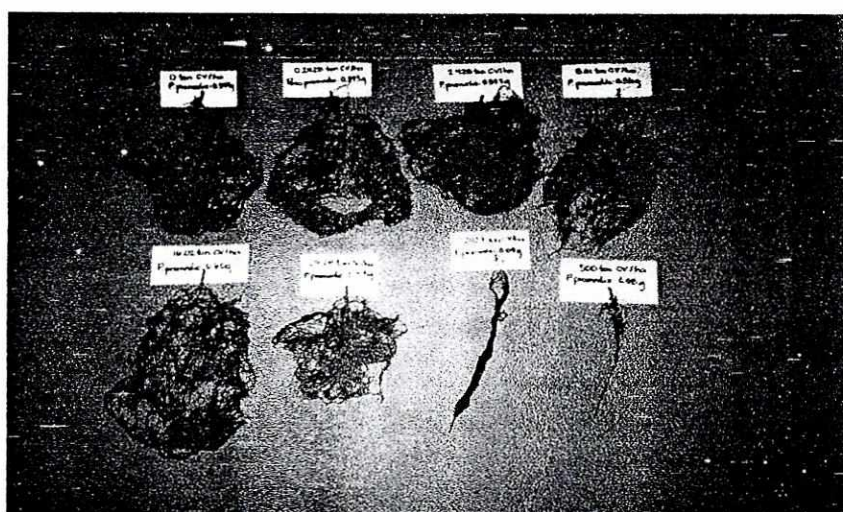
De izquierda a derecha: Tratamientos de 500, 242.8, 24.28, 2.428, 0.2428 y 0 t de CV/Ha

Figura A2. Efecto de la aplicación de la ceniza volante al suelo sobre la apariencia de las plantas de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.)



De izquierda a derecha: Tratamientos de 500, 242.8, 16.02 y 8.01 t de CV/Ha

Figura A3. Efecto de la aplicación de la ceniza volante al suelo sobre el desarrollo de las raíces de las plantas de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.).



Arriba (de izquierda a derecha): Tratamientos de 0, 0.2428, 2.428 y 8.01 t de CV/Ha.
Abajo (de izquierda a derecha): Tratamientos de 16.02, 24.28, 242.8 y 500 t de CV/Ha.

Cuadro A1. Impacto de la aplicación de ceniza volante sobre algunos parámetros químicos del suelo. Guatemala, 2001.

Ceniza volante t/Ha	pH	CE ² dS/m	MO ³ %	CICE ² meq /100g suelo	% de Saturación						mg/L de suelo										
					K	Ca	Mg	Al+H	NO ₃	P	K	Ca	Mg	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Al		
																				Ca	Mg
0 (1)	5.2	0.19	1.6	1.9	5.3	48.7	20.6	25.4	25.3	119.1	39.1	185.8	47.1	2.2	23.6	187.3	35.6	1.3	43.2		
0 (2)	5.2	0.19	2.2	1.9	4.8	49.1	22.7	23.5	26.4	122.0	35.6	185.9	51.5	2.2	23.8	199.1	35.9	1.6	39.6		
0.2428 (1)	5.3	0.19	2.3	2.0	5.1	51.3	25.2	18.4	38.6	116.9	39.3	203.3	59.9	2.3	25.0	173.9	33.7	1.3	32.4		
0.2428 (2)	5.2	0.17	2.0	1.9	5.4	48.5	23.3	22.8	37.0	119.8	39.4	181.0	52.1	2.4	22.0	174.2	34.7	1.2	37.8		
2.428 (1)	5.3	0.22	1.9	2.2	4.9	53.2	27.5	14.4	43.8	125.0	43.3	238.9	74.0	2.4	22.6	174.3	33.6	1.3	28.8		
2.428 (2)	5.3	0.23	2.0	1.9	4.8	50.6	23.4	21.2	45.7	118.3	36.0	193.0	53.6	2.3	21.8	169.3	33.0	1.5	36.0		
8.01 (1)	5.5	0.18	1.9	2.2	5.06	52.4	24.6	18.0	30.0	119.8	43.7	235.1	66.2	2.6	22.8	168.8	31.0	1.2	36.0		
8.01 (2)	5.4	0.17	2.1	1.9	4.6	51.5	25.0	18.9	27.5	122.7	34.5	198.6	57.8	2.4	22.9	166.3	33.0	1.3	32.4		
16.02 (1)	5.4	0.17	2.0	2.2	4.7	53.4	25.3	16.6	28.7	111.7	40.4	234.0	66.4	3.2	23.0	170.1	33.5	1.5	32.4		
16.02 (2)	5.5	0.19	2.2	2.0	4.8	56.7	26.6	11.8	32.6	121.3	38.6	232.4	65.3	2.4	24.6	187.2	31.5	1.5	21.6		
24.28 (1)	5.4	0.24	2.3	2.8	3.9	59.2	25.3	11.6	49.8	119.8	43.0	331.0	85.0	2.9	22.6	164.3	31.0	1.4	28.8		
24.28 (2)	5.4	0.23	1.9	2.9	4.4	60.3	25.5	9.8	51.9	122.0	49.3	347.7	88.1	3.1	24.3	164.6	30.3	1.7	25.2		
242.8 (1)	6.6	0.60	1.9	8.6	2.3	69.9	27.8	0.0	49.8	116.9	75.9	1200.1	286.8	26.6	23.8	203.5	19.0	4.6	< 8		
242.8 (2)	6.7	0.55	2.5	8.6	2.1	71.3	26.7	0.0	54.2	115.4	70.2	1228.4	275.7	24.4	23.8	199.9	20.3	4.3	< 8		
500 (1)	7.5	0.73	1.9	12.7	1.9	68.4	28.2	0.0	49.1	113.9	93.5	1741.5	327.7	24.9	22.3	365.6	36.6	6.6	< 8		
500 (2)	7.5	0.80	2.1	11.7	1.8	73.2	23.3	0.0	53.5	115.5	80.0	1714.7	430.2	18.4	22.7	303.3	35.6	5.4	< 8		

1 = () repetición 1 ó 2

2= Abreviaturas

CE: Conductividad eléctrica

MO: Materia orgánica

CICE:=Capacidad de intercambio catiónico efectiva

Cuadro A2. Impacto de la aplicación de ceniza volante en la textura del suelo. Guatemala, 2001.

Ceniza volante t/Ha	Repetición	%			Clase textural
		Arena	Limo	Arcilla	
0	1	85	11	4	Areno francosa
0	2	86	10	4	Areno francosa
0.2428	1	82	9	9	Areno francosa
0.2428	2	82	10	9	Areno francosa
2.428	1	84	8	8	Areno francosa
2.428	2	81	10	9	Areno francosa
8.01	1	82	9.5	8.5	Areno francosa
8.01	2	81	10	9	Areno francosa
16.02	1	82	8	10	Areno francosa
16.02	2	82	8	10	Areno francosa
24.28	1	82	7	11	Areno francosa
24.28	2	82	7	11	Areno francosa
242.8	1	75	16	9	Areno francosa
242.8	2	75	15	10	Areno francosa
500	1	72	19	9	Areno francosa
500	2	72	17	11	Areno francosa

Cuadro A3. Impacto de la aplicación de ceniza volante sobre la concentración de algunos elementos esenciales en la parte aérea (tallo+hojas) de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.). Guatemala, 2001.

Ceniza volante t/Ha	Repetición	%						mg/Kg de Materia seca					
		P	K	Ca	Mg	B	Cu	Fe	Mn	Zn			
0	1	0.08	1.8	1.6	0.37	16.5	91.3	91.5	47.6	192.3			
0	2	0.07	1.3	1.4	0.38	13.5	90.1	112	37	47.7			
0.2428	1	0.07	1.3	1.8	0.4	8.9	13.9	79.8	36.9	34			
0.2428	2	0.07	1.7	2.1	0.44	13.9	45	102.7	45.47	37.3			
2.428	1	0.07	1.4	1.9	0.45	20.7	38.5	104.5	48.9	33.7			
2.428	2	0.08	1.5	1.8	0.44	19	100	107.9	35	31.3			
8.01	1	0.10	1.5	1.0	0.28	60.0	11.7	88.6	39.2	26.9			
8.01	2	0.10	1.7	1.3	0.31	66.4	17.2	88.9	46.0	30.0			
16.02	1	0.09	1.9	1.1	0.29	32.9	11.2	82.9	46.8	35.9			
16.02	2	0.10	1.5	1.0	0.28	34.0	12.8	75.9	37.3	32.0			
24.28	1	0.09	1.9	2.2	0.5	109.5	97.1	93.8	39.9	31.7			
24.28	2	0.09	1.7	1.9	0.43	93.5	215.5	94.4	39.6	31.4			
242.8	1	0.1	1.6	0.9	0.25	34.7	18.2	51.2	12	14.2			
242.8	2	0.11	1	0.7	0.23	36.4	187	69.1	12.1	12.2			
500	1	0.21	2.4	2	0.37	60	192.5	127.7	22.7	21.5			
500	2	0.16	1.8	1.2	0.24	31.7	162.5	92.7	14.8	16.1			

Cuadro A4. Impacto de la aplicación de ceniza volante sobre la producción de biomasa de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.). Guatemala, 2001.

Ceniza volante t/Ha	Repetición	Germinación %	Biomasa foliar fresca	Biomasa foliar seca	Biomasa seca de raíces	Biomasa seca total
			g/planta			
0	1	100	4.21	1.01	0.38	1.39
0	2	100	5.54	1.31	0.49	1.80
0	3	100	3.98	0.75	0.32	1.07
0.2428	1	100	5.37	1.32	0.42	1.74
0.2428	2	100	3.88	0.82	0.39	1.21
0.2428	3	100	5.28	1.06	0.37	1.43
2.428	1	100	4.66	0.96	0.46	1.42
2.428	2	100	5.71	1.16	0.40	1.56
2.428	3	100	6.99	1.45	0.27	1.72
8.01	1	100	4.97	1.19	0.43	1.62
8.01	2	100	5.98	1.18	0.54	1.72
8.01	3	100	7.39	1.69	0.71	2.40
16.02	1	100	6.67	1.52	0.69	2.21
16.02	2	100	6.93	1.29	0.54	1.83
16.02	3	100	5.51	1.31	0.57	1.88
24.28	1	100	3.58	0.66	0.28	0.94
24.28	2	100	3.80	0.81	0.25	1.06
24.28	3	100	4.00	0.88	0.23	1.11
242.8	1	100	2.06	0.32	0.11	0.43
242.8	2	100	1.09	0.19	0.05	0.24
242.8	3	100	1.75	0.31	0.11	0.42
500	1	100	1.32	0.19	0.04	0.23
500	2	100	2.40	0.42	0.17	0.59
500	3	100	1.48	0.21	0.03	0.24

Cuadro A5. Suma de cuadrados del análisis de varianza efectuado a los parámetros del suelo cuantificados en el estudio de invernadero. Guatemala, 2001.

Fuente de Variación	Grados de libertad	pH	CE ¹	Materia orgánica	CIC ¹ efectiva	Saturación				NO ₃ -N
						K	Ca	Mg	Al+H	
Tratamientos	7	9.850 **	0.713 **	0.150 NS	218.378 **	24.748 **	1106.564 **	37.367 NS	171.460 **	1661.094 **
Error	8	0.020	0.004	0.350	0.620	0.410	26.335	25.970	48.150	35.985
Total	15	9.870	0.717	0.700	218.998	25.158	1132.899	63.338	1219.610	1697.079

Fuente de variación	Grados de libertad	P	K	Ca	Mg	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Al
Error	8	85.965	203.930	2860.026	5603.600	23.915	7.630	2178.666	6.315	0.879	118.260
Total	15	187.779	5216.358	4915033.365	229301.630	1367.929	13.110	46869.013	389.454	47.418	3652.898

1= Abreviaturas: CE= Conductividad eléctrica y CIC= Capacidad de intercambio catiónico

NS: No significativo (p>0.05)

** : Altamente significativo (p<0.01)

Cuadro A6. Suma de cuadrados del análisis de varianza efectuado al análisis de textura del suelo. Guatemala, 2001.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Arena	Limo	Arcilla
Tratamientos	7	277.938 **	204.484 **	62.859 **
Error	8	5.500	5.625	3.625
Total	15	283.438	210.109	66.484

** : Altamente significativo ($p < 0.01$)

Cuadro A7. Suma de cuadrados del análisis de varianza efectuado a la producción de biomasa de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.). Guatemala, 2001.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	P	K	Ca	Mg	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Tratamientos	7	0.019 **	0.840 NS	2.904 **	0.101 **	12523.52 **	55040.16 NS	3628.91 NS	2120.32 **	15741.82 NS
Error	8	0.001	0.690	0.505	0.012	569.48	24122.44	1275.54	288.41	10509.94
Total	15	0.020	1.530	3.409	0.113	13093.00	79162.60	4904.45	2408.73	26251.76

NS: No significativo ($p > 0.05$)

** : Altamente significativo ($p < 0.01$)

Cuadro A8. Suma de cuadrados del análisis de varianza efectuado a la producción de biomasa de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.). Guatemala, 2001.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Biomasa foliar fresca	Biomasa foliar seca	Biomasa de raíces seca	Biomasa total seca
Tratamientos	7	72.256 **	4.060 **	0.783 **	8.314 **
Error	16	10.894	0.674	0.103	1.022
Total	23	83.150	4.734	0.886	9.336

** : Altamente significativo ($p < 0.01$)

Cuadro A9. Resultado del análisis de pasta saturada. Guatemala, 2001.

Parámetro	Tratamiento		Rango Sugerido
	0 t CV/Ha	500 t CV/Ha	
CE (dS/m)	0.44	2.50	1.0-3.5
Nitrato-N (mg/L suelo)	63.55	131.08	70-200
Fósforo (mg/L suelo)	0.24	0.58	6-14
Potasio (mg/L suelo)	13.56	19.82	50-250
Calcio (mg/L suelo)	16.85	337.09	100-250
Magnesio (mg/L suelo)	15.27	86.83	35-125
Boro (mg/L suelo)	0.22	10.50	0.05-0.5
Cobre (mg/L suelo)	0.03	0.09	0.001-0.5
Hierro (mg/L suelo)	< 0.00	< 0.3	< 0.3-3.0
Manganeso (mg/L suelo)	0.26	< 0.02	< 0.02-3.0
Zinc (mg/L suelo)	< 0.00	0.04	0.25-2.0
Sodio (mg/L suelo)	18.95	20.30	< 40.0

Fuente: Soluciones Analíticas con base a Sparks (1996).