



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

**CAMPUS MONTECILLO**

POSTGRADO EN HIDROCIENCIAS

**LIXIVIACIÓN DE POTASIO, CONTENIDOS NUTRIMENTALES  
EN SUELO Y ALFALFA EN RESPUESTA A DOSIS DE VINAZA**

**PATRICIA FLORES RODRÍGUEZ**

**T E S I S**

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRA EN CIENCIAS**

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO.

2010

La presente tesis, titulada: **LIXIVIACIÓN DE POTASIO, CONTENIDOS NUTRIMENTALES EN SUELO Y ALFALFA EN RESPUESTA A DOSIS DE VINAZA**, realizada por la alumna: Patricia Flores Rodríguez, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS

HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO: \_\_\_\_\_

DR. FRANCISCO GAVI REYES

ASESORA: \_\_\_\_\_

M.C. ELIBETH TORRES BENÍTES

ASESORA: \_\_\_\_\_

DRA. ELIZABETH HERNÁNDEZ ACOSTA

Montecillo, Texcoco, México, 14 de mayo de 2010

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Colegio de Postgraduados, por la oportunidad de realizar los estudios de Maestría especialmente al Programa de Hidrociencias.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el financiamiento, que permitió mi estadía y finalización de mis estudios de posgrado.

Al Dr. Francisco Gavi, por compartir sus conocimientos, experiencias y orientación en el desarrollo de esta investigación. Gracias por la asertividad, paciencia, tiempo y apoyo.

Al M. C Elibeth Torres Benites y a la Dra. Elizabeth Hernández Acosta por la paciencia y comentarios que han enriquecido la presente investigación.

Al Dr. Carlos Ramírez Ayala por la orientación en el trabajo de laboratorio. Gracias al personal del laboratorio de Relación Agua Suelo Planta Atmósfera así como al personal técnico del laboratorio de Ciencias Ambientales de Hidrociencias.

A Raúl Valencia, Álvaro Can, Eva Guadarrama, Saúl Montero, Marcos Casiano, Francisco Mendoza y Elia Crespo gracias por su amistad y agradables momentos compartidos.

A los amigos que me han acompañado por años, Ariel Ríos, Mony García, Vicky Avilés, Erika Ledezma, Gregorio Ángeles y Jaime Jiménez, gracias amigos.

## DEDICATORIA

Dios, gracias por la oportunidad de vivir, gracias por la familia que me ayudaste a escoger, conocerlos y amarlos. Ya no me viste pa, pero terminé este reto y madre gracias por seguir compartiendo esta vida con amor y esperanza. A mis siete hermanas y hermano gracias por su amor que me cobija, a mis sobrinas, sobrinos y familia política. Todos son parte importante de mi vida.

A mi Lilo, por ser mi luz, su amor y alegría han sido una isla salvadora en mis naufragios y a Luis E. Zavala por su apoyo y amor, gracias esposo.

A la Familia Baca Flores por su apoyo incondicional y la Familia Ayala Buendía por ser ejemplo de amor y lucha.

Una gran mujer dijo, que detrás de cada línea de llegada, hay una de partida. Detrás de cada logro, hay otro desafío. Si extrañas lo que hacías, vuelve a hacerlo. Sigue aunque todos esperen que abandones. No dejes que se oxide el hierro que hay en ti.

Gracias a todos por ser parte de mi vida

Patricia Flores Rodríguez

## ÍNDICE

|  |      |
|--|------|
| ÍNDICE DE ANEXOS .....   | viii |
| ÍNDICE DE CUADROS .....  | v    |
| ÍNDICE DE FIGURAS.....   | viii |
| Resumen.....   | ix   |
| Abstract .....   | x    |
| <br>   |      |
| 1. INTRODUCCIÓN .....  | 1    |
| <br>   |      |
| 2. OBJETIVO GENERAL .....  | 2    |
| <br>   |      |
| 2.1. Objetivos específicos .....   | 2    |
| <br>   |      |
| 3. HIPÓTESIS .....   | 2    |
| <br>   |      |
| 4. REVISIÓN DE LITERATURA .....  | 3    |
| <br>   |      |
| 4.1. Características de la vinaza.....   | 3    |
| 4.1.1. Efectos de la vinaza en las características del suelo.....                | 5    |
| 4.1.2.1. Efecto en la materia orgánica.....                                      | 6    |
| 4.1.2.2. Efecto sobre la CE.....   | 7    |
| 4.1.2.3. Efecto en el pH.....  | 7    |
| 4.1.2.4. Macro y micro nutrientes .....  | 9    |
| 4.1.2.5. Efecto de la vinaza en la nutrición y rendimiento de los cultivos ..... | 10   |
| 4.1.2.6. Consideraciones sobre el uso de vinaza.....                             | 13   |
| 4.3. El potasio.....   | 16   |
| 4.3.1 Potasio y aplicaciones de vinaza .....                                     | 17   |
| 4.3.2. Lixiviación de Potasio en el suelo .....                                  | 18   |
| 4.3.3. Factores reguladores de la lixiviación de potasio.....                    | 20   |
| <br>   |      |
| 5. MATERIALES Y METODOS.....   | 21   |
| <br>   |      |
| 5.1. Ubicación cartográfica y descripción del sitio de muestreo.....             | 21   |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>5.2. Columnas inalteradas de suelo.....</b>                              | <b>21</b> |
| 5.2.1. Suelo.....   | 22        |
| 5.2.2. Vinaza.....  | 23        |
| 5.2.3. Agua.....  | 24        |
| 5.2.4. Planta.....  | 24        |
| <b>5.3. Montaje experimental.....</b>                                       | <b>24</b> |
| 5.3.1. Instalación de columnas en invernadero.....                          | 24        |
| 5.3.2. Establecimiento del cultivo.....                                     | 24        |
| <b>5.4. Descripción de tratamientos.....</b>                                | <b>25</b> |
| <b>5.5. Proceso de lixiviado.....</b>                                       | <b>25</b> |
| <b>5.6. Métodos utilizados en análisis de muestras.....</b>                 | <b>25</b> |
| 5.6.1. Vinaza.....  | 25        |
| 5.6.1.1. Interpretación del análisis de vinaza como descarga residual.....  | 26        |
| 5.6.1.2. Vinaza como insumo de nutrición vegetal.....                       | 27        |
| 5.6.2. Agua.....  | 27        |
| 5.6.2.1. Descripción de metodologías utilizadas para muestras de agua.....  | 28        |
| 5.6.2.2. Resultados del análisis.....                                       | 31        |
| 5.6.3. Lixiviados.....  | 32        |
| 5.6.3.1. Análisis de lixiviados.....  | 32        |
| 5.6.4. Suelo.....   | 32        |
| 5.6.4.1. Descripción de metodologías utilizadas para muestras de suelo..... | 33        |
| 5.6.4.2. Resultados de muestras suelo previo al experimento.....            | 44        |
| 5.6.5. Planta.....  | 44        |
| 5.6.5.1. Análisis químico de planta.....                                    | 44        |
| 5.6.5.2. Descripción de análisis.....                                       | 46        |
| <b>5.7. Diseño experimental.....</b>  | <b>48</b> |
| 5.7.1. Lixiviados.....  | 49        |
| 5.7.2. Planta.....  | 49        |
| 5.7.3. Variables para suelo.....  | 51        |
| 5.7.4. Análisis de resultados.....  | 51        |
| <br>  |           |
| <b>6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>                                       | <b>52</b> |
| <br>  |           |
| <b>6.1. Efecto de vinaza en lixiviados.....</b>                             | <b>52</b> |



|   |            |
|---|------------|
| <b>6.3. Efecto de la vinaza en el suelo .....</b>                                       | <b>80</b>  |
| <b>6.3.1. Análisis de varianza para variables de respuesta en suelo .....</b>           | <b>80</b>  |
| <b>6.3.1.1. Comparación de medias para variables de respuesta en suelo .....</b>        | <b>81</b>  |
| <b>6.3.2. Efecto de vinaza en la profundidad del suelo.....</b>                         | <b>82</b>  |
| <b>6.3.2.1. Efecto en CE .....</b>  | <b>82</b>  |
| <b>6.3.2.2. Efecto en pH.....</b>   | <b>83</b>  |
| <b>6.3.2.3. Efecto en P y bases intercambiables .....</b>                               | <b>83</b>  |
| <b>6.3.2.4. Efecto en materia orgánica.....</b>   | <b>85</b>  |
| <b>6.3.2.5. Efecto en micronutrientes.....</b>  | <b>86</b>  |
| <b>6.3.2.6. Efecto de la vinaza en el suelo para dosis de K.....</b>                    | <b>87</b>  |
| <b>6.3.2.7. Efecto de la vinaza para la interacción profundidad por dosis de K.....</b> | <b>89</b>  |
| <br>  |            |
| <b>7. CONCLUSIONES.....</b>   | <b>91</b>  |
| <br>  |            |
| <b>8. LITERATURA CITADA .....</b>   | <b>92</b>  |
| <br>  |            |
| <b>ANEXOS .....</b>   | <b>103</b> |

## ÍNDICE DE CUADROS

|  | Página |
|--|--------|
| Cuadro 1. Constituyentes de la vinaza .....  | 5      |
| Cuadro 2. Análisis de principales constituyentes químicos en la vinaza .....   | 26     |
| Cuadro 3. Determinaciones realizadas a muestras de agua .....  | 28     |
| Cuadro 4. Concentraciones de iones presentes en el agua de riego utilizada. ....   | 31     |
| Cuadro 5. Determinaciones realizadas a lixiviados.....   | 32     |
| Cuadro 6. Determinaciones realizadas a muestras de suelo .....   | 33     |
| Cuadro 7. Composición química del suelo previo al experimento .....  | 44     |
| Cuadro 8. Metodologías utilizadas para análisis foliar de alfalfa.....   | 45     |
| Cuadro 9. Análisis de varianza para CE ( $\text{dS m}^{-1}$ ) en lixiviados .....  | 52     |
| Cuadro 10. Comparación de medias para CE ( $\text{dS m}^{-1}$ ) en lixiviados e interacción<br>profundidad y dosis ..... | 53     |
| Cuadro 11. Comparación de medias de CE para día de muestreo .....  | 54     |
| Cuadro 12. Medias de CE en lixiviados, para días de muestreo .....   | 55     |
| Cuadro 13. Medias de CE lixiviados según Dosis por profundidad.....  | 56     |
| Cuadro 14. Medias de CE en lixiviados para profundidad por día de muestreo .....   | 57     |
| Cuadro 15. Medias de CE en lixiviados para profundidad por día de muestreo .....   | 58     |
| Cuadro 16. Análisis de varianza para K en lixiviados .....   | 60     |
| Cuadro 17. Medias de K en lixiviados para profundidad.....   | 60     |
| Cuadro 18. Medias de K ( $\text{mg L}^{-1}$ ) en lixiviados para dosis de cosecha 2 .....                                | 61     |
| Cuadro 19. Medias de K en lixiviados para días de muestreo.....  | 62     |
| Cuadro 20. Medias de K en lixiviados para dosis por profundidad .....  | 64     |
| Cuadro 21. Medias de K en lixiviados para días de muestreo por profundidad.....  | 65     |
| Cuadro 22. Medias de K en lixiviados para días de muestreo por dosis .....   | 66     |
| Cuadro 23. Medias de K en lixiviados para días de muestreo por profundidad por dosis,<br>cosecha 2.....                  | 67     |
| Cuadro 24. Análisis de varianza para pH en lixiviados.....   | 69     |

|   |    |
|---|----|
| Cuadro 25. Comparación de medias en pH para lixiviados por profundidad de cosecha 2 ...               | 69 |
| Cuadro 26. Comparación de medias en pH para lixiviados para días de muestreo<br>de cosecha 2.....     | 70 |
| Cuadro 27. Comparación de medias para pH en lixiviados en profundidad por número<br>de días .....     | 71 |
| Cuadro 28. Comparación de medias para pH en lixiviados, cosecha 2 .....                               | 72 |
| Cuadro 29. Efecto de vinaza sobre el pH a diferentes profundidades por número de días y<br>dosis..... | 73 |
| Cuadro 30. Análisis de varianza para índice de materia seca y nitrógeno en alfalfa .....              | 75 |
| Cuadro 31. Análisis de varianza para boro y calcio en alfalfa .....                                   | 75 |
| Cuadro 32. Análisis de varianza para cobre y fierro en alfalfa .....                                  | 76 |
| Cuadro 33. Análisis de varianza para potasio y magnesio en alfalfa .....                              | 76 |
| Cuadro 34. Análisis de varianza para manganeso y sodio .....  | 76 |
| Cuadro 35. Análisis de varianza para fósforo y zinc.....  | 77 |
| Cuadro 36. Análisis de varianza para nitratos .....   | 77 |
| Cuadro 37. Efecto de vinaza en alfalfa comparación de medias en variables de respuesta ..             | 78 |
| Cuadro 38. Análisis de varianza para CE, pH y NO <sub>4</sub> en suelo tratado con vinaza .....       | 80 |
| Cuadro 39. Análisis de varianza para NO <sub>3</sub> , P y K en suelo tratado con vinaza .....        | 80 |
| Cuadro 40. Análisis de varianza para Na, Ca y Mg en suelo tratado con vinaza.....                     | 81 |
| Cuadro 41. Análisis de varianza para Fe, Cu y Zn en suelo tratado con vinaza .....                    | 81 |
| Cuadro 42. Análisis de varianza para Mn, MO y PS en suelo tratado con vinaza .....                    | 81 |
| Cuadro 43. Efecto de vinaza en suelo comparación de medias en variables de respuesta.....             | 82 |
| Cuadro 44. Medias de los contenidos de Potasio en el suelo, por tratamiento y<br>profundidad.....     | 89 |
| Cuadro 45. Medias de los contenidos de Magnesio en el suelo .....                                     | 90 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  | Página |
|--|--------|
| <i>Figura 1.</i> Diseño de columna de PVC.....   | 22     |
| <i>Figura 2.</i> Perfil del sitio de muestreo .....  | 23     |
| <i>Figura 3.</i> Llenado de columnas.....  | 23     |
| <i>Figura 4.</i> Efecto de la vinaza sobre CE en lixiviados por día de muestreo, cosecha 1 .....   | 54     |
| <i>Figura 5.</i> Efecto de la vinaza en CE de lixiviados por día de muestreo, cosecha 2.....   | 55     |
| <i>Figura 6.</i> Efecto de vinaza en CE de lixiviados en profundidad por día de muestreo,<br>cosecha 1.....  | 57     |
| <i>Figura 7.</i> Efecto de la vinaza en CE de lixiviados, interacción: profundidad por día de<br>muestreo para cosecha 2. ....                             | 59     |
| <i>Figura 8.</i> Efecto de la vinaza en la concentración de K por días de muestreo, cosecha 1 .....  | 63     |
| <i>Figura 9.</i> Efecto de la vinaza en la concentración de K por días de muestreo, cosecha 2. ....  | 63     |
| <i>Figura 10.</i> Efecto de vinaza sobre concentración de K en la profundidad para cosecha 1 ....  | 65     |
| <i>Figura 11.</i> Efecto de la vinaza en la concentración de K en lixiviados por dosis para día<br>de muestreo en diferentes profundidades, cosecha 2..... | 68     |
| <i>Figura 12.</i> Efecto de la vinaza sobre el pH de lixiviados en la profundidad por días de<br>muestreo, cosecha 2.....                                  | 71     |
| <i>Figura 13.</i> Efecto de la vinaza sobre el pH de lixiviados para dosis por días de muestreo en<br>diferentes profundidades, en cosecha 2 .....         | 74     |
| <i>Figura 14.</i> Efecto de la vinaza en contenido de P en tejido vegetal para dosis de<br>K (kg ha <sup>-1</sup> ).....                                   | 79     |
| <i>Figura 15.</i> Efecto de la vinaza en contenido de Zn en tejido vegetal para dosis de<br>K (kg ha <sup>-1</sup> ).....                                  | 79     |
| <i>Figura 16.</i> Efecto de vinaza en P y bases intercambiables en el suelo .....  | 84     |
| <i>Figura 17.</i> Efecto de vinaza en materia orgánica y porcentaje de saturación en el suelo .....  | 86     |
| <i>Figura 18.</i> Efecto de la vinaza en micronutrientes del suelo. ....   | 87     |
| <i>Figura 19.</i> Efecto de la vinaza en contenido de N-NH <sub>4</sub> y K en suelo.....  | 88     |

## ÍNDICE DE ANEXOS

|  | Página |
|--|--------|
| Anexo 1. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas<br>residuales en aguas y bienes nacionales ..... | 103    |
| Anexo 2. Datos y variables utilizadas para el análisis estadístico en lixiviados<br>para cosecha 1.....                          | 104    |
| Anexo 3. Datos y variables utilizadas para el análisis estadístico en lixiviados<br>para cosecha 2.....                          | 107    |
| Anexo 4. Datos y variables utilizadas para el análisis estadístico en suelos .....   | 109    |
| Anexo 5. Datos y variables utilizadas para el análisis estadístico en tejido vegetal .....                                       | 111    |

# LIXIVIACIÓN DE POTASIO, CONTENIDOS NUTRIMENTALES EN SUELO Y ALFALFA EN RESPUESTA A DOSIS DE VINAZA

Patricia Flores Rodríguez, M.C.

Colegio de Postgraduados 2010

## Resumen

Bajo condiciones de invernadero y con base a la concentración de potasio ( $K^+$ ) en la caracterización química de la vinaza, se evaluó el efecto de diferentes dosis (0, 250 y 500  $kg\ ha^{-1}$  de  $K^+$ ) sobre el suelo, en columnas de cloruro de polivinilo (pvc), empleando lisímetros de succión a dos profundidades (23 y 46 cm) y muestras al final de la columna (75 cm). En lixiviados se evaluó la concentración de K, el efecto sobre pH y conductividad eléctrica (CE), como cultivo indicador se usó alfalfa (*Medicago sativa*), efectuándose dos cortes, en un periodo de 120 días y una aplicación de vinaza al inicio del experimento y otra después del primer corte. En muestras de plantas las variables fueron materia seca,  $N_T$ , B, Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, Zn y  $NO_3$  en suelo se consideró CE, pH,  $NH_4$ ,  $NO_3$ , P, K, Na, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn Mn y MO. En el análisis estadístico la dosis 500  $kg\ ha^{-1}$  de K tuvo efecto sobre la fertilidad del suelo, registrando un incremento para: materia orgánica,  $NH_4$ , P, Ca, Na, Mg, Fe, Cu, Zn, Mn y K. La CE y K el mayor efecto ( $P<0.05$ ) fue en los 10 cm en suelo y en lixiviados el efecto ( $P<0.05$ ), fue a los 23 cm de profundidad, para ambas aplicaciones de vinaza. El pH no presentó cambios ( $P<0.05$ ), con la aplicación de vinaza. En tejido vegetal los nutrientes que aumentaron ( $P<0.05$ ) fueron para P = 1939.2 y Zn= 28.63  $mg\ kg^{-1}$  para dosis 500  $kg\ ha^{-1}$ , en relación al control el P= 1025.2 y Zn= 14.17  $mg\ kg^{-1}$  respectivamente. Por lo anterior el uso de la vinaza, como insumo de nutrición vegetal, es recomendable.

**Palabras clave:** *Medicago sativa*, lisímetros, conductividad eléctrica, pH.

# LEACHING OF POTASSIUM, NUTRIENT CONTENT IN SOIL AND ALFALFA IN RESPONSE TO DOSES OF VINASSE

Patricia Flores Rodríguez, M.C.

Colegio de Postgraduados 2010

## Abstract

Under greenhouse conditions and based on the concentration of potassium ( $K^+$ ) in the chemical characterization of vinasse, we evaluated the effect of different doses (0, 250 and 500  $kg\ ha^{-1}\ K^+$ ) on the ground in columns polyvinyl chloride (PVC), using suction lysimeters at two depths (23 and 46 cm) and samples at the end of the column (75 cm). Leaching was evaluated in the concentration of K, the effect on pH and electrical conductivity (EC), was used as an indicator crop alfalfa (*Medicago sativa*), making two cuts in a period of 120 days and an application to vinasse at the beginning of the experiment and another after the first cut. In plant samples were dry matter variables,  $N_T$ , B, Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, Zn and  $NO_3$  in soil was considered EC, pH,  $NH_4$ ,  $NO_3$ , P, K, Na, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, Mn and OM. In the statistical analysis the dose 500  $kg\ K\ ha^{-1}$  had an effect on soil fertility, an increase to: organic matter,  $NH_4$ , P, Ca, Na, Mg, Fe, Cu, Zn, Mn and K. The EC and K the greatest effect ( $P < 0.05$ ) was within 10 cm in soil and leaching effect ( $P < 0.05$ ) was at 23 cm depth for both vinasse applications. The pH was unchanged ( $P < 0.05$ ), with the application of vinasse. Nutrients in plant tissue increased ( $P < 0.05$ ) were: P = 1939.2 and 28.63  $mg\ Zn\ kg^{-1}$  dose 500  $kg\ ha^{-1}$ , as compared to control P = 1025.2 and 1417  $mg\ Zn\ kg^{-1}$  respectively. Therefore the use of vinasse as an input of plant nutrition is recommended.

Key words: *Medicago sativa*, lysimeters, electrical conductivity (EC), pH.

# 1. INTRODUCCIÓN

Los desechos originados en la industria azucarera pueden convertirse en subproductos con valor económico, y con ello reducir el impacto ambiental que ocasiona su inadecuada disposición. Uno de esos subproductos es la melaza, materia prima en la elaboración de alcohol etílico, que también genera otro subproducto conocido como vinaza, líquido con alto potencial contaminante (Orlando *et al.* 1983), por su gran cantidad y heterogeneidad de material orgánico (Bautista *et al.* 1998), que agota el oxígeno disuelto en los cuerpos de agua, así como por las altas temperaturas que alcanza dicho líquido durante su producción y desecho (50 a 70 °C).

Ante la creciente demanda de combustibles limpios, a largo plazo crecerá la industria del etanol o alcohol anhidro que genera de 10 a 15 litros de vinazas. Éste importante volumen de producción y las características de sus contaminantes asociados (alto contenido de potasio y elevada DBO) representan problemas ambientales en la mayoría de los países productores de caña de azúcar (Paturau, 1989).

En México existen 16 destilerías que producen más de 50 millones de litros de alcohol etílico, (CEFP, 2002) y en promedio se producen 13 L de vinaza por litro de alcohol, los cuales no reciben ningún tratamiento para verterse a los cuerpos de agua y no cumple con la Norma Oficial Mexicana NOM-064-ECOL-1994, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la industria de la destilería.

Actualmente en Brasil, Colombia y en menor proporción México, la vinaza es utilizada como fuente potásica de fertilización para suelos cañeros, ya sea aplicada directamente o por medio del agua de riego, lo cual es una opción viable para evitar la contaminación del ambiente si se usa en forma racional, para no provocar deterioros irreversibles o de muy costosa corrección (Medina y Subirós 1992).

La evaluación del impacto de la aplicación de vinaza como fuente de potasio sobre el suelo agrícola a través del riego, así como la lixiviación del mismo en el perfil del suelo es el objetivo de la presente investigación. Con el uso de lisímetros de succión en columnas inalteradas y partiendo del análisis químico de la vinaza se calculó la dosis de potasio para el cultivo de alfalfa (*Medicago sativa*), para estudiar el efecto de la vinaza con relación a la cantidad de potasio, pH y conductividad eléctrica en lixiviados a diferentes profundidades de columnas inalteradas de un suelo cañero.

## **2. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la lixiviación de K y la modificación de la fertilidad del perfil del suelo adicionado con vinaza, así como la extracción de nutrimentos por la alfalfa.

### **2.1. Objetivos específicos**

- Caracterización de la vinaza como insumo de nutrición vegetal.
- Evaluar la lixiviación de K en el perfil del suelo cultivado con alfalfa fertilizada con vinaza.
- Evaluar la modificación del pH y la CE en el perfil del suelo cultivado con alfalfa fertilizada con vinaza.
- Evaluar la fertilidad del suelo cultivado con alfalfa fertilizada con vinaza.
- Evaluar la extracción de macro y micro nutrimentos por la alfalfa fertilizada con vinaza.

## **3. HIPÓTESIS**

- Los nutrimentos contenidos en la vinaza incrementan el rendimiento de alfalfa.
- La lixiviación de K en el perfil del suelo se incrementa por la fertilización con vinaza.

- El pH y la CE se modifica por la aplicación de vinaza.
- La fertilidad del suelo varía en función de la dosis de vinaza.
- La extracción de nutrimentos por alfalfa se incrementa por la aplicación de vinaza.

## 4. REVISIÓN DE LITERATURA

### 4.1. Características de la vinaza

Bermúdez *et al.* (2000) define a la vinaza como un líquido con partículas en suspensión de color marrón, olor característico de mieles finales producto de la destilación de melaza y sabor a malta; Montenegro (2009) señala que la vinaza es un subproducto de la fermentación de alcohol etílico o aguardiente, generado a una temperatura aproximada de 107°.

Perret *et al.* (2010) menciona que para producir un litro de bioetanol se generan alrededor de 10 a 15 L de vinaza a partir de caña de azúcar. Este importante volumen de las vinazas producidas y las características de sus contaminantes asociados (sobre todo de alto contenido de potasio y de elevada DBO) representan los principales problemas ambientales en la mayoría de los países productores de caña de azúcar. En el caso del alcohol etílico obtenido del mosto de melaza, se generan alrededor de 13 L de vinaza a partir de la fermentación de las mieles finales (melaza), de la caña de azúcar (Gómez, 1996). En México, se generan entre 12 y 14 litros de vinazas por cada litro de alcohol etílico producido (Pandiyan *et al.* 1999).

Basanta (2007) caracteriza a la vinaza como un residuo alcohólico, viscoso con densidad aproximada de 4 a 10 °Brix, que a temperaturas y concentraciones altas es corrosivo. Los constituyentes inorgánicos son sulfatos, cloruros, fosfatos, potasio, sodio y silicato. Los constituyentes orgánicos son proteínas y otras sustancias como: ácidos orgánicos, alcohol, glicerol y azúcares.

El tipo de vinaza depende directamente del proceso de obtención de alcohol y tratamiento que se realice para separar el alcohol de la melaza ya fermentada y para disponer la misma vinaza, de acuerdo con la materia prima para la fermentación, pueden ser almidones, cereales, melazas, jugo de caña, en sí, productos que contengan unidades de glucosa. (Montenegro, 2008).

Sarria y Preston (1992) reportan que un metro cúbico de vinaza diluida contiene sales minerales equivalentes a 2.6 kg de urea (46% N), 0.3 kg de superfosfato triple (45% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) y 15.7 kg de KCl (50% K<sub>2</sub>O). Gómez *et al.* (2000) realizaron el análisis a la vinaza y reportan los valores siguientes: N (2 kg m<sup>-3</sup>); P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (2.3 kg m<sup>-3</sup>); K<sub>2</sub>O (7.5 kg m<sup>-3</sup>), pH (4.2) y 98.1% de materia orgánica. Una dosis de 50 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> aporta 55 % de N, 72% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y 100% de K<sub>2</sub>O, siendo una fuente de fertilización mineral.

Rivas *et al.* (1996) mencionan que el material orgánico disuelto, medido como DQO, alcanza valores de hasta 150 g L<sup>-1</sup>, que en comparación con el valor permitido en las descargas domésticas (150 mg L<sup>-1</sup>) se consideran altos; coincidiendo con Bermúdez *et al.* (2000), quienes advierten que la vinaza es altamente contaminante, debido a su bajo pH y elevada demanda química de oxígeno (DQO).

García y Rojas (2006), mencionan que la vinaza, resultante de la destilación de melaza fermentada, tiene todos los componentes del vino que han sido arrastrados por el vapor de agua así como cantidades de azúcar residual y componentes volátiles. De manera general, los constituyentes son los siguientes:

- Sustancias inorgánicas solubles en las cuales predominan los iones K<sup>+</sup>, Ca<sup>+</sup> y SO<sub>4</sub><sup>=</sup>.
- Células muertas de levadura.
- Sustancias orgánicas resultantes de los procesos metabólicos de levaduras y microorganismos contaminantes.
- Alcohol y azúcar residual.
- Sustancias orgánicas insolubles.
- Sustancias orgánicas volátiles.

Las principales características químicas de la vinaza (*Cuadro 1*), según Bautista y Duran (1998), son: grandes cantidades de materia orgánica disuelta; altas temperaturas; y bajo pH debido a la adición de ácido clorhídrico o ácido sulfúrico, con la finalidad de que el mosto tenga un pH= 3.0 para evitar la presencia de otros microorganismos que compitan con los organismos eucarióticos (*Saccharomyces cerevisiae*), responsables de la fermentación y producción de alcohol etílico (Bautista *et al.* 2000a).

Cuadro 1. Constituyentes de la vinaza

| Parámetro                    | Unidades            | Valor promedio |
|------------------------------|---------------------|----------------|
| Temperatura                  | °C                  | 85             |
| pH                           |                     | 4.5            |
| Conductividad eléctrica      | dS m <sup>-1</sup>  | 29.3           |
| Sólidos sedimentables        | mg L <sup>-1</sup>  | 48             |
| Material flotante            | ninguno             | ninguno        |
| DQO                          | mg L <sup>-1</sup>  | 117,876        |
| Fosfatos                     | mg L <sup>-1</sup>  | 700            |
| Zn                           | mg L <sup>-1</sup>  | 60             |
| Ca <sup>2+</sup>             | meq L <sup>-1</sup> | 45.7           |
| Mg <sup>2+</sup>             | meq L <sup>-1</sup> | 46             |
| Na <sup>+</sup>              | meq L <sup>-1</sup> | 0.44           |
| K <sup>+</sup>               | meq L <sup>-1</sup> | 10.1           |
| Cl <sup>-</sup>              | meq L <sup>-1</sup> | 112.8          |
| SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> | meq L <sup>-1</sup> | 31.2           |
| CO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | meq L <sup>-1</sup> | nd             |
| HCO <sub>3</sub>             | meq L <sup>-1</sup> | Nd             |

Fuente: Bautista-Zuniga y Duran-de-Bazua (1998) nd = no detectado

Gómez (2009) considera a la vinaza un fertilizante orgánico que se caracteriza por una alta concentración de sólidos, materia orgánica, nitrógeno, potasio, azufre y elementos menores, con alta actividad microbiológica, por lo que con su aplicación se puede incrementar el contenido de materia orgánica y favorecer la fertilidad física (permeabilidad y estabilidad de los agregados), química y biológica de los suelos.

#### 4.1.1. Efectos de la vinaza en las características del suelo

Se ha registrado que la vinaza genera alteraciones temporales en los procesos biológicos y químicos, tales como: descomposición de la materia orgánica, nitrificación, desnitrificación, fijación de N<sub>2</sub> atmosférico y aumento del pH (Lima, 1980 citado por Castillo, 2008).

Quintero (2004) menciona que la aplicación de las vinazas al suelo genera cambios en algunas de las características físicas, químicas y biológicas. Entre las propiedades modificadas están: pH, disponibilidad de nutrientes (principalmente K), cambios en la materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, conductividad eléctrica y la actividad biológica.

Bautista *et al.* (2000b) señala que aplicaciones de vinazas a largo plazo pueden producir condiciones de pseudopodsolización, lo que constituye un problema de manejo debido a la formación de horizontes endurecidos y por la acumulación y toxicidad de quelatos de Hierro y Aluminio.

El Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio ambiente de Cuba (1998) menciona que las vinazas tienen alta concentración salina y predominio relativo de potasio y sodio. Su empleo para riego puede ocasionar cambios desfavorables en las propiedades físicas y químicas edáficas con efectos adversos a los cultivos. Sin embargo, Bautista y Durán (1998) señalan que los cationes dominantes en la vinaza son calcio, magnesio y potasio y que no existe riesgo de sodificación ni de alcalinización en suelos de mejor calidad agrícola como fluvisoles y en vertisoles; pero advierten que las vinazas pueden alterar químicamente las arcillas y ocasionar cambios en los minerales del suelo por su acidez y poder ligante respectivamente (Huang, 1994; citado por Bautista y Durán, 1998).

Bianchi (2008) considera a la vinaza como un excelente abono para el suelo; sin embargo, la define como fuente de contaminación para el agua subterránea por sus contenidos de N en forma de nitrato y amonio.

#### **4.1.2.1. Efecto en la materia orgánica**

Según Varadachari *et al.* (1994), en las interacciones entre la materia orgánica y la fase sólida del suelo, los cationes intercambiables se unen a las arcillas con diferente fuerza e influyen en los enlaces arcilla-cación-compuesto orgánico dependiendo del potencial iónico

del elemento; los compuestos orgánicos solubles y arcillas pueden formar uniones firmes en condiciones de humedad y complejos arcilla-humus en condiciones secas.

Las relaciones e interacciones entre constituyentes del suelos y la materia orgánica es de gran interés ya que de esta interacción se deriva el reciclaje de nutrientes, intemperismo, desarrollo del perfil, estabilidad de agregados, lixiviación, capacidad amortiguadora del suelo y la recepción, transformación e inactivación de contaminantes (Bautista *et al.*, 2000).

La materia orgánica presente en las vinazas y los contenidos de calcio y otras bases intercambiables pueden facilitar la neutralización del aluminio intercambiable en suelos extremadamente ácidos o el desplazamiento del sodio en suelos fuertemente alcalinos y sódicos. Esta neutralización, complementada con obras de drenaje para eliminar el sodio intercambiable, favorecerá la recuperación de suelos afectados por este elemento (Quintero, 2003).

#### **4.1.2.2. Efecto sobre la CE**

La inadecuada aplicación de vinaza pueden contribuir al aumento de los elementos químicos en la solución del suelo, especialmente de potasio y sodio (Na) que contribuyen al aumento de la conductividad eléctrica del extracto de saturación suelo (Brito y Rolim, 2005). Bebe *et al.* (2009) reportaron incrementos de K, Na, Ca y Mg en el suelo, asociados a la aplicación de vinaza; asimismo dichos incrementos se asociaron positivamente con la CE.

#### **4.1.2.3. Efecto en el pH**

El pH en el suelo está influenciado por la composición de los cationes intercambiables, la naturaleza de los materiales de intercambio catiónico, composición de sales solubles, presencia de yeso y carbonatos de metales alcalino térreos (Richards *et al.* 1990).

En relación con el pH en pastas saturadas, Firerman (1944) establece: pH de 8.5 o mayor indica normalmente un porcentaje de 15 o más de sodio intercambiable y presencia de carbonatos de metales alcalino térreos. En suelos con pH menor a 8.5 el porcentaje de sodio intercambiable puede o no ser mayor de 15; en suelos con pH menor de 7.5 casi nunca contienen carbonatos de metales alcalino térreos y si el pH es menor de 7.0, el suelo seguramente contendrá cantidades considerables de hidrógeno intercambiable.

El efecto de las vinazas aplicadas al suelo, debido a su acidez elevada, ayuda en la disolución de las diferentes formas de carbonatos, fosfatos de calcio y otros compuestos precipitados con lo cual se puede lograr una mejor nutrición de las plantas debido a una mayor disponibilidad de nutrientes (García y Rojas, 2006)

Becorral (1987) menciona que a pesar de que la vinaza presenta características ácidas (pH alrededor de 4.0), su adición en dosis altas provoca elevación del pH edáfico debido al incremento de la actividad microbiana en el suelo y de la materia orgánica proveniente de la vinaza, la cual en gran parte es coloidal y forma complejos con el aluminio, neutralizando el efecto acidificante de este elemento. Asimismo el aumento del pH puede deberse al contenido de cationes de la vinaza ya que disminuyen el potencial de reducción, originado por la anaerobiosis y la participación del oxígeno en la degradación de materia orgánica presente en la vinaza (Brito *et al.* 2009).

Según García y Rojas (2006) las vinazas con base a su alto poder electrolítico, reacción ácida y acción como activador de la fauna microbiana del suelo es una enmienda efectiva para la recuperación de suelos afectados por una alta saturación de sodio y/o magnesio intercambiables. La vinaza, como recuperador de suelos afectados por sales con efectos deletéreos como el sodio, promueve la agregación de las partículas y la permeabilidad del suelo al tiempo que disuelve carbonatos, fosfatos de calcio y otros precipitados, con lo cual se libera el calcio necesario para el desplazamiento del sodio del complejo de intercambio.

La mayoría de los compuestos químicos contenidos en las vinazas son de carácter quelante por tener grupos aminos, diácidos e hidroxílicos. Para evitar que se precipiten en forma de

sales insolubles, los micronutrientes se suministran a las plantas en forma de quelatos, compuestos en los cuales las uniones se efectúan por compartimiento de pares de electrones. Entre los compuestos más simples y comunes que forman complejos de coordinación se encuentra el amoníaco, que tiene dos electrones que puede compartir con iones metálicos formando una serie de complejos amoniacales ( $\text{NH}_3$ ) con diferentes metales (Berón, 2006).

Bebe *et al.* (2009) comprobó que la aplicación vinaza con fertirriego, en un periodo de 10 años no modificó el pH del suelo.

Brito y Rolim (2005) encontraron que la adición de vinazas en el suelo, disminuyó significativamente el pH de lixiviados en los primeros 30 días, pero a los 60 días dicho pH aumentó a niveles comparables con los de los testigos. Lo cual explica que se debe a la degradación intensa de la materia orgánica después de 30 días, lo que llevó a la liberación de electrones, reduciendo el oxígeno en el agua y, por tanto, disminución de la concentración de hidrógeno.

#### **4.1.2.4. Macro y micro nutrientes**

García (1986) realizó estudios con vinaza y fertilizante mineral en el rendimiento de maíz; la vinaza mejoró algunas propiedades químicas del suelo, como pH, capacidad de intercambio catiónico, contenido de K intercambiable, Ca, Mg, relación Ca/Mg, relación Ca+Mg/K, % de saturación de Ca, % de saturación de bases y en menor proporción: el N, P, materia orgánica, Fe, % de saturación de Mg y K. A la vez, disminuyó el contenido de Al, Zn y Mn; mientras que en el análisis de suelo con aplicación de fertilizante mineral no se tuvo el mismo efecto.

Bebe (2009) asoció la aplicación de vinaza con la elevada concentración de K, además de encontrar un aumento Ca, Mg y Na en la composición del suelo. En general, en los resultados presentados se puede verificar que la aplicación de vinaza en el suelo fue favorable tanto para la fertilidad del suelo como en la calidad ambiental de los efluentes.

Con la aplicación de la vinaza se incrementó la concentración de potasio en los primeros 30 cm del suelo (Brito y Rolim, 2005).

#### **4. 1. 2. 5. Efecto de la vinaza en la nutrición y el rendimiento de los cultivos**

Una alta aplicación de vinaza al suelo genera un desequilibrio de elementos, por lo general una presencia excesiva de potasio. Estudios realizados en Brasil han indicado algunos problemas en el cultivo de la caña de azúcar: atraso de maduración, disminución de sacarosa aparente y aumento de cenizas (Ocampo, 2004); sin embargo, existen casos donde se ha mejorado considerablemente la producción de este cultivo.

##### *a) Efecto en alfalfa*

El potasio es el elemento más requerido por la alfalfa por lo que la deficiencia de este nutriente afecta su crecimiento vegetativo y producción. La investigación realizada por Bianchi (2008) en la que utilizó el cultivo de alfalfa fertilizando con cloruro de potasio, sulfato de potasio y vinaza, mostró que la utilización de vinaza como fertilizante de dicho cultivo aumentó la producción de materia seca respecto a los tratamientos con cloruro de potasio y sulfato de potasio; asimismo que la utilización de vinaza reduce el costo de la fertilización química.

##### *b) Efecto en la caña de azúcar*

Gómez (1996) evaluó durante tres años consecutivos (plantilla, soca I y soca II) el efecto de la aplicación de diferentes dosis de vinaza, complementada con fertilización mineral, en la producción y calidad de la caña de azúcar. Se aplicaron 3 tratamientos de fertilizante químico en las parcelas y 5 dosis de vinaza en las subparcelas. Los resultados obtenidos revelan que la vinaza incrementa la producción de la caña de azúcar, sin afectar su calidad y evidencian que puede sustituir el 55 % del nitrógeno, el 72% del fósforo ( $P_2O_5$ ) y el 100 % del potasio ( $K_2O$ ), provenientes de la fertilización mineral. Los mejores rendimientos se obtuvieron cuando se incorporaron  $50\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$  de vinaza en plantilla y  $100\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$  en soca I y soca II. Los resultados anteriores evidencian que la vinaza utilizada en este ensayo puede ser empleada eficazmente para elevar el rendimiento de caña.

La evaluación de la vinaza como fertilizante potásico y fertilizante mineral, realizada por Alfaro y Alfaro (1996) en tres diferentes cosechas de caña de azúcar, incluyó diferentes dosis de vinaza (con  $2 \text{ g K L}^{-1}$ ): 20 (40.5  $\text{K}_2\text{O}$ ), 37 (75 kg de  $\text{K}_2\text{O}$ ) y 62 (125 kg de  $\text{K}_2\text{O}$ )  $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$  aplicadas en forma pura y diluida (25%) y dosis de fertilizante mineral de 50, 150, 50 kg de N,  $\text{P}_2\text{O}_5$  y  $\text{K}_2\text{O ha}^{-1}$  respectivamente; los resultados de las tres cosechas no presentan diferencias estadísticas significativas en ninguna de las variables evaluadas, obteniéndose un incremento en el contenido de azúcar por tonelada métrica de 5 a 14% para la dosis de 125 kg  $\text{K}_2\text{O ha}^{-1}$ , respecto al testigo, y en el segundo corte el tratamiento de vinaza a 75 kg  $\text{K}_2\text{O ha}^{-1}$  superó al testigo en la producción de azúcar en 19 a 25%; también la aplicación de vinaza fue superior a todos los tratamientos con fertilizante químico; posiblemente por su aporte de otros nutrimentos esenciales para el cultivo.

Berrocal (1987) evaluó el efecto de la incorporación de residuos de la agroindustria azucarera y alcoholera, sobre la producción de toneladas de caña de azúcar  $\text{ha}^{-1}$  en un vertisol. Los subproductos utilizados fueron 0, 60, 120 y 180  $\text{t ha}^{-1}$  de bagazo; 0, 12, 24 y 36  $\text{t ha}^{-1}$  de cachaza y 0, 120, 240, y 360  $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$  de vinaza. Los materiales empleados incrementaron el tonelaje y la madurez de la caña de azúcar, particularmente cuando se aplicaron dosis bajas. El rendimiento (kg de azúcar por  $\text{ton}^{-1}$  de caña) disminuyó por las dosis altas de los tres residuos, el rendimiento de caña se incrementó a dosis mayores excepto con el bagazo. Los mejores tratamientos fueron 60 t de bagazo, 24 t de cachaza y 120  $\text{m}^3$  de vinaza  $\text{ha}^{-1}$ , que superaron a los testigos con 1.83, 1.61 y 2.07 t de azúcar  $\text{ha}^{-1}$  respectivamente.

El estudio realizado por Subirós y Molina (1992) valoraron el efecto de 4 dosis de vinaza en las propiedades químicas de un inceptisol, durante dos zafra. En el primer año se empleó vinaza obtenida a partir de jugo de caña y en el segundo a partir de melaza. Los análisis confirmaron la acidez de la vinaza, así como considerables niveles de materia orgánica. Durante el primer año no se encontró ninguna variación significativa en el contenido de K a los 2 y 4 meses después de aplicado el producto; los demás elementos no variaron. El pH del suelo se mantuvo estable durante los muestreos y fue similar al del

testigo. En cuanto a la producción de caña y variables industriales, no hubo ningún efecto; tampoco ejercieron desequilibrio en las bases ni demás elementos.

La mayoría de los trabajos consultados reportan que la complementación con fertilizante químico es indispensable para alcanzar una mayor producción, debido principalmente a que la vinaza no presenta en su composición química un balance de N, P, K que esté de acuerdo con lo requerido por el cultivo de la caña de azúcar. Con la utilización de la vinaza como fertilizante, se obtuvieron rendimientos crecientes en caña de azúcar, sin necesidad de una fertilización mineral. Sin embargo, se pudo detectar que la complementación con fertilizante mineral es necesaria para alcanzar una mayor producción.

#### *c) Efecto en maíz*

García (1986) evaluó la eficiencia y rentabilidad del uso de vinaza como abono, así como su efecto sobre el cultivo de maíz y en las propiedades químicas del suelo. Los tratamientos analizados fueron: 40, 80 y 120 kg ha<sup>-1</sup> de N, usando como base nitrato de amonio, aplicado 22 días después de la siembra. 40, 80 y 120 kg ha<sup>-1</sup> de N de vinaza, en tres épocas diferentes: 24, 12 y 3 días antes de la siembra. El ensayo tuvo una duración de seis meses. A los 120 días después de la siembra se cosecharon las mazorcas de maíz en cada parcela útil, para determinar el rendimiento de grano. El rendimiento más alto de grano correspondió al tratamiento con 120 kg/ha de N en forma de nitrato de amonio, seguido por el de 120 kg ha<sup>-1</sup> de N al aplicar vinaza 24 días antes de la siembra. El mismo comportamiento se presentó con los promedios generales, ya que las parcelas que recibieron nitrato de amonio produjeron un rendimiento mayor que las adicionadas con vinaza (2.12 y 1.76 kg ha<sup>-1</sup> de grano de maíz, respectivamente). Para esta variable el rendimiento mayor se obtuvo con 120 kg ha<sup>-1</sup> de N y el menor con 80 kg ha<sup>-1</sup> de N. Ningún tratamiento produjo diferencias significativas en la altura de las plantas.

#### *d) Efecto en café*

Vargas (1987) evaluó los efectos de la vinaza en comparación con la fertilización mineral, recomendada en almácigos de café en bolsa, mediante la medición de variables de crecimiento (número de ramas plagiotrópicas, diámetro basal del tallo, crecimiento

ortotrópico, peso fresco de raíces y peso fresco del follaje) y el muestreo de suelo y follaje. Reportó que la fertilización, química u orgánica, produce efectos positivos en el crecimiento y desarrollo de los almácigos de café; y que la vinaza aplicada en fracciones superó al resto de los tratamientos en crecimiento ortotrópico, número de ramas plagiotrópicas, diámetro basal del tallo y peso fresco del follaje.

Para el caso de la fertilización mineral sólo el crecimiento ortotrópico alcanza diferencias estadísticas a favor de la combinación: fórmula integral - nitrógeno. Notó mejoras en la relación de pH y contenido en el suelo de potasio, fósforo y magnesio para tratamientos con vinaza.

#### *e) Efecto en Trigo*

Arafat y Yanssen (2002) evaluaron la eficiencia de fertilización con vinaza en trigo, detectando que la concentración de K en el grano de trigo y en la paja se incrementó ligeramente con las dosis altas de vinaza. Los valores mayores de absorción de K (122 mg maceta) se obtuvieron con la aplicación del 2% de vinaza, seguido por 119 mg por maceta con adiciones de 1% de vinaza y 115 mg para el tratamiento con fertilizante químico.

En general, el uso de vinaza como fertilizante ha causado un aumento significativo en el rendimiento en comparación con los fertilizantes químicos (N, P y K). Gómez (1996) y Pande (1994), citado por Arafat y Yanssen (2002) que reportan incrementos significativos en el rendimiento trigo, caña de azúcar y chícharo gandú con el uso de vinaza, respecto al uso de fertilizantes convencionales.

#### **4.1.2.6. Consideraciones sobre el uso de vinaza**

Actualmente se está estudiando la aplicación de vinaza de forma concentrada, diluida y mezclada con otros abonos o fuentes convencionales de fertilización, como la mezcla utilizada por Gómez (2009), de urea-vinaza que en un periodo de 30 días mostró pérdidas bajas de nitrógeno por volatilización, debido a que la vinaza concentrada (sin diluir) tienen características quelatantes, ligantes y encapsulantes, evitando pérdidas altas de nitrógeno.

El uso de la vinaza según García y Rojas (2006) se debe fundamentar en los siguientes conceptos:

*Doble capa difusa (DCD).*

Se refiere a la distribución de cargas que da como resultado la formación de una doble capa de iones; compuesta por las cargas de las arcillas, de algunos materiales complementarios como óxidos e hidróxidos de hierro (Fe) y aluminio (Al), materia orgánica y por los iones de carga opuesta que las neutralizan.

Las superficies de carga negativa atraen iones de carga opuesta con una fuerza de atracción que depende de la valencia del ión: los iones divalentes son atraídos por una fuerza dos veces mayor que los iones monovalentes por lo que una DCD compuesta por aquellos es más compacta. Cuando se aproximan dos laminillas de arcilla sus DCD se sobreponen y se produce una fuerza de repulsión entre los dos sistemas cargados positivamente, la cual es menor a medida que son más compactas las DCD, o sea cuando aumenta la concentración de sales en la solución y la valencia de los iones adsorbidos (Bohn, *et al.* 1993).

Las cargas se encuentran distribuidas uniformemente sobre la superficie y en los bordes rotos de las laminillas, estas cargas son neutralizadas por iones de carga contraria presentes en la solución del suelo que las rodea, los cuales son atraídos electrostáticamente hacia la superficie cargada negativamente en cuya proximidad se concentran y a medida que aumenta la distancia a la superficie tienden a estar menos concentradas (Talibudeen, 1981 citado por García y Rojas, 2006).

*Porcentaje de sodio intercambiable PSI*

Se conoce como nivel crítico de floculación la cantidad de sales que deben estar presentes en la solución para mantener el suelo o sus arcillas constituyentes agregadas a una condición dada de porcentaje de sodio intercambiable (PSI). Dicho de otra forma, para una arcilla dada existe una concentración mínima de electrolitos que causa agregación a un determinado valor de saturación de sodio, el cual se conoce como valor de floculación

(García y Rojas, 2006). En general, a mayor PSI (mayor contenido de sodio en la fase sólida del suelo) mayor debe ser la concentración de sales en la solución.

La mayoría de las investigaciones sobre vinazas se han realizado en suelos agrícolas de buena calidad como los Vertisoles, los cuales tienen una gran capacidad amortiguadora. Por ello se piensa que los suelos degradados son los más adecuados para la aplicación de vinaza (Bautista y Durán 1998). En algunos estudios en los que la vinaza se aplica al suelo no se han encontrado resultados que demuestren las bondades esperadas, probablemente por el empleo de aplicaciones aisladas que no alcanzan a ejercer efectos favorables (Subirós y Molina 1992).

Bautista y Durán (1998) mencionan que la aplicación de vinazas al suelo debe realizarse en el siguiente orden de prioridad: 1) suelos ácidos, 2) suelos degradados de baja calidad agrícola (erosionados, compactados, etc.) y 3) suelos agrícolas sin problemas; sugieren que a pesar de que la vinaza representa una fuente importante de nutrientes (sustancias húmicas, K, Ca y Mg) e incluso se utilice como enmienda para suelos degradados, existe el riesgo de salinización y modificación de las propiedades de las arcillas por el pH, alta conductividad eléctrica y contaminación del suelo con Zn el cual puede ser tóxico en condiciones ácidas; sin embargo, el aumento del pH por la aplicación de las vinazas ocasiona que las concentraciones de estos metales disminuyan.

Los mismos autores señalan que para las unidades Acrisol y Fluvisol de la zona cañera de Córdoba, Veracruz, se recomiendan las siguientes cantidades de vinazas:  $564 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  de vinazas, las cuales deben ser aplicadas en dos partes anuales, con el fin de evitar la formación de compuestos tóxicos como los ácidos orgánicos producidos bajo condiciones reductoras. Asimismo recomiendan monitorear la CE del suelo que reciba vinazas.

La Norma Oficial Mexicana NOM-064-ECOL-1994 establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la industria de la destilería; sin embargo, no existe normatividad para la

aplicación de vinaza en suelos, a pesar de que dicha práctica es común en las áreas de abasto de los ingenios cañeros.

La Normativa P4. 231 (CETESB 2005) regula el uso de la vinaza en Brasil, indicando plazos para el cierre de canales y embalses, dosis altas de aplicación si la capacidad de intercambio catiónico es menor a 5%; y si este valor ya se ha rebasado, la normativa permite sólo el uso de K para ser utilizado por la caña en ese año. Con la normativa actual para el uso de la vinaza, muchas zonas de Brasil sufren restricciones y la industria azucarera planea llevar la vinaza a mayores distancias. Otra opción bajo estudio es la concentración de vinaza.

Gómez (1996) indica necesario conocer el efecto potencial de la vinaza, a mediano y a largo plazo, sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, en especial aquellas relacionadas con el movimiento de agua y aire en el suelo, la salinidad, los desbalances nutricionales y con la microflora del suelo, los cuales son importantes en la recuperación y/o mantenimiento de la vida en el suelo, indispensable para el logro de una agricultura sostenible.

### **4.3. El potasio**

A diferencia del nitrógeno (N), el fósforo (P) y otros nutrientes, el K no forma parte de la estructura química de la planta y una gran parte aparece como constituyente del jugo celular de las células de todos los órganos de la planta, dentro de la cual es móvil. La importancia del Potasio como elemento nutritivo esencial para las plantas también se debe a que es requerido en cantidad semejante a la del nitrógeno (Mengel y Kirkby, 1987).

El  $K^+$  cumple un rol importante en la activación del número de enzimas (más de 60), que intervienen en la fotosíntesis, síntesis de proteínas y carbohidratos, crecimiento meristemático y regulación del balance hídrico de la célula; al actuar en estos procesos metabólicos el  $K^+$  favorece el crecimiento vegetativo, fructificación, maduración y calidad de frutos (Mengel y Kirkby, 1987).

El  $K^+$  es un elemento esencial para el crecimiento vegetal y su importancia en la agricultura es bien reconocido (Sparks, (1985) y Huang, 2005). El  $K^+$  del suelo generalmente se encuentra cuatro formas: en la solución, intercambiable, no intercambiable y en los minerales (Sparks, 1987).

Jalali (2008) señala que para la óptima nutrición de un cultivo, el  $K^+$  en solución del suelo y el  $K^+$  intercambiable necesitan ser reemplazados continuamente, a través de la meteorización de minerales; ya que el poco remplazo del  $K^+$  en solución del suelo es afectada principalmente por la liberación de  $K^+$  no intercambiable de los minerales de arcilla y materia orgánica.

Barber (1984) menciona que la absorción nutrimental de potasio por las plantas ocurre por difusión, movimiento de iones de una zona de alta a otra de baja concentración tendiendo a un equilibrio, así las raíces de las plantas tienen acceso a iones  $K^+$  a partir de la solución del suelo. Entre los factores que afectan dicho proceso están la humedad edáfica, estructura de poros, concentración nutrimental, especie vegetal y etapa de crecimiento.

Según Mengel (1982) la absorción de  $K^+$  para las plantas ocurre de acuerdo a la concentración de dicho ion en el exterior de las raíces, y puede darse bajo dos condiciones: A concentración de  $K^+$  de aproximadamente  $0.5 \text{ mmol L}^{-1}$  en la solución del suelo (proceso selectivo) y A concentraciones de  $K^+$  mayores a  $50 \text{ mmol L}^{-1}$  (menos selectivo).

#### **4.3.1 Potasio y aplicaciones de vinaza**

Gómez (2009) señala que en las plantas productoras de vinaza en Brasil y Australia se preparan soluciones fertilizantes que contienen vinaza, urea, fosfatos y azufre, tomando como base el contenido de potasio. Ejemplo: la dosis de  $60 \text{ kg ha}^{-1}$  de K se obtiene con una mezcla de 1300 kg de vinaza sin diluir más 350 kg de urea (160 kg de N).

Estudios realizados por Bebe *et al.* (2009), en suelos de baja fertilidad, demuestran un incremento del potasio disponible en el suelo, especialmente en los primeros 10 cm de

profundidad, demostrando que en los suelos aplicados con vinaza el potasio es retenido y no se lixivía.

#### **4.3.2. Lixiviación de Potasio en el suelo**

Existe escasa información sobre la lixiviación del K, ya que este elemento no contribuye directamente a la contaminación ambiental. Los reportes revisados indican que el K es un ión móvil en el perfil del suelo, por lo que cantidades significativas pueden moverse a capas profundas (Quemener, 1986) afectando a la eficacia de los fertilizantes aplicados.

El potasio del suelo puede perderse por lavado y por erosión, y ser fijado por los minerales arcillosos (quedando disponible lentamente). Las pérdidas por lavado dependen del clima y de la naturaleza del suelo, por lo que los suelos con alta capacidad de cambio tienen menores pérdidas que los arenosos. En cuanto a facilidad de elusión, el K ocupa un lugar intermedio entre el amonio y el calcio, y semejante al magnesio (Roldán *et al.* 2004).

La lixiviación de nutrientes en los agroecosistemas es influenciada por factores edafológicos y climáticos, y la relación suelo-planta. Los factores edáficos que afectan la tasa y la masa total de los iones lixiviados son: textura, capacidad de intercambio catiónico y aniónico, la cantidad total y la tasa de precipitaciones, y las condiciones hídricas (Salcedo *et al.* 1988).

En el estudio que realizó Gómez (1995), sobre el contenido de K intercambiable a diversas profundidades, después de aplicar vinaza a un cultivo de caña de azúcar, concluye que la escasa lixiviación del potasio intercambiable en el suelo puede provocar, a largo plazo, un exceso de este elemento en la estrato de 0-20 cm, lo cual ocasiona una serie de problemas, relacionados con la calidad del producto obtenido de la caña de azúcar, con un posible incremento de la salinidad, esto debido a la posible formación de sales potásicas y un desbalance nutricional limitando la absorción de otros nutrimentos catiónicos.

Roldán *et al.* (2004) mencionan que el suministro de  $K^+$ , después de cosechar un cultivo disminuya en una cantidad equivalente al  $K^+$  extraído por las plantas. Sin embargo, para la mayoría de los suelos, el  $K^+$  intercambiable después del cultivo es mayor que la diferencia entre el inicial y el extraído por la cosecha. Esto indica que los suelos tienen capacidad para suministrar  $K^+$  a las plantas de las formas no intercambiables y para reponer en parte el  $K^+$  intercambiable tomado por éstas. Este suministro de  $K^+$  no es más que una manifestación del “equilibrio del potasio” en el suelo. Cuando las plantas al tomar el elemento, disminuyen la concentración de las formas solubles e intercambiables, algo de  $K^+$  presente en las formas no intercambiables debe desplazarse hacia las formas intercambiables o solubles.

Oliveira *et al.* (2002) realizaron un experimento con lisímetros en un suelo arenoso cultivado con caña, para evaluar la lixiviación de nitrógeno derivado de urea  $^{15}N$  (0, 30, 60 y 90 kg ha<sup>-1</sup>), así como de  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$ ; el volumen total de agua recibida por en el suelo fue 2.015 mm, 1.255 mm como lluvia y 760 mm como riego. La pérdida de  $^{15}N$  por lixiviación de los fertilizantes no se detectó. Las medias de lixiviados para pérdidas de nitratos y amonio durante el período experimental de 11 meses fueron: 4,5 kg ha<sup>-1</sup> para  $^{15}N$ ; 13, 320 y 80 kg ha<sup>-1</sup>  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$ , respectivamente.

Navarro (2003) indica que el incremento de pH y la presencia de  $Ca^{+2}$  en la disolución del suelo favorecen la liberación de potasio atrapado en las unidades cristalinas de las arcillas ya que el  $Ca^{+2}$  tiene un volumen mayor que  $K^+$ , y cuando se introduce dentro de los espacios interlaminares permiten la salida del potasio.

La mineralización del N orgánico en nitrato y el desgaste de los minerales mantienen la concentración de  $Ca^{2+}$  en la solución del suelo, aumentando así las pérdidas de  $K^+$  (Jalali y Rowell, 2003).

Johnston y Goulding (1992) citado por Kolahchi y Jalali (2007) sugieren que aproximadamente 1 kg  $K^+$  ha<sup>-1</sup> es perdido por cada 100 mm de agua lixiviada a través del suelo arenoso, y que dicho valor de  $K^+$  pueden ser más alto únicamente si la solución en el suelo contiene una alta concentración de iones  $Ca^{2+}$

Para medir la lixiviación de K se recomienda el uso de lisímetros superficiales (cápsulas cerámicas porosas), técnica apropiada y ampliamente utilizada en suelos de drenaje libre (Webster *et al.* 1993); los lisímetros disminuyen los problemas con el muestreo, ya que el volumen de la solución de filtrado y el contenido de nutrientes permiten la cuantificación de las pérdidas por lixiviación con más precisión que otros métodos (Ng Kee Kwong y Deville, 1984).

#### **4.3.3. Factores reguladores de la lixiviación de potasio**

Según Navarro (2003), el potasio no intercambiable no está sujeto a lixiviación y se mantiene retenido, reconvirtiéndose lentamente a formas asimilables, de acuerdo a los siguientes factores de regulación:

- La composición coloidal del suelo,
- Condiciones de humedad o sequedad;
- Temperatura y
- pH del suelo.

#### **Resumen:**

Con base en lo revisión bibliográfica se concluye que a pesar de los posibles efectos contaminantes de la descarga incontrolada de vinaza en el suelo, hay información que sustenta el efecto benéfico que sobre la fertilidad del suelo, genera la adecuada aplicación de vinaza. Sin embargo, aún se desconocen los efectos a largo plazo y particularmente en cuales suelos es conveniente aplicar vinaza, así como de su efecto con los flujos de agua, nutrientes y compuestos orgánicos relacionados con la aplicación de vinaza hacia capas más profundas del suelo; lo cual es fundamental evaluar con el objetivo de favorecer su aprovechamiento en la nutrición de cultivos y mitigar su impacto negativo en la calidad del agua y suelo.

## 5. MATERIALES Y METODOS

### 5.1. Ubicación cartográfica y descripción del sitio de muestreo

La presente investigación se realizó en el invernadero del Postgrado de Hidrociencias del Colegio de Posgraduados, Campus Montecillo, Edo. de México; el suelo utilizado fue de la región cañera del Ingenio el Potrero Nuevo, municipio de Atoyac, Veracruz. El sitio de colecta del suelo se localiza a 18°52'40.548" de latitud norte y 96°48'11.375" de longitud oeste y tiene una elevación de 542 msnm.

El área de muestreo Pertenece al Eje Neovolcánico Transversal, particularmente a la Subprovincia de las Sierras Orientales. (INEGI, 1985) La morfología del Valle de Atoyac corresponde a una planicie de piedemonte (Rivas *et al.* 1996), que se extiende al pie de los sistemas montañosos y serranías que rodean a la Ciudad de Córdoba; el suelo del área de abastecimiento del ingenio el Potrero se clasifica como fluvisol vertico. La precipitación anual para la zona (INEGI, 1984) para la estación el Potrero es de 1200 a 1400 mm. La vegetación original era encino (*Quercus oleoides*), así como selva mediana subperennifolia (Chiang, 1970), en su lugar existen plantaciones de caña.

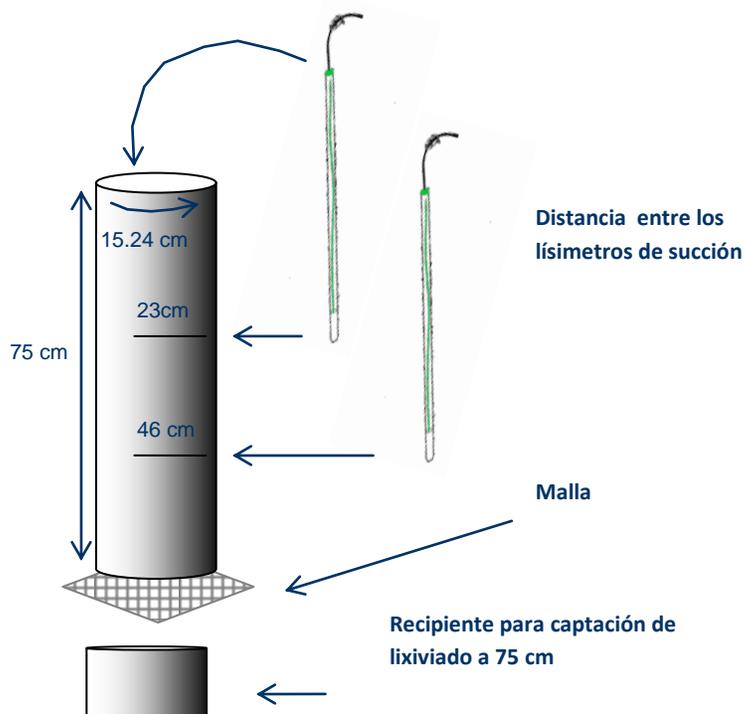
En el presente estudio se registraron las temperaturas máximas y mínimas diarias dentro del invernadero usado; durante el desarrollo del experimento (diciembre a abril) las temperaturas máxima y mínima promedio fueron: 30.45 °C y 7.5 °C, respectivamente.

### 5.2. Columnas inalteradas de suelo

Para obtener las columnas inalteradas de suelo se emplearon 6 tubos de cloruro de polivinilo (p.v.c.) con 15.24 cm de diámetro interior y 75 cm de longitud (*Figura 1*). En la parte inferior del tubo (75 cm) se colocó malla de plástico con orificios de apertura menor a 1 mm, para contener el suelo dentro de la columna y sólo permitir el flujo del lixiviado; la malla fue sujeta con alambre galvanizado al tubo.

### 5.2.1. Suelo

En el sitio de colecta del suelo se cavó un perfil de 80 cm de profundidad (*Figura 2*) para reproducir las capas de dicho perfil en los tubos diseñados para contener columnas inalteradas de 12.6 dm<sup>3</sup> de suelo. En cada una de estas se instalaron 2 lisímetros de succión a 23 y 46 cm de profundidad, manipulando lo menos posible el suelo para no destruir los poros y raíces existentes (*Figura 3*). En el sitio de colecta del suelo se tomaron muestras de 1 kg a tres profundidades para representar los estratos de 0-23 cm, 23-46 cm y de 46-69 cm, y se etiquetaron para su posterior análisis de fertilidad. Las columnas inalteradas de suelo se utilizaron para simular el perfil del suelo y para el establecimiento del cultivo de alfalfa en condiciones de invernadero; al finalizar el experimento se extrajo el suelo de cada columna y se tomaron 4 muestras a diferente profundidad para cada columna.



*Figura 1.* Diseño de columna de PVC



*Figura 2.* Perfil del sitio de muestreo



*Figura 3.* Llenado de columnas

### **5.2.2. Vinaza**

La toma de muestra se realizó del canal de vinaza; punto cercano a la alcoholera de Zapopan, S. A. de C.V., ubicada en el km. 9 de la carretera Potrero Atoyac a 1 km al este de la población Potrero Nuevo en el municipio de Atoyac, Veracruz. Para ello se siguió lo indicado en la el PROY-NMX-AA-003/1-SCFI-2008, que contiene detalles sobre el muestreo aguas residuales: industriales, crudas y aguas de desecho domésticos tratadas.

En la toma de muestras de vinaza se utilizaron 2 frascos estériles de cristal de 3.4 l, para preservar las muestras durante el traslado se usó una hielera y finalmente se almacenaron a 4° C, para evitar la fermentación de la vinaza.

### **5.2.3. Agua**

El agua utilizada para riego de la alfalfa (*Medicago sativa*) durante el estudio fue de un pozo profundo que abastece al invernadero. Para la caracterización química de dicha agua se tomaron tres muestras directamente de la llave que está dentro del invernadero.

### **5.2.4. Planta**

Se realizaron dos cortes al cultivo de alfalfa en el lapso de 132 días. Las plantas de cada columna se cortaron 5 cm de la base, después se almacenaron en bolsas rotuladas de papel, para su secado, pesado, preparación y análisis químico.

## **5.3. Montaje experimental**

### **5.3.1. Instalación de columnas en invernadero**

Las columnas de suelo se colocaron sobre una estructura de fierro, con seis divisiones donde se acoplaron las columnas, asegurando una posición vertical y poder colectar el lixiviado de la parte inferior de la misma.

### **5.3.2. Establecimiento del cultivo**

Las semillas de alfalfa se depositaron en la parte superior (0.01824 m<sup>2</sup>) de las columnas inalteradas de suelo, utilizando una densidad de siembra equivalente a 30 kg semilla ha<sup>-1</sup>; lo que resultó en 0.0547 g de semilla por columna. Se usó la variedad inoculada Júpiter.

#### **5.4. Descripción de tratamientos**

Se aplicaron dosis de K equivalente a 500 y 250 kg ha<sup>-1</sup> en forma de vinaza, la cual tuvo un contenido de K de 7358 mg L<sup>-1</sup>. El control de humedad en la columna fue por diferencia de peso, manteniendo las columnas a capacidad de campo.

Descripción de tratamientos

1. Columna de suelo + 124 mL de vinaza (equivalente a 500 kg ha<sup>-1</sup> de K).
2. Columna de suelo + 62 mL de vinaza (equivalente a 250 kg ha<sup>-1</sup> de K).
3. Columna de suelo sin aplicación de vinaza (control).

#### **5.5. Proceso de lixiviado**

Este proceso inicio a los 14 días después de que germinó la alfalfa, después de aplicar los tratamientos; la periodicidad en toma y medición de lixiviados o efluentes fue de 2 por cinco ocasiones; posteriormente se realizó cada 4 y finalmente cada 7 días. Previo a la colecta de la solución del suelo, los lisímetros se mantuvieron al vacío (2 atmósferas), dentro del tubo toma muestras, que sobrepasa la tensión del agua del suelo. Esto estableció un gradiente hidráulico para que la solución fluyera a través de la tapa cerámica porosa y entre en el tubo del lisímetro, facilitando el proceso de lixiviación. Para la succión se utilizó una jeringa de 30 cm<sup>3</sup>.

#### **5.6. Métodos utilizados en análisis de muestras**

##### **5.6.1. Vinaza**

La caracterización de la vinaza se realizó en el Laboratorio Nacional de Fertilidad de Suelos y Nutrición Vegetal (INIFAP), ubicado en el campo experimental Bajío. Los resultados se reportan en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Análisis de principales constituyentes químicos en la vinaza

| Determinación                            | Unidades           | Resultado I | Método Utilizado      |
|--|--------------------|-------------|-----------------------|
| pH                                       |                    | 3.96        | Potenciómetro directo |
| Conductividad Eléctrica                  | dS m <sup>-1</sup> | 26.445      | Conductímetro directo |
| Humedad                                  | %                  | 81.08       | Gravimetría           |
| Cenizas                                  | %                  | 4.99        | Calcinación a 600 °C  |
| Materia Orgánica                         | %                  | 13.93       | Calculado             |
| Nitrógeno Total                          | %                  | 0.55        | Micro Kjeldah         |
| Amonio NH <sub>4</sub>                   | ppm                | 8.74        | Arrastre de Vapor     |
| Nitratos NO <sub>3</sub>                 |                    | 124.32      | Arrastre de Vapor     |
| Nitrógeno Inorgánico                     | ppm                | 157.92      | Arrastre de Vapor     |
| Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) | ppm                | 896 (0.09%) | Espectrofotometría    |
| Potasio (K <sub>2</sub> O)               | %                  | 0.77        | Absorción atómica     |
| Relación C/N                             |                    | 13.91       | Calculado             |
| Calcio                                   | ppm                | 5200        | Emisión Atómica (ICP) |
| Magnesio                                 | ppm                | 1000        | Emisión Atómica (ICP) |
| Azufre (S-SO <sub>4</sub> )              | ppm                | 17900       | Emisión Atómica (ICP) |
| Sodio                                    | ppm                | 400         | Emisión Atómica (ICP) |
| Zn                                       | ppm                | 14.9        | Emisión Atómica (ICP) |
| Fe                                       | ppm                | 11.31       | Espectrofotometría    |
| Cu                                       | ppm                | 12.239      | Espectrofotometría    |
| Mn                                       | ppm                | 20.491      | Espectrofotometría    |

### 5.6.1.1. Interpretación del análisis de vinaza como descarga residual

En la interpretación de las características de la vinaza se usó la NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. En este estudio el tipo de receptor es el suelo y los valores promedio mensuales son: Cu, 4 mg L<sup>-1</sup> y Zn, 10 mg L<sup>-1</sup> (Anexo 1), por lo que los valores encontrados (Cu de 12.23 mg L<sup>-1</sup> y 14.9 de Zn mg L<sup>-1</sup>) en la vinaza usada rebasan los límites máximos permisibles.

El promedio mensual se refiere al valor que resulte de calcular el promedio ponderado en función del caudal, es decir de los valores que resulten del análisis de al menos dos muestras compuestas (Promedio diario).

En el caso de la NOM-064-ECOL-1994, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la

industria de la destilería, exige cumplir con las especificaciones siguientes, para muestras simples instantáneas: pH de 6 a 9, 12 mg N total L<sup>-1</sup>, 5 mg P L<sup>-1</sup>; para el caso de metales pesados la Norma no establece niveles máximos permisibles. En nuestro estudio las concentraciones de pH, N total y P de la vinaza se encuentran fuera del límite permisible que establece dicha norma.

El valor de conductividad eléctrica de la vinaza usado en el presente estudio indica alto riesgo de salinidad (Richards, 1990), dicho riesgo se debe a la presencia de los iones H<sup>+</sup> y OH<sup>-</sup> los cuales presentan mayor conductancia eléctrica y movilidad iónica (Bautista *et al.* 2000 a).

#### **5.6.1.2. Vinaza como insumo de nutrición vegetal**

Las concentraciones de K de la vinaza (K<sub>2</sub>O 0.77%) son menores a las de fertilizantes potásicos (KCl, 60% de K<sub>2</sub>O; K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 22 % de K<sub>2</sub>O); sin embargo, se considera una enmienda orgánica (Seoáñez *et al.* 2003) y al igual que otros abonos minerales mejora sensiblemente la productividad del suelo y de cultivos como el de la caña de azúcar. Para N (0.55 %) y P (0.09 %) las concentraciones de la vinaza son muy bajas.

#### **6.5.2. Agua**

El agua que se utilizó a lo largo de experimento, fue analizada en el laboratorio del Postgrado de Hidrociencias, para ello se tomaron 3 muestras de agua de la llave que está en el invernadero. Los parámetros analizados se muestran en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Determinaciones realizadas a muestras de agua

| Parámetros determinados            | Método empleado               |
|------------------------------------|-------------------------------|
| pH                                 | Potenciómetro                 |
| CE                                 | Conductímetro                 |
| Temperatura                        | Termómetro                    |
| <i>Aniones</i>                     |                               |
| CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>      | Titulación con ácido          |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>      | Titulación con ácido          |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>      | Gravimetría                   |
| Cl <sup>-</sup>                    | Titulación (nitrato de plata) |
| <i>Cationes</i>                    |                               |
| Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup> | Titulación (EDTA)             |
| Ca <sup>2+</sup>                   | Titulación (EDTA)             |
| Na <sup>+</sup>                    | Flamometría                   |
| K <sup>+</sup>                     | Flamometría                   |

### 5.6.2.1. Descripción de metodologías utilizadas para muestras de agua

Las metodologías para el análisis del agua que se usó para el riego en este estudio se tomaron de Eaton (1995) y a continuación se describen.

#### 1. Conductividad eléctrica

El método está basado en la capacidad del agua para conducir electricidad ya que el agua en su condición pura es un mal conductor de electricidad, pero en la medida que se incrementa su concentración de sales también aumenta su capacidad para conducir corriente eléctrica.

*Procedimiento:* En la determinación de la conductividad eléctrica se utilizó un puente de lectura directa. Se sumergió la celda en la muestra de agua y registró la lectura y al mismo tiempo se midió la temperatura de la solución para realizar las correcciones.

$$CE = (CE)(F_x)(F_c) = \mu mhos/cm$$

## **2. pH**

El pH es un índice que caracteriza el grado de acidez o basicidad de un medio y corresponde al logaritmo negativo de la concentración del ión hidrógeno. En las aguas usadas para riego el pH normal se encuentra entre los valores 6.5 y 8.4.

*Procedimiento:* se determinó el pH de la solución a través del uso de un potenciómetro con electrodo de vidrio (“pH meter”). Los electrodos se mantiene en la solución hasta obtener una lectura constante. El aparato registra la diferencia entre la actividad del ión H<sup>+</sup> en la muestra de agua y el electrodo generando un impulso eléctrico que es registrado por un lector gráfico. Las soluciones para calibrar fueron Tampon pH 7.01 y Buffer pH 4.0.

## **3. Determinación de Carbonatos (CO<sub>3</sub>) y Bicarbonatos (HCO<sub>3</sub>)**

Para hacer estas determinaciones se usó el método consistente en titulación con ácido.

*Reactivos para (CO<sub>3</sub>):*

- 2 mL de Alícuota.
- Solución de fenolftaleina al 0.25% en alcohol al 50% (5 gotas).
- Ácido sulfúrico estándar 0.01 N.
- Anaranjado de metilo al 0.1% (2 gotas).

*Reactivos para (HCO<sub>3</sub>):*

- Solución de fenolftaleina al 0.25% en alcohol al 50% (5 gotas).
- Ácido sulfúrico estándar 0.01 N.
- Anaranjado de metilo al 0.1% (2 gotas).

*Procedimiento:* En primer lugar se determina la concentración de carbonatos, para lo cual se toma una alícuota de 2 mL, se agregan 5 gotas de fenolftaleina, y se titula con ácido sulfúrico hasta que la muestra presenta una tonalidad blanquecina. Posteriormente, sobre la misma muestra se determina la concentración de bicarbonatos para lo cual se agregan 2

gotas de anaranjado de metilo y se vuelve a titular con ácido sulfúrico 0.01 N hasta obtener una tonalidad color durazno.

#### ***4. Determinación de Cloruro***

Para determinar cloruros se usó el método basado en titulación con nitrato de plata.

Reactivos:

- Indicador de cromato de potasio (2 gotas).
- Solución estándar de nitrato de plata 0.01 N.

*Procedimiento:* a 1 mL de muestra se le agregan 2 gotas del indicador cromato de potasio y se titula con nitrato de plata hasta obtener un color rojo ladrillo.

#### ***5. Determinar Calcio más Magnesio (Ca+Mg)***

La determinación de estos elementos se realizó por titulación con etilen-diamino-tetraacetato (EDTA).

Reactivos:

- Solución amortiguadora Buffer (5 gotas).
- Indicador Negro T de eriocromo (una pizca).
- Etilen-diamino-tetraacetato 0.01 N.

*Procedimiento:* En una muestra de 2 mL se agregan 5 gotas de la solución amortiguadora Buffer, posteriormente se introduce una pizca del indicador negro de eriocromo. Finalmente se tituló con EDTA hasta obtener un color azul.

#### ***6. Determinación de Calcio (Ca)***

La determinación de calcio en la muestra de calcio se realizó por titulación con etilen-diamino-tetraacetato (EDTA).

Reactivos:

- Solución amortiguadora hidrato de sodio NaOH normalidad para  $\text{Ca}^{++}$  (5 gotas).

- Indicador murexida para calcio (una pizca).
- Etilen-diamino-tetraacetato 0.05 N.

*Procedimiento:* En una muestra de 2 mL se agregan 5 gotas de la solución amortiguadora hidrato de sodio NaOH<sub>4</sub> normalidad para Ca<sup>2+</sup>, posteriormente se introduce una pizca del indicador murexida. Finalmente se titula con EDTA hasta obtener un color morado.

### 7. Potasio y sodio por flamometría

*Procedimiento:* Se utilizó un aparato AutoCal Flame-Photometer 643. Para comenzar la determinación en primer lugar se coloca una solución de Cesio, luego se abre la válvula de gas LP, se calibra con solución estándar 140 meq L<sup>-1</sup> de sodio y 5 meq L<sup>-1</sup> de potasio. Finalmente se ajusta el equipo a ceros con agua destilada y se prende la flama. El equipo es alimentado con alícuotas de 1 mL y se registran las lecturas en meq L<sup>-1</sup>.

#### 5.6.2.2. Resultados del análisis

Los resultados del análisis del agua (Cuadro 4) utilizada para el riego del cultivo de alfalfa durante el experimento no mostró ningún grado de restricción para uso agrícola, según la Clasificación para Salinidad y el Índice de Permeabilidad contra Relación de Adsorción de Sodio (RAS= 0.58 meq L<sup>1</sup>), indicadas por Ayers y Westcot (1987).

Cuadro 4. Concentraciones de iones presentes en el agua de riego utilizada

| CE                           | pH    | ANIONES                        |                  |      |                 | Σ           | CATIONES |     |      |      | Σ            | RSE   | RSC |  |
|------------------------------|-------|--------------------------------|------------------|------|-----------------|-------------|----------|-----|------|------|--------------|-------|-----|--|
|                              |       | CO <sub>3</sub>                | HCO <sub>3</sub> | Cl   | SO <sub>4</sub> | ANIONE<br>S | Ca       | Mg  | Na   | K    | CATIONE<br>S |       |     |  |
| <i>μmhos cm<sup>-1</sup></i> | ----- | -----meq L <sup>-1</sup> ----- |                  |      |                 |             |          |     |      |      |              | ----- |     |  |
| 366                          | 7.4   | 0                              | 1.76             | 0.38 | 1.04            | 3.178       | 0.4      | 2.0 | 0.64 | 0.04 | 3.08         | 310   | 280 |  |

### 5.6.3. Lixiviados

#### 5.6.3.1. Análisis de lixiviados

Los lixiviados se extrajeron con una jeringa de 30 mL, posteriormente se almacenaron en tubos de cristal de 15 mL, refrigerándolos a 4° C en espera de las determinaciones citadas en el Cuadro 5. Las metodologías empleadas para el análisis de lixiviados fue similar a la descrita anteriormente para el análisis de agua.

Cuadro 5. Determinaciones realizadas a lixiviados

| Parámetros determinados | Método empleado/Equipo            |
|-------------------------|-----------------------------------|
| pH                      | Potenciómetro                     |
| Temperatura             | Termómetro                        |
| CE                      | Conductímetro                     |
| K soluble               | Emisión atómica (ICP)/ flamómetro |

#### 5.6.4. Suelo

Al inicio y al final del experimento, las muestras de suelo fueron secadas y tamizadas (malla No. 2) y posteriormente se les determinaron las características que se presentan en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Determinaciones realizadas a muestras de suelo

| Determinación                     | Unidades reportadas                         | Método / Equipo                   |
|-----------------------------------|---|-----------------------------------|
| pH                                |   | Potenciómetro (Hanna Instruments) |
| CE                                | 1:5 H <sub>2</sub> O mmhos cm <sup>-1</sup> | Conductímetro                     |
| Materia Orgánica (M.O.)           | %   | Walkley y Black                   |
| Nitrógeno (N)                     | %   | Micro- Kjeldahl                   |
| Fósforo (P)                       | ppm   | Olsen                             |
| Potasio (K) soluble               | ppm   | Flamometría                       |
| Calcio (Ca <sup>2+</sup> )        | µg mL <sup>-1</sup>                         | Acetato de amonio                 |
| Magnesio (Mg <sup>2+</sup> )      | µg mL <sup>-1</sup>                         | DTPA                              |
| Manganeso (Mn)                    | ppm   | Acetato de amonio                 |
| Cobre (Cu)                        | ppm   | DTPA                              |
| Fierro (Fe)                       | ppm   | DTPA                              |
| Zinc (Zn)                         | ppm   | DTPA                              |
| Sodio (Na <sup>2+</sup> ) soluble | ppm   | Flamometría                       |
| NH <sub>4</sub>                   | mg L <sup>-1</sup>                          |                                   |
| NO <sub>3</sub>                   | mg L <sup>-1</sup>                          |                                   |

#### 5.6.4.1. Descripción de metodologías utilizadas para muestras de suelo

El análisis se realizó de acuerdo al método descrito por la NOM-021-SEMARNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos.

##### 1.-pH del suelo

*Procedimiento para extractos de saturación* (Richards, 1990)

1. Pesar 250 g de suelo, previamente tamizado, malla 2 mm.
2. En un recipiente de mayor capacidad se mezcla el suelo con agua destilada, usando una espátula.
3. Al saturarse el suelo se forma una pasta, que brilla por reflexión de la luz, fluye ligeramente si se inclina el recipiente. La pasta debe deslizarse fácilmente de la espátula.
4. Dejar reposar durante 1 h.
5. La pasta saturada se coloca en embudos con papel filtro y se aplica vacío, el extracto se recibe en un recipiente.
6. Se toma las lecturas de pH, CE y bases intercambiables.

El método potenciométrico (Bates, 1983) o electroquímico para medir pH de un suelo es el más utilizado. Con este método se mide el potencial de un electrodo sensitivo a los iones  $H^+$  (electrodo de vidrio) presentes en una solución; se usa como referencia un electrodo cuya solución problema no se modifica cuando cambia la concentración de los iones por medir, que es generalmente un electrodo de de Ag/AgCl. El electrodo, a través de sus paredes, desarrolla un potencial eléctrico. En la práctica se utilizan soluciones amortiguadoras, de pH conocido, para calibrar el instrumento y luego comparar, ya sea el potencial eléctrico o el pH directamente de la solución por evaluar.

#### *Procedimiento*

- 1) Pesar 1 g de suelo y colocarlo en un vaso de precipitado de 25 mL.
- 2) Agregar 10 mL de agua destilada.
- 3) Agitar y dejar reposar 10 minutos.
- 4) Ajustar el potenciómetro con las soluciones amortiguadoras.
- 5) Pasados los 10 minutos, medir el pH con el potenciómetro.

Las soluciones para calibrar fueron Tampon pH 7.01 y Buffer pH 4.0

## **2. Conductividad eléctrica**

La conductividad eléctrica es la capacidad de una solución acuosa para transportar una corriente eléctrica, que generalmente se expresa en mmhos/cm o en mSiemens/m; la NOM-021-RECNAT-2000 establece dSiemens/m a 25°C.

El método de la conductividad eléctrica se realiza por medio de un conductímetro sobre una muestra de agua o extracto de suelo. Los electrodos son de platino y en ocasiones pueden llevar un recubrimiento de platino negro o grafito; estos se encuentran sellados dentro de un tubo de plástico o vidrio (celda), de tal manera que este aparato puede ser sumergido en el líquido por medir. La resistencia eléctrica a través de los electrodos se registra a una temperatura estándar, generalmente 25°C.

La temperatura afecta la conductividad y varía alrededor de 2% por cada grado Celsius. Para esta determinación no se permite la preservación química de las muestras.

### *Soluciones*

Solución estándar de cloruro de potasio (KCl) 0.1 N. Disolver 0.7455 g de KCl en agua destilada y aforar a 100 mL.

Solución estándar de cloruro de potasio (KCl) 0.01 N.

Tomar una alícuota de 10 mL de la solución estándar de KCl 0.1 N y aforar a 100 mL.

### *Procedimiento*

#### *a) Preparación de la pasta de saturación.*

1. Pesar 40 g de suelo seco y colocarlo en un recipiente de plástico, si el suelo es arenoso o migajón arenoso pesar 600 g.
2. Agregar agua destilada con la bureta y mezclar con la espátula hasta saturación.
3. Golpear el recipiente con cuidado sobre la mesa de trabajo para asentar el suelo.
4. La pasta estará lista cuando se observe un brillo en su superficie (formación de un espejo), esto no sucede en el caso de suelos con alto contenido de arcilla.
5. Anotar el volumen de agua gastado (mL).
6. Dejar reposar la pasta durante una hora y comprobar a criterio su saturación.
7. Tapar el recipiente y dejarlo reposar por tres horas, excepto suelos arcillosos que deben dejarse reposar 24 horas.

#### *b) Obtención del extracto del suelo.*

1. Colocar papel filtro sobre el embudo, humedecerlo con agua destilada, dejando drenar el exceso. Conectar el sistema de filtración al vacío.
2. Mezclar nuevamente la pasta y colocarla en el embudo y aplicar vacío.
3. Obtener un extracto de aproximadamente 50 mL.

#### *c) Determinación de la conductividad eléctrica.*

- 1 Calibrar el conductímetro. Antes de usar el medidor de conductividad debe calibrarse con una solución estándar. Para esto se requiere de dos soluciones de KCl, 0.1 N y 0.01 N, con cada una se ajusta el equipo a la conductividad indicada en la tabla 4.2.
- 2 Leer la conductividad eléctrica y la temperatura del extracto. Si la lectura se toma en  $\mu\text{mhos}$ , transformar los resultados a  $\text{mmhos}$  o  $\text{dS}$  dividiendo entre 1 000.

- 3 Si es necesario, hacer corrección consultando la tabla de factores de corrección para diferentes temperaturas, se multiplica el resultado de conductividad eléctrica por el valor correspondiente.

### **3. *Materia orgánica***

La determinación de materia orgánica del suelo se evalúa a través del contenido de carbono orgánico con el método de Walkley y Black. Este método se basa en la oxidación de carbono orgánico del suelo por medio de una disolución de dicromato de potasio y el calor de reacción que se genera al mezclarla con ácido sulfúrico concentrado. Después de cierto tiempo de espera la mezcla se diluye, se adiciona ácido sulfúrico para evitar interferencias de  $\text{Fe}^{3+}$  y el dicromato residual valorado con sulfato ferroso. Con este procedimiento se detecta entre un 70 y 84 % del carbón orgánico total por lo que es necesario introducir un factor de corrección, el cual puede variar dependiendo del suelo. En suelos de México se recomienda utilizar el factor 1.298 (1/0.77).

1. Pesar 0.5 g de suelo seco y pasado por un tamiz de 0.5 mm y colocarlo en un matraz Erlenmeyer de 500 mL. Procesar un blanco de reactivos por triplicado.
2. Adicionar 10 mL de dicromato de K 1 N girando el matraz, para que entre en contacto con todo el suelo.
3. Agregar con una bureta 20 mL de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentrado, girar el matraz y agitar de esta forma durante un minuto.
4. Dejar reposar durante 30 minutos sobre una superficie de madera.
5. Añadir 200 mL de agua destilada.
6. Añadir 5 mL de  $\text{H}_3\text{PO}_4$  concentrado.
7. Adicionar de 5 a 10 gotas del indicador de difenilamina.
8. Titular con la disolución de sulfato ferroso gota a gota hasta un punto final verde obscuro.

$$(\%) \text{ de C Orgánico} = \left[ \frac{\text{B} - \text{T}}{\text{E}} \right] (\text{N}) (0.39) \text{ mcf}$$

*Donde:*

B = volumen de sulfato ferroso gastado para valorar el blanco de reactivos (mL).

T = volumen de sulfato ferroso gastado para valorar La muestra (mL)

N = normalidad exacta del sulfato ferroso (valorar por separado al momento de analizar las muestras).

g = peso de La muestra empleada (g)

mcf = factor de corrección de humedad.

$$\% \text{ Materia orgánica} = \% \text{ C. Orgánico} \times 1.724$$

#### **4. Nitrógeno**

La determinación de nitrógeno total se realiza con el método Micro- Kjeldahl

##### *Fundamento*

El método Kjeldahl comprende tres fases fundamentales:

1. Digestión de la muestra. La muestra de suelo se somete a una digestión por calentamiento con ácido sulfúrico y por una mezcla de sales que aceleran y facilitan tanto la oxidación de la materia orgánica como la conversión de todas las formas de nitrógeno en  $\text{N}^{+3}$ , que en medio ácido se encuentran en forma de radical amonio ( $\text{NH}_4^+$ ); es decir, se llevan las formas orgánicas a formas minerales de nitrógeno.
2. Destilación. Una vez transformado el nitrógeno en  $\text{NH}_4$ , se expone a una base fuerte como el hidróxido de sodio para formar hidróxido de amonio, que por la acción del calor se descompone en amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y agua.
3. Valoración. El amoníaco desprendido por la reacción se recoge en un volumen conocido de solución valorada de ácido bórico y por comparación con un blanco se determina la cantidad de ácido que reaccionó con el  $\text{NH}_3$ .

##### *Soluciones y reactivos*

1. Solución de ácido bórico con indicador. Pesar 20 g de ácido bórico ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) y disolver en 750 mL de agua destilada. Calentar para la completa disolución del ácido. Dejar enfriar y agregar 20 mL de la siguiente mezcla de indicadores: 0.099 g de verde de bromocresol y 0.066 g de rojo de metilo disueltos en 100 mL de alcohol

etílico al 96%. El pH de la mezcla debe de ser de 5.0, si es más ácido agregar algunas gotas de solución de hidróxido de sodio 0.1 N, hasta que la solución adquiriera una coloración púrpura o alcance el pH indicado. Completar el volumen a 1 L con agua destilada y mezclar.

2. Solución de hidróxido de sodio 0.1 N: Pesar 4 g de hidróxido de sodio (NaOH), disolver en agua destilada y aforar a 1 L.
3. Mezcla de catalizadores: pesar 62.5 g de sulfato de potasio (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) y 6.25 g de sulfato de cobre pentahidratado (CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O). Homogeneizar la mezcla.
4. Solución de hidróxido de sodio 10 N: Pesar 200 g de hidróxido de sodio (NaOH), disolver en agua destilada y aforar a 500 mL. El agua para preparar la solución debe ser hervida previamente para eliminar el CO<sub>2</sub>, dejándola enfriar antes de agregarla.
5. Solución de ácido sulfúrico 0.01 N: Diluir 0.28 mL de ácido sulfúrico concentrado (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) hasta completar un volumen de 1 L con agua destilada. La concentración del ácido debe ser estandarizada con la solución valorada de carbonato de sodio.
6. Solución valorada de carbonato de sodio: Pesar 0.25 g de carbonato de sodio (NaCO<sub>3</sub>), previamente secado en la estufa durante 2 horas a 105°C, disolver en agua destilada y aforar a 50 mL.
7. Solución de anaranjado de metilo: Pesar 0.1 g de anaranjado de metilo, disolver en agua destilada y aforar a 100 mL.

*Valoración de la normalidad del ácido sulfúrico 0.01 N:*

- Tomar 3 alícuotas de 10 mL de la solución de NaCO<sub>3</sub>.
  - Agregar 5 o 6 gotas de anaranjado de metilo como indicador.
  - Titular con la solución de ácido sulfúrico 0.01 N.
  - Calcular la normalidad real sustituyendo en la siguiente fórmula:
  - Normalidad del H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> = (0.050 g/ 53) X (1/ Promedio de mL gastados en las tres alícuotas).
8. Ácido sulfúrico concentrado (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).

## *Procedimiento*

### *a) Digestión*

1. Pesar una muestra de suelo de 0.25 a 1 g, que dependerá de la materia orgánica contenida en el suelo, entre más materia orgánica tenga un suelo menos serán los gramos de muestra.
2. Colocar la muestra de suelo en un matraz Kjeldahl seco.
3. Adicionar 2 g de mezcla de catalizadores.
4. Agregar 5 mL de ácido sulfúrico concentrado.
5. Poner a calentar en el digestor a una temperatura media, hasta que la muestra se torne clara. La temperatura debe ser regulada de modo que los vapores de ácido sulfúrico se condensen en el tercio inferior del cuello del matraz Kjeldahl.
6. Hervir la muestra por una hora a partir de ese momento.
7. Una vez terminada la digestión, apagar el digestor y tapar con un frasco los matraces para dejar enfriar.

### *b) Destilación*

- 1) Añadir al matraz Kjeldahl frío 25 mL de agua destilada y mezclar vigorosamente hasta una disolución completa. Transferir el líquido a un matraz Erlenmeyer de 500 mL. Colocar de 5 perlas de ebullición.
- 2) Adicionar 3 granallas de zinc. Añadir 15 mL de la solución de hidróxido de sodio 10 N, sosteniendo el matraz inclinado de modo que se deposite en el fondo.
- 3) Colocar en la salida del aparato de destilación un vaso de precipitados de 50 mL, que contenga 10 mL de la solución de ácido bórico más indicador.
- 4) Conectar el flujo de agua e iniciar la destilación. Destilar hasta que el volumen alcance la marca de 20 mL en el vaso de precipitados de 50 mL. Una vez alcanzado dicho volumen, retirar el matraz y apagar el aparato.
- 5) Titular el nitrógeno amoniacal con la solución de ácido sulfúrico 0.01 N hasta que vire de verde a rosado fuerte.
- 6) Realizar un blanco siguiendo los pasos del 3 al 5.

Calcular la concentración de nitrógeno, sustituyendo en la siguiente fórmula:

$$\text{Nitrógeno (\%)} = \frac{(T - B) \times N \times 1.4}{S}$$

*Donde:*

T = mL de ácido sulfúrico valorado gastados en la muestra.

B = mL de ácido sulfúrico valorado gastados en el blanco.

N = normalidad exacta del ácido sulfúrico.

S = peso de la muestra de suelo.

### ***5. Determinación de fósforo Olsen***

La determinación de fósforo aprovechable para suelos neutros y alcalinos se realiza con el procedimiento de Olsen y colaboradores.

El fósforo extraído del suelo con solución de  $\text{NaHCO}_3$  0.5M ajustada a un pH 8.5. En suelos neutros, calcáreos o alcalinos, conteniendo fosfatos de calcio, este extractante disminuye la concentración de Ca en solución a través de una precipitación de  $\text{CaCO}_3$ , por tanto la concentración de P en solución se incrementa, conforme el pH se eleva.

#### *Procedimiento*

1. Pesar 2.5 g suelo previamente tamizado por malla de 2 mm colocarlos en tubos de polietileno.
2. Añadir 50 mL de la solución extractora ( $\text{NaHCO}_3$ ) tapar y agitar la suspensión en agitador en acción reciproca durante 30 min a 180 opm.
3. Filtrar a través de papel filtro Whatman No. 42.
4. Preparar blancos a partir de alícuotas de solución extractora y adicionado todos los reactivos como las muestras.
5. Tomar una alícuota de 5 mL (o 10 mL si la concentración de P es muy baja) de filtrado y colocarlo en un matraz aforado de 50 mL.
6. Agregar 5 mL de la solución reductora (molibdato), agitar y aforar. Leer después de 30 minutos pero antes de una hora a una longitud de onda 882 nm ( leer previamente la curva de calibración).

7. Preparar una curva de calibración con patrones de 0, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 y 1.0 mg L<sup>-1</sup> de P.
8. Pipetear 0,1, 2, 4, 6 y 10 mL de una solución de 5 mg L<sup>-1</sup> de P a matraces aforados de 50 mL.
9. Adicionar un volumen de solución extractable de NaHCO<sub>3</sub> 0.5 M igual a la alícuota empleada para medir en las muestras desconocidas.

*Cálculos:*

$$P \text{ (mg kg}^{-1} \text{ de suelo)} = CC \times Vi/p \times Vf/a$$

*Donde:*

CC = mg L<sup>-1</sup> de P en la solución. Se obtiene graficando la curva de calibración (absorbancia contra mg L<sup>-1</sup>) e interpolando en la misma, los valores de absorbancia de las muestras analizadas a las cuales previamente se les ha dado el valor promedio de los blancos o por medio de una regresión simple.

Vi = volumen de la solución extractora adicionada.

p = peso de la muestra del suelo seca al aire.

Vf = Volumen final de la solución colorimétrica a leer.

A = alícuota de la muestra empleada para la cuantificación.

## **6. Determinación de bases intercambiables Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup> y K<sup>+</sup>**

*Potasio y sodio por flamometría*

Se determinó el potasio y sodio soluble en de los extractos de saturación, descritos anteriormente

*Procedimiento:*

Se utilizó un aparato AutoCal Flame-Photometer 643. Para comenzar la determinación en primer lugar se colocó una solución de Cesio, luego se abrió la válvula de gas LP, se calibró con solución estándar 140 meq L<sup>-1</sup> de sodio y 5 meq L<sup>-1</sup> de potasio. Finalmente se

ajusto el equipo a ceros con agua destilada y se prendió la flama. El equipo fue alimentado con alícuotas de 1 mL y se registraron las lecturas en meq L<sup>-1</sup>.

La determinación de las bases (Ca y Mg) se fundamenta en el equilibrio que se establece entre una solución extractora de Acetato de Amonio y la muestra del suelo donde se efectúa éste intercambio.

Empleando acetato de amonio 1 N, pH 7, como solución saturante

#### *Fundamento*

Los cationes Ca y Mg, se determinan en la solución extractora por espectrofotometría de absorción atómica.

#### *Procedimiento*

Se pesan 5 g de suelo secado al aire y tamizado por malla de 2 mm de apertura y se transfiere a un tubo de centrífuga de 50 mL. Agregar 33 mL de solución de acetato de amonio (CH<sub>3</sub>COONH<sub>4</sub> 1N), tapar y agitar en posición horizontal durante 10 minutos a 180 opm.

Se centrifuga la suspensión hasta que el sobrenadante esté claro (1000 a 1800 rpm y 5 a 10 minutos, dependiendo del suelo) el sobrenadante se filtra en un matraz aforado de 100 mL sobre papel Whatman. Se repite el proceso dos veces más. Aforar con acetato de amonio y guardarlo (solución A).

#### *Determinación de Ca y Mg intercambiables*

1. Pipetear 0.5 mL de la solución A en un tubo de ensaye
2. Añadir 9.5 mL de la solución diluida de lantano y mezclar
3. Medir la concentración de Ca y Mg en las series estandar, el blanco y la muestra por espectrofotometría de absorción atómica e una longitud de onda de 422.7 y 285.2 nm, respectivamente, usando una flama de aire-acetileno.

*Cálculos:*

$$\text{Ca (Cmol (+) kg}^{-1}\text{)} = (a-b) \times \frac{100}{1000} \times 20 \times \frac{1000}{10w} \times \frac{2}{40.08} = 9.98 \times \frac{a-b}{w}$$

$$\text{Mg (Cmol (+) kg}^{-1}\text{)} = (a-b) \times \frac{100}{1000} \times 20 \times \frac{1000}{10w} \times \frac{2}{24.32} = 16.447 \times \frac{a-b}{w}$$

*Donde:*

a = Concentración de Ca o Mg en la muestra (mg L<sup>-1</sup>)

b = Concentración de Ca o Mg en la blanco (mg L<sup>-1</sup>)

w= Peso del suelo seco (g)

## **7. Determinación de Micronutrientes**

Entre las sustancias utilizadas para recuperar los metales del suelo destacan aquellas que emplean compuestos orgánicos con la capacidad para formar complejos estables, tal es el caso del DTPA (ácido del dietilen triamino pentaacético) y del EDTA (ácido del etilen diamino tetraacetico). Las soluciones complejantes, como el DTPA y el EDTA, tienen como finalidad el recuperar elementos metálicos que se encuentran en forma intercambiable, ligados a la materia orgánica y disolver formas precipitadas.

### *Extracción*

1. Colocar 10.0g de suelo seco y tamizado en malla de 2mm de apertura, en un matraz Erlenmeyer de 125 mL y adicionar 20 mL de solución DTPA.
2. Tapar el matraz con papel parafilm o con plástico asegurándolo con una liga. Agitar horizontalmente a 120 opm durante 2 horas
3. Separar la solución del suelo mediante filtrado con Whatman No. 42, si existe paso del suelo se debe retirar la solución.
4. En el extracto obtenido, es posible cuantificar a los micronutrientes; Fe, Cu, Zn y Mg, así como los metales tóxicos; Pb, Cd y Ni; y medirse en ICP

Los resultados de absorbancia o concentración en mg L<sup>-1</sup> de cada metal se deben expresar en mg del metal en un kilogramo de suelo.

#### 5.6.4.2. Resultados de muestras suelo previo al experimento

El análisis químico del perfil del suelo, se analizó antes de realizar el experimento, no se detectó la presencia de K y Na (Cuadro 7).

Cuadro 7. Composición química del suelo previo al experimento

| Profundidad<br>cm | CE<br><i>dS m<sup>-1</sup></i> | pH   | NO4<br><i>mg/l</i> | NO3<br><i>mg/l</i> | P<br><i>ppm</i> | K<br><i>ppm</i> | Na<br><i>ppm</i> | Ca<br><i>ug/mL</i> | Mg<br><i>ug/mL</i> | Fe<br><i>ppm</i> | Cu<br><i>ppm</i> | Zn<br><i>ppm</i> | Mn<br><i>ppm</i> | MO<br><i>%</i> |
|-------------------|--------------------------------|------|--------------------|--------------------|-----------------|-----------------|------------------|--------------------|--------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|----------------|
| 0-23              | 0.313                          | 7.02 | 3.57               | 3.56               | 9.93            | 0               | 0                | 3147               | 366.32             | 18.19            | 0.0431           | 1.618            | 7.848            | 4.99           |
| 24-45             | 0.146                          | 7.18 | 3.61               | 3.56               | 0.06            | 0               | 0                | 1098               | 208.32             | 2.825            | 0.044            | 0.122            | 4.265            | 2.36           |
| 46-75             | 0.091                          | 7.21 | 3.6                | 3.65               | 0.04            | 0               | 0                | 811                | 227.25             | 1.319            | 0.015            | 0.095            | 1.892            | 1.05           |

CE: conductividad eléctrica, MO: materia orgánica

Aplicando la NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad, clasificación e interpretación de resultados, para el caso de micronutrientes la disponibilidad es adecuada para Fe, Zn y Mn y para Cu deficiente, P la concentración es media, el contenido de MO es alto, pH neutro y la CE se considera que los efectos de salinidad son despreciables; lo anterior para la profundidad de los 0 a 23 cm. En las otras dos capas (24 a 45 cm y 46 a 75 cm) la clasificación para micronutrientes va marginal a deficiente, P bajo, MO va de medio a bajo, disminuyendo con la profundidad; el pH y la CE conservó el mismo rango de clasificación.

#### 5.6.5. Planta

##### 5.6.5.1. Análisis químico de planta

El análisis de tejido vegetal de alfalfa, se dividió en dos cortes: muestras de tallos y hojas de la cosecha 1 y 2 respectivamente. Las muestras se analizaron en el Laboratorio de Nutrición Vegetal, área de Edafología del Colegio de Postgraduados; Campus Montecillo. Las determinaciones realizadas se muestran en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Metodologías utilizadas para análisis foliar de alfalfa

| Determinación                | Unidades            | Método           | Equipo           |
|------------------------------|---------------------|------------------|------------------|
| Nitrógeno (N)                | %                   | Kjeldhal         | Colorimetría     |
| Fósforo (P)                  | mg kg <sup>-1</sup> | Digestión húmeda | ICP              |
| Potasio (K)                  | mg kg <sup>-1</sup> | Digestión húmeda | ICP              |
| Sodio (Na <sup>2+</sup> )    | mg kg <sup>-1</sup> | Digestión húmeda | ICP              |
| Calcio (Ca <sup>2+</sup> )   | mg kg <sup>-1</sup> | Digestión húmeda | ICP              |
| Magnesio (Mg <sup>2+</sup> ) | mg kg <sup>-1</sup> | Digestión húmeda | ICP              |
| Fierro (Fe)                  | mg kg <sup>-1</sup> | Digestión húmeda | ICP              |
| Cobre (Cu)                   | mg kg <sup>-1</sup> | Digestión húmeda | ICP              |
| Manganeso (Mn)               | mg kg <sup>-1</sup> | Digestión húmeda | ICP              |
| Zinc (Zn)                    | mg kg <sup>-1</sup> | Digestión húmeda | ICP              |
| Boro (B)                     | mg kg <sup>-1</sup> | Colorimetría     | Espectofotometro |
| Nitratos (NO <sub>3</sub> )  | mg kg <sup>-1</sup> | Colorimetría     | Espectofotometro |

Ambos cortes se realizaron a los 60 días, con una permanencia de la alfalfa de 120 días en total. Previo al análisis las muestras se manejaron según Jones y Case (1990):

*Descontaminación:*

1. En el caso de análisis de Al, Fe, Mn, las muestras deben enjuagarse con agua destilada o desionizada. Este proceso no debe durar más de 15 segundos para evitar pérdidas de nitrato, boro, potasio y cloruro.
2. Después de la descontaminación, las muestras deben secarse inmediatamente para estabilizar el tejido y detener las reacciones enzimática

*Secado*

1. Introducir las muestras en bolsas de papel rotular.
2. Colocar las bolsas en una estufa con aire forzado y secar a 70 a 80°C por 24 horas.

*Molienda*

1. Moler la muestra en molino Wiley con malla 40, para uniformizar la muestra.
2. Pesar y etiquetar cada una de las muestras

### 5.6.5.2. Descripción de análisis

Para cada determinación de P, K, Ca, Mg, Zn, Cu, Mn, B y Fe se utilizó 0.5 g de muestra (como lo sugiere Alcantar y Sandoval, 1990). Para el caso de N se utilizó 0.1 g de muestra

#### 1. Nitrógeno total

1. 0.10 g de muestra + 10 g de mezcla de (Na, Cu Se) + 1.5 de ácido sulfúrico-salicílico.
2. Poner en la plancha de digestión de 300 a 350 °C, hasta que la muestra este de color verde esmeralda. Una vez fría se agrega 10 mL de agua destilada.
3. Colocar un bulbo destilador, al cual se le agregan 14 mL de NaOH al 50 % previamente, se recibe el destilado matraces Erlenmeyer de 125 con 20 mL de ácido bórico al 4% más 9 gotas de verde de bromocresol.
4. Cuando vire de rosa a azul, se afora a 50 mL.
5. Se titula con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 0.05 N hasta que vire a color rosado tenue.

#### *Metodología de análisis foliar Digestión húmeda*

1. 0.50 g de muestra, se le adiciona 10 mL de ácido nítrico y 2 mL de ácido perclórico más 1.5 de ácido sulfúrico, se deja reposar 12 horas y se coloca en la plancha de digestión hasta que tome una apariencia acuosa, se afora a 25 mL.
2. Filtrar (Whatman 40) en frasco de vidrio y tapar. Del filtrado se midieron las concentraciones de Fe, Cu y Zn en el espectrofotometro de adsorción atómica.
3. Del filtrado se tomaron diluciones para medir concentraciones de P, K, Ca y Mg

#### 2. Fósforo

1. Del filtrado tomar una alícuota de 5 mL y agregar 2.5 mL de ácido nítrico (1:2 de agua destilada).
2. Agregar 2.5 mL de vanadato de amonio y 2.5 de heptamolibdato de amonio.
3. Se afora y agita por 30 minutos.
4. Realizar curva de calibración con una solución patrón se prepara con KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, se afora a 1 L.

### 3. Potasio y sodio

1. Transferir del filtrado 1 mL y se afora a 25 mL.
2. Realizar curva de calibración para K, la solución patrón se prepara con KCl seco, se afora a un litro de agua destilada.
3. Realizar curva de calibración para Na, la solución patrón se prepara con NaCl anhidro y se afora a un litro de agua.

### 4. Calcio y magnesio

1. Del extracto se tomar una dilución de 1:250
2. Aplicar 1 mL de cloruro de lantano (75.5 g de óxido de lantano con 75 mL de ácido clorhídrico concentrado, aforar a 1 L con agua destilada).
3. Realizar curva de calibración para calcio, preparando una solución patrón de 100 ppm con carbonato de calcio anhidro, ácido clorhídrico 5 N, se disuelve con calentamiento, enfríe y se afora con agua desionizada.
4. Realizar curva de calibración para magnesio, preparando una solución patrón 100 ppm con óxido de magnesio anhídrido y ácido clorhídrico 5 N se disuelve con calentamiento, se enfría y se afora con agua desionizada.

### 5. Micronutrientes

Del filtrado obtenido en la digestión húmeda se lee directamente por absorción Atómica o ICP (Inductively Coupled Plasma Emisión Spectrometer): Cu, Mn, Fe, y Zn.

#### *Curvas de calibración para fierro, manganeso, cobre y zinc*

1. Para fierro, se pesa  $\text{Fe SO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$ , este se disuelve en 10 mL de ácido clorhídrico 10.5 M y se afora a 100 mL.
2. Para manganeso, se pesa  $\text{Mn SO}_4$  se disuelve en agua y se afora a un litro.
3. Para cobre, se pesa  $\text{Cu SO}_4$  se le adiciona 10 mL de HCl 10.5 M y se afora a 1 litro.
4. Para zinc, se pesa  $\text{Cu SO}_4$  se le adiciona 10 mL de HCl 10.5 M y se afora a 1 litro.

## **6. Nitratos**

1. Se pesa 0.1 g de material seco en 10 mL de agua destilada, se agita en un vortex aproximadamente 1 hora con intervalos de 15 minutos;
2. Filtrar y tomar una alícuota de 2 mL del extracto de matraces Erlenmeyer de 50 se agregan 0.8 mL de ácido salicílico con ácido sulfúrico.
3. Reposar 20 minutos a temperatura ambiente se agregan 19 mL de NaOH 2 N
4. Enfriar a temperatura ambiente y se lee en absorbancia 410 nm de fotolorímetro. Para la curva se prepara con una solución patrón de nitrógeno nitrato de potasio.

## **7. Boro**

1. Se pesan 0.5 g de material vegetal seco en crisoles de porcelana, se le agrega una pizca de óxido de calcio mezclado con un poco de agua destilada 1 o 2 mL, hasta formar una pasta.
2. Meter a la mufla durante 2 horas a 650 °C, se apaga la mufla y se deja enfriar, posteriormente se le agrega a cada crisol 10 mL de ácido clorhídrico al 10% y se secan en una plancha de digestión, se enfrían y se le agregan 10 mL de ácido clorhídrico al 25% .
3. Recuperar la ceniza, removiendo con una varilla de vidrio, se afora a 25 mL y se filtra
4. Se toma 1 mL de extracto y se añade 4 mL de ácido oxálico con curcumina.
5. Poner a baño maría hasta sequedad, se enfría a temperatura ambiente.
6. Agregar 25 mL de alcohol etílico puro y se lee a 540 nm en fotolorímetro. Para la curva se prepara una solución patrón de 10 ppm de boro a partir de ácido bórico.

### **5.7. Diseño experimental**

El diseño experimental utilizado fue un Diseño Completamente al Azar (DCA). (Herrera y Barreras, 2005). La asignación de los tratamientos fue de forma completamente aleatoria a las unidades experimentales, las cuales fueron homogéneas, de esta manera se disminuyó la magnitud del error (Reyes, 1987).

### 5.7.1. Lixiviados

Para el caso de de lixiviados fue un DCA con arreglo factorial (3X3X12 para la cosecha 1 y el arreglo factorial 3X3X7 para cosecha 2).

1 = Factor de profundidad.

2 =Factor dosis (0, 250 y 500 kg de K ha<sup>-1</sup>).

3 = Factor días de muestreos.

*Modelo estadístico para lixiviados*  $Y_{ijkl} = \mu + T_i + P_j + P * T_{ij} + \varepsilon_{ijk} + D_l + T * D_{il} + T * P * D_{ijl} + \varepsilon_{ijkl}$

*Donde:*

P= Profundidad.

T= Tratamiento.

D = Días de muestreo.

$\varepsilon_{ijk}$  = Error (a) experimental de cada observación.

$\varepsilon_{ijkl}$  = Error (b) experimental de cada observación.

*Las variables de respuesta en lixiviados fueron:*

- a) Conductividad eléctrica (CE).
- b) Potasio (K).
- c) Potencial de Hidrógeno (pH).

Los factores evaluados fueron: profundidad (23, 46 y 75 cm), dosis de K (kg ha<sup>-1</sup> y días de muestreo. Realizándose por separado para cosecha 1 y 2.

### 5.7.2. Planta

*Modelo estadístico para tejido vegetal*  $Y_{ij} = \mu + T_i + \varepsilon_{ij}$

*Donde:*

T=Tratamiento.

$\epsilon_{ij}$  = Error experimental de cada observación.

*Modelo para muestras de suelo*      $Y_{ikj} = \mu + T_i + P_j + P * T_{ij} + \epsilon_{ijk}$

*Donde:*

P= Profundidad.

T= Tratamiento.

$\epsilon_{ijk}$  = Error experimental de cada observación.

Las variables de respuesta para las muestras de alfalfa fueron:

- d) Nitrógeno (N)
- e) Fósforo (P)
- f) Potasio (K)
- g) Magnesio (Mg)
- h) Hierro (Fe)
- i) Boro (B)
- j) Calcio (Ca)
- k) Cobre (Cu)
- l) Zinc (Zn)
- m) Sodio
- n) Manganeso (Mn)
- o) Materia Seca (MS)
- p) Nitratos ( $NO_3^-$ )

Los factores evaluados estadísticamente en tejido vegetal de alfalfa fueron cosecha y dosis.

### **5.7.3. Variables para suelo**

Las variables de respuesta para las muestras de suelo una vez concluido el experimento fueron:

- a) Potencial de Hidrógeno (pH).
- b) Fósforo.
- c) Sódio.
- d) Magnésio.
- e) Fierro (Fe).
- f) Cobre (Cu).
- g) Zinc (Zn).
- h) Manganeseo.
- i) Materia Orgánica (MO).

Los factores evaluados estadísticamente para suelo fueron profundidad y dosis.

### **5.7.4. Análisis de resultados**

Para el análisis estadístico se utilizó el Statical Análisis System versión 9.0 (SAS Institute, 2002), realizando análisis de varianza (ANOVA) para datos completos y generados de las muestras de suelo y tejido vegetal, para el caso de lixiviados que fueron datos incompletos se utilizó el procedimiento GLM.

Las pruebas de comparaciones múltiples realizadas a los datos obtenidos fue la prueba de medias de Tukey ( $P < 0.05$ )

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1. Efecto de vinaza en lixiviados

#### 6.1.1. Análisis de varianza y comparación de medias en lixiviados para CE

En el Cuadro 9 se encuentra el resumen de resultados del análisis de varianza (ANOVA) de la variable conductividad eléctrica (CE), para ambas cosechas.

Cuadro 9. Análisis de varianza para CE ( $\text{dS m}^{-1}$ ) en lixiviados

| Fuente de Variación                              | Cosecha 1          |                  |            |        | Cosecha 2          |                  |            |         |
|--|--------------------|------------------|------------|--------|--------------------|------------------|------------|---------|
|  | Grados de libertad | Cuadrados Medios | Valor de F | Pr > F | Grados de libertad | Cuadrados Medios | Valor de F | Pr > F  |
| Profundidad                                      | 2                  | 2.00             | 16.70      | 0.0014 | 2                  | 1.575            | 66.37      | <0.0001 |
| Dosis de K                                       | 2                  | 2.31             | 19.28      | 0.0009 | 2                  | 3.411            | 143.75     | <0.0001 |
| Dosis*Profundidad                                | 4                  | 0.085            | 7.12       | 0.0095 | 4                  | 0.250            | 10.54      | 0.001   |
| <b>Error a</b><br>(Repetición*Dosis*Profundidad) | 8                  | 0.120            | 2.09       | 0.0535 | 9                  | 0.237            | 1.41       | 0.211   |
| Días   | 11                 | 0.154            | 2.69       | 0.0084 | 6                  | 0.107            | 6.39       | <0.0001 |
| Días*Profundidad                                 | 18                 | 0.142            | 2.49       | 0.0056 | 12                 | 0.036            | 2.19       | 0.030   |
| Días*Dosis                                       | 22                 | 0.041            | 0.73       | 0.7924 | 12                 | 0.036            | 2.14       | 0.031   |
| Días*Dosis*Profundidad                           | 29                 | 0.049            | 0.86       | 0.6683 | 23                 | 0.028            | 1.72       | 0.057   |
| <b>Error b</b>                                   | 51                 | 0.057            |            |        | 48                 | 0.016            |            |         |
| Total  | 148                |                  |            |        | 118                |                  |            |         |

#### 6.1.1.1. Efecto de vinaza en la CE de acuerdo con la profundidad

Los valores de CE indican que la profundidad del suelo tiene efecto ( $P < 0.05$ ) sobre esta característica del suelo. En la comparación de medias (prueba de Tukey), se encontraron diferencias estadísticamente significativas para los lixiviados obtenidos a 23 cm en ambas cosechas; a otras profundidades no fueron significativamente diferentes (Cuadro 10).

El CE a los 23 cm de profundidad fue mayor ( $P < 0.05$ ), para ambas cosechas, concordando con lo realizado por Bautista *et al.* (2000a), con suelos del Ingenio el Potrero, Veracruz, mismos que el presente trabajo, indican que la aplicación de vinaza influye en CE a lo largo de la columna, debido a que existe mayor capacidad de intercambio catiónico ya que el suelo (Fluvisol), presenta mayor retención de iones debido las arcillas aluminisilicatadas;

produciendo crecimiento microbiano denso en las primeras capas, contribuyendo con esto a la disminución del paso de la vinaza a mayor profundidad (Cuadro 10).

### 6.1.1.2 Efecto de vinaza en la CE según la dosis de K.

La dosis de potasio influyó significativamente ( $P < 0.05$ ), sobre la CE. La comparación de medias para dosis de K fue significativa, siendo estadísticamente diferente para dosis de K (250 y 500  $\text{kg ha}^{-1}$ ), así como el control, en ambas cosechas (Cuadro 10). Las diferencias en la CE para las diferentes dosis de K, se debe a que hay mayor concentración de iones ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{Ca}^{+2}$ ) y materia orgánica presente en la vinaza, contrastando con el testigo que es diferente estadísticamente a donde se aplicó una dosis equivalente a 500  $\text{kg}$  de K.

Cuadro 10. Comparación de medias para CE ( $\text{dS m}^{-1}$ ) en lixiviados e interacción profundidad y dosis

| Cosecha | Profundidad cm |          |           | Dosis de K ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) |         |         |
|---------|----------------|----------|-----------|------------------------------------|---------|---------|
|         | 23             | 46       | 75        | 0                                  | 250     | 500     |
| 1       | 1.1394 a       | 0.4479 b | 0.34465 b | 0.337 c                            | 0.538 b | 0.841 a |
| 2       | 1.026 a        | 0.627 b  | 0.532 b   | 0.366 c                            | 0.727 b | 1.014 a |

$P < 0.05$ . DSH C1= 0.199  $\text{dS m}^{-1}$  DSH C2= 0.288  $\text{dS m}^{-1}$   $P < 0.05$ . DSH C1= 0.199  $\text{dS m}^{-1}$  DSH C2= 0.288  $\text{dS m}^{-1}$   
Medias con la misma letra no son significativamente diferentes. C=Cosecha

### 6.1.1.3. Efecto de vinaza en la CE para días de muestreo

En la comparación entre medias para día de muestreo, existe diferencia ( $P < 0.05$ ) estadística para el día 6 y 10, siendo diferentes para el resto de los días de muestreo de cosecha 1 (Cuadro 11 y *Figura 4*), mientras que en la segunda cosecha los días 11, 32, 39 y 56 fueron estadísticamente diferentes al día 3. Lo anterior para ambas cosechas se debe a la aplicación de vinaza días previos al primer muestreo y se puede observar la variación en la concentración de los iones conforme transcurren los días de muestreo para finalizar con una diferencia en la concentración de las sales solubles (Cuadro 12 y *Figura 5*).

Lo que concuerda con Brito y Rolim (2005) que aplicaron dosis de vinaza (500 y 1000  $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ ), en periodos de incubación 40 y 60 días) en suelo, clasificaron efluentes (lixiviados)

para CE con relación a salinidad como grado de restricción de leve a moderado para salinidad (Ayers y Westcot, 1987) lo cual involucró un incremento (tratamientos vs control) de CE al final del estudio producto de la aplicación de vinaza.

Cuadro 11. Comparación de medias de CE para día de muestreo.

| Cosecha 1 |                        |
|-----------|------------------------|
| Días      | Media ( $dS\ m^{-1}$ ) |
| 2         | 0.496 c                |
| 4         | 0.626 bc               |
| 6         | 0.985 a                |
| 8         | 0.443 c                |
| 10        | 0.895 ab               |
| 13        | 0.500 c                |
| 18        | 0.563 bc               |
| 22        | 0.534 c                |
| 26        | 0.534 c                |
| 30        | 0.528 c                |
| 37        | 0.607 bc               |
| 44        | 0.627 bc               |

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.  $P < 0.05$ .  $DSH = 0.427\ dS\ m^{-1}$ .

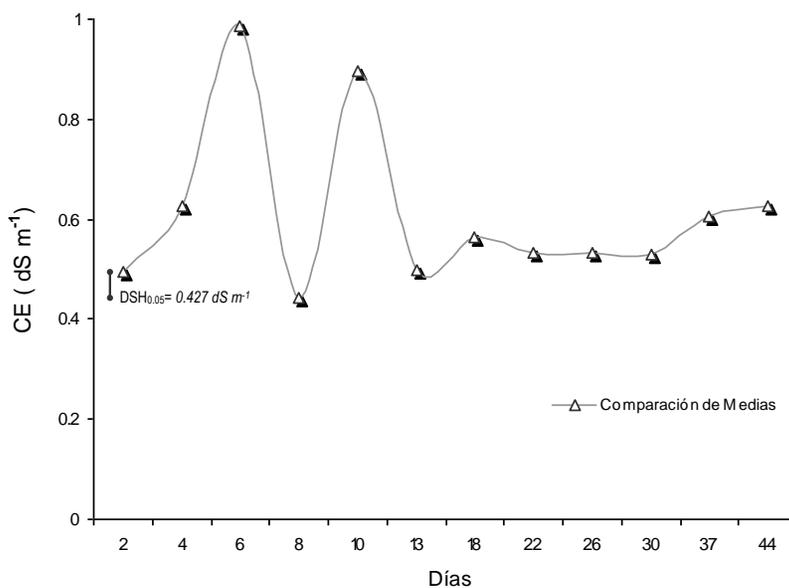


Figura 4. Efecto de la vinaza sobre CE en lixiviados por día de muestreo, cosecha 1.

Cuadro 12. Medias de CE en lixiviados, para días de muestreo.

| Días | Cosecha 2             |
|------|-----------------------|
|      | Media ( $dS m^{-1}$ ) |
| 3    | 0.575 b               |
| 11   | 0.718 a               |
| 18   | 0.702 ab              |
| 25   | 0.662 ab              |
| 32   | 0.790 a               |
| 39   | 0.777 a               |
| 56   | 0.791 a               |

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.  $P < 0.05$ ,  $DSH = 0.135 dS m^{-1}$ .

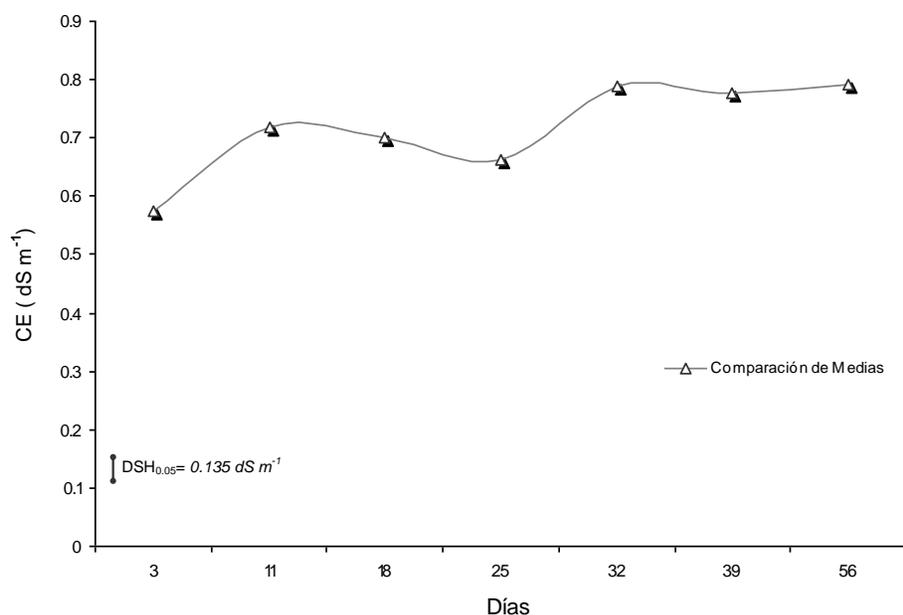


Figura 5. Efecto de la vinaza en CE de lixiviados por día de muestreo, cosecha 2.

#### 6.1.1.4. Efecto de vinaza en la CE de acuerdo con interacción dosis por profundidad

En la prueba de medias de Tukey para CE (Cuadro 13), en la interacción dosis por profundidad, fue estadísticamente diferente para ambas cosechas, la CE en lixiviados a los 23 cm de profundidad y dosis de K 500 kg ha<sup>-1</sup>; disminuyendo el valor con la profundidad.

Bautista *et al.* (2000b), encontraron que la aplicación de vinaza aumentó cinco veces el valor de la conductancia, para un suelo Acrisol, mientras que en el Fluvisol hubo incremento nueve veces mayor al valor inicial.

Los valores de CE para el control fueron significativos para ambas cosechas, a dosis de 250 y 500 K ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) en la profundidad 46 y 75 cm, no presentaron diferencias significativas. Las concentraciones de sales solubles para la cosecha 2, dosis de 500 kg de  $\text{K ha}^{-1}$ , fue menores (23 cm) con respecto a la anterior cosecha, en 46 y 76 cm hubo lixiviado de sales; lo cual lo explican Arafat y Tassen (2002) mencionan que los valores de sales solubles (CE) para suelo con aplicación de vinaza disminuyó después de la cosecha; está modificación puede atribuirse a la cantidad de agua aplicada durante el periodo de crecimiento de los cultivos, provocando lixiviado de sales fuera de la zona de raíz (Cuadro 13).

Cuadro 13. Medias de CE lixiviados según Dosis por profundidad

| Profundidad<br>cm | Cosecha 1<br>Dosis de $\text{K kg ha}^{-1}$ |          |          |          | Cosecha 2<br>Dosis de $\text{K kg ha}^{-1}$ |         |         |          |
|-------------------|---|----------|----------|----------|---|---------|---------|----------|
|                   | 0   | 250      | 500      | Promedio | 0   | 250     | 500     | Promedio |
|                   | --- $CE(dS m^{-1})$ -----                   |          |          |          | --- $CE(dS m^{-1})$ -----                   |         |         |          |
| 23                | 0.478 bc                                    | 0.904 b  | 1.509 a  | 1.139 a  | 0.523 c                                     | 0.932 b | 1.443 a | 1.026 a  |
| 46                | 0.313 b                                     | 0.455 bc | 0.581 bc | 0.447 b  | 0.305 c                                     | 0.728 c | 0.847 b | 0.627 b  |
| 75                | 0.317 b                                     | 0.335 c  | 0.378 c  | 0.344 b  | 0.322 c                                     | 0.505 c | 0.751 b | 0.532 b  |
| Promedio          | 0.337 c                                     | 0.538 b  | 0.841 a  |          | 0.366 c                                     | 0.727 b | 1.014 a |          |

Cosecha 1 DSH= 0.491  $dS m^{-1}$

Cosecha 2 DSH=0.709  $dS m^{-1}$ .

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.  $P < 0.05$ .

#### 6.1.1.5. Efecto de vinaza en la CE en la interacción profundidad por días de muestreo

La prueba de Tukey para CE en lixiviados, interacción profundidad por días de muestreo de cosecha 1, fueron estadísticamente diferentes ( $P < 0.05$ ), a los 75 cm del día 2 y 18 (Cuadro 14), con respecto a 23 y 46 cm de profundidad, el resto de los días no existió diferencia estadística (Figura 6); sin embargo cabe señalar que a los 23 y 75 cm de profundidad, de los primeros muestreos, no se lixivió lo suficiente cantidad de muestra hacia los lisímetros.

Cuadro 14. Medias de CE en lixiviados para profundidad por días de muestreo

| Tiempo días | Cosecha 1<br>Profundidad cm |          |          | Promedio |
|-------------|-----------------------------|----------|----------|----------|
|             | 23                          | 46       | 75       |          |
| 2           | 1.033 ab                    | 0.442 bc | 0.282 c  | 0.496 c  |
| 4           | 0.973 ab                    | 0.418 bc | SL       | 0.626 bc |
| 6           | 1.610 ab                    | 0.518 bc | SL       | 0.985 a  |
| 8           | SL                          | 0.443 bc | SL       | 0.443 c  |
| 10          | 1.820 a                     | 0.360 bc | 0.385 bc | 0.895 ab |
| 13          | 1.023 ab                    | 0.428 bc | 0.312 bc | 0.500 c  |
| 18          | 1.157 ab                    | 0.438 bc | 0.305 c  | 0.563 bc |
| 22          | 1.110 ab                    | 0.428 bc | 0.316 bc | 0.534 c  |
| 26          | 0.950 ab                    | 0.453 bc | 0.338 bc | 0.534 c  |
| 30          | 1.097 ab                    | 0.458 bc | 0.313 bc | 0.528 c  |
| 37          | 0.940 ab                    | 0.475 bc | 0.430 bc | 0.607 bc |
| 44          | 0.890 ab                    | 0.517 bc | 0.498 bc | 0.627 bc |
| Promedio    | 1.1394 a                    | 0.4479 b | 0.3446 b |          |

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.  $P < 0.05$ .  $DHS = 0.761$   
 $dS\ m^{-1}$  SL=Sin lixiviación.

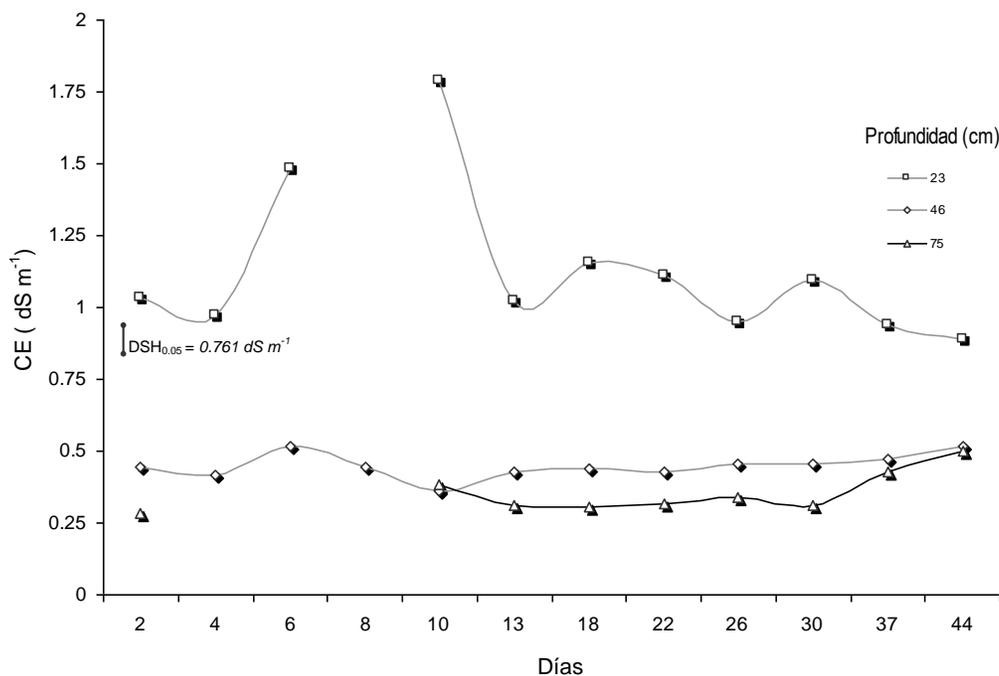


Figura 6. Efecto de vinaza en CE de lixiviados en profundidad por día de muestreo, cosecha 1.

La prueba de Tukey en la cosecha 2, hubo diferencias significativas ( $P < 0.05$ ), siendo estadísticamente diferente el día de muestreo 3 a los 75 cm con respecto día 32 de muestreo a los 23 cm profundidad; dicha diferencia puede deberse a que en el primer día de muestreo, aún no se lixiviaban las sales solubles a lo largo del perfil (Cuadro 15) en las profundidades 23, 46 y 75 cm no hay diferencias estadísticas con respecto a los días de muestreo de la misma profundidad, gráficamente *Figura 7*.

Dichas diferencias concuerdan con Bautista *et al.* (2000a) la aplicación de vinaza causó efecto en la CE, en la semana 4, el valor aumento y se mantuvieron, por ello menciona que el uso de vinaza sin tratamiento como de alto riesgo para causar salinización.

Cuadro 15. Medias de CE en lixiviados para profundidad por día de muestreo

| Cosecha 2      |           |           |          |          |
|----------------|-----------|-----------|----------|----------|
| Profundidad cm |           |           |          |          |
| Tiempo días    | 23        | 46        | 75       | Promedio |
| 3              | 0.938 ab  | 0.487 bc  | 0.423 c  | 0.575 b  |
| 11             | 0.936 ab  | 0.695 bc  | 0.560 bc | 0.718 a  |
| 18             | 0.900 abc | 0.522 bc  | 0.682 bc | 0.702 ab |
| 25             | 1.052 ab  | 0.535 bc  | 0.465 bc | 0.662 ab |
| 32             | 1.182 a   | 0.727 abc | 0.474 bc | 0.790 a  |
| 39             | 1.078 ab  | 0.695 bc  | 0.560 bc | 0.777 a  |
| 56             | 1.083 ab  | 0.730 abc | 0.575 bc | 0.791 a  |
| Promedio       | 1.026 a   | 0.627 b   | 0.532 b  |          |

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.  $P < 0.05$ . DSH=  $0.282 \text{ dS m}^{-1}$

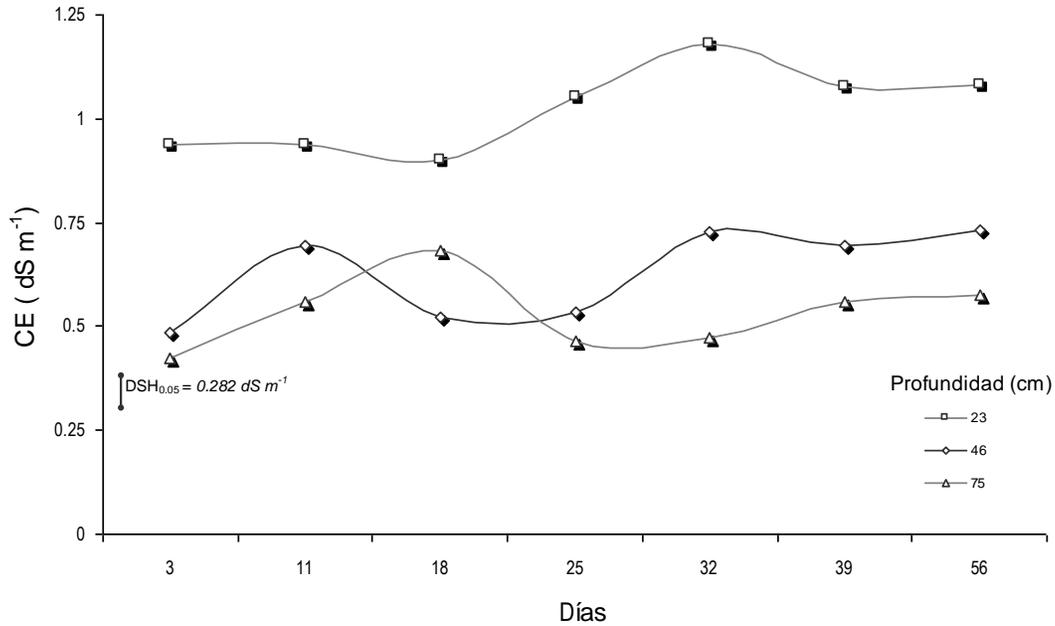


Figura 7. Efecto de la vinaza en CE de lixiviados, interacción: profundidad por día de muestreo de cosecha 2.

### 6.1.2. Análisis de varianza y comparación de medias en lixiviados para K

El análisis de varianza para el efecto de la vinaza en el contenido de K en lixiviados, fue significativo para: profundidad, días de muestreo y la interacción días por profundidad. Para la cosecha 2 existieron diferencias significativas para profundidad, dosis, días y las interacciones dosis por profundidad, días por dosis y días por dosis por profundidad (Cuadro 16).

Cuadro 16. Análisis de varianza para K en lixiviados

| Fuente de Variación                              | Cosecha 1          |                  |            |         | Cosecha 2          |                  |         |        |
|--|--------------------|------------------|------------|---------|--------------------|------------------|---------|--------|
|  | Grados de libertad | Cuadrados Medios | Valor de F | Pr > F  | Grados de libertad | Cuadrados Medios | Valor F | Pr > F |
| Profundidad                                      | 2                  | 230430.69        | 21.33      | 0.0004  | 2                  | 367.10           | 54.42   | <.0001 |
| Dosis de K                                       | 2                  | 230430.69        | 0.54       | 0.6003  | 2                  | 342.80           | 50.81   | <.0001 |
| Dosis*Profundidad                                | 4                  | 9284.22          | 0.86       | 0.5233  | 4                  | 198.49           | 29.42   | <.0001 |
| <b>Error a</b><br>(Repetición*Dosis*Profundidad) | 4                  | 10802.99         | 1.67       | 0.1162  | 9                  | 6.74             | 0.50    | 0.865  |
| Días   | 11                 | 100498.87        | 15.53      | <0.0001 | 6                  | 105.18           | 7.84    | <.0001 |
| Días*Profundidad                                 | 21                 | 46996.42         | 7.26       | <0.0001 | 12                 | 12.80            | 0.95    | 0.054  |
| Días*Dosis                                       | 22                 | 4327.64          | 0.67       | 0.8517  | 12                 | 36.35            | 2.71    | 0.010  |
| Días*Dosis*Profundidad                           | 35                 | 3964.974         | 0.61       | 0.9401  | 24                 | 24.20            | 1.80    | 0.03   |
| <b>Error b</b>                                   | 61                 | 6471.484         |            |         | 52                 | 13.41            |         |        |
| Total  | 167                |                  |            |         | 123                |                  |         |        |

### 6.1.2.1. Efecto de vinaza en concentración de K para profundidad

El efecto de la vinaza en la comparación de medias de K soluble en lixiviados para cosechas 1 y 2 se observa en el Cuadro 17, siendo estadísticamente diferente ( $P < 0.05$ ) a 23 cm de profundidad con respecto a 46 y 73 cm de profundidad; lo cual coincide con trabajos de Montenegro (2009) y Quintero (2003) que encontraron incremento de K soluble, con respecto al valor inicial.

Gómez (1995) reporta un incremento en el contenido de K intercambiable en un fluvisol con aplicaciones de vinaza a la profundidad de 0-20 cm, sugiriendo un posible incremento de la salinidad y desbalance nutricional en el suelo a largo plazo, esto por la escasa lixiviación de potasio intercambiable; a mayor profundidad.

Cuadro 17. Medias de K en lixiviados para profundidad

| Profundidad cm | Cosecha 1 | Cosecha 2 |
|----------------|-----------|-----------|
| 23             | 138.89 a  | 8.86 a    |
| 46             | 27.55 b   | 3.24 b    |
| 75             | 12.83 b   | 3.77 b    |

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.  $P < 0.05$ . DSH= 63.89 mg L<sup>-1</sup>

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.  $P < 0.05$ . DSH= 3.91 mg L<sup>-1</sup>

### 6.1.2.2. Efecto de vinaza en concentración de K según dosis

En el tratamiento dosis de K hubo diferencias significativas ( $P < 0.05$ ), en dosis 500 kg de K  $\text{ha}^{-1}$ , comparado con el control, siendo igual estadísticamente a la 250 kg de K  $\text{ha}^{-1}$  (Cuadro 18); Berracal (1987), encontró respuesta a una dosis de 120  $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$  de vinaza en el cultivo de caña, por lo que considera potencial el uso de vinaza como fuente de K.

Cuadro 18. Medias de K ( $\text{mg L}^{-1}$ ) en lixiviados para dosis de cosecha 2

| Dosis K ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) |        |        |
|---------------------------------|--------|--------|
| 0                               | 250    | 500    |
| 3.29 b                          | 3.91 b | 8.54 a |

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.  $P < 0.05$ . DSH=  $1.59 \text{ mg L}^{-1}$

### 6.1.2.3. Efecto de vinaza en concentración de K para días de muestreo

La concentración de K con respecto a los días de muestreo, fue estadísticamente significativa, los días 2 al 6 y 10 de muestreo son estadísticamente diferentes ( $P < 0.05$ ), al resto de los días de muestreo; el K contenido en la vinaza al ser aplicado, probablemente paso a formar parte de la solución del suelo, lixivándose lentamente con el agua aplicada en el riego, sobre el cultivo conforme pasaron los días (Cuadro 19). Fassbender y Bornemisza (1994) mencionan que la velocidad de disolución de los fertilizantes potásicos es rápida; influyendo, el tamaño de partículas del fertilizante, (granulado, retarda sensiblemente) pH, relación y composición química del suelo; lo que concuerda con Navarro y Navarro (2003) que mencionan que la disponibilidad del K intercambiable, influye en la composición coloidal, temperatura, humedad y desecación del suelo pero sobre todo en el ph del suelo.

Henriquez *et al.* (1994) encontraron que los suelos que contenía más minerales (arcillas tipo 2:1), fijaban más K; lo que explica que al adicionar K en forma de fertilizante pasa, en corto tiempo, a cualquiera de las tres fracciones activas del elemento en el suelo (K soluble, K intercambiable y K intercambiable a mediano plazo) de donde es tomado por las plantas.

La diferencia en concentraciones entre cosechas puede deberse a que los requerimientos de la alfalfa eran bajos para las plántulas (cosecha 1), primera aplicación de vinaza; la cosecha 2 se inicio con el corte y adición de vinaza, en el inicio de la cosecha 2, los requerimientos probablemente eran mayores dado que ya estaba establecido el cultivo, las raíces más profundas, pudiendo extraer mayor cantidad de nutrimentos, específicamente K.

Existen diferencias significativas para días de muestreo en cosecha 1 y 2 (Cuadro 19); siendo estadísticamente diferentes ( $P < 0.05$ ), los días 4 y 6 del 13 de muestreo, el resto de los días son semejantes entre sí. En cosecha 2 el día 25 es estadísticamente diferente al resto de los días de muestreo (*Figura 8 y 9*).

Cuadro 19. Medias de K en lixiviados para días de muestreo

| Cosecha 1 |                              | Cosecha 2 |                              |
|-----------|------------------------------|-----------|------------------------------|
| Días      | Media ( $\text{mg L}^{-1}$ ) | Días      | Media ( $\text{mg L}^{-1}$ ) |
| 2         | 143.25 ab                    | 3         | 3.66 b                       |
| 4         | 212.64 a                     | 11        | 3.69 b                       |
| 6         | 236.65 a                     | 18        | 4.90 b                       |
| 8         | 91.15 bc                     | 25        | 10.60 a                      |
| 10        | 157.77 ab                    | 32        | 4.62 b                       |
| 13        | 7.92 c                       | 39        | 4.44 b                       |
| 18        | 7.20 c                       | 56        | 4.97 b                       |
| 22        | 7.10 c                       |           |                              |
| 26        | 7.20 c                       |           |                              |
| 30        | 3.54 c                       |           |                              |
| 37        | 5.99 c                       |           |                              |
| 44        | 5.05 c                       |           |                              |

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.  $P < 0.05$ . DSH = 103.415  $\text{mg L}^{-1}$

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.  $P < 0.05$ . DSH = 3.78  $\text{mg L}^{-1}$

Las medias de las concentraciones de K de la cosecha 1 son superiores a la cosecha 2, lo es posiblemente atribuido a la solubilización e integración del K contenido en la vinaza en el suelo, así como a la remoción de K para el cultivo, para el caso de alfalfa el valor promedio es de 1,77%, con un rango que oscila entre 0,22 y 3,37% (Urbano y Dávila, 2003), para el caso de la segunda cosecha el sistema radicular del cultivo ya establecido, extrajo mayor cantidad de K disponible.

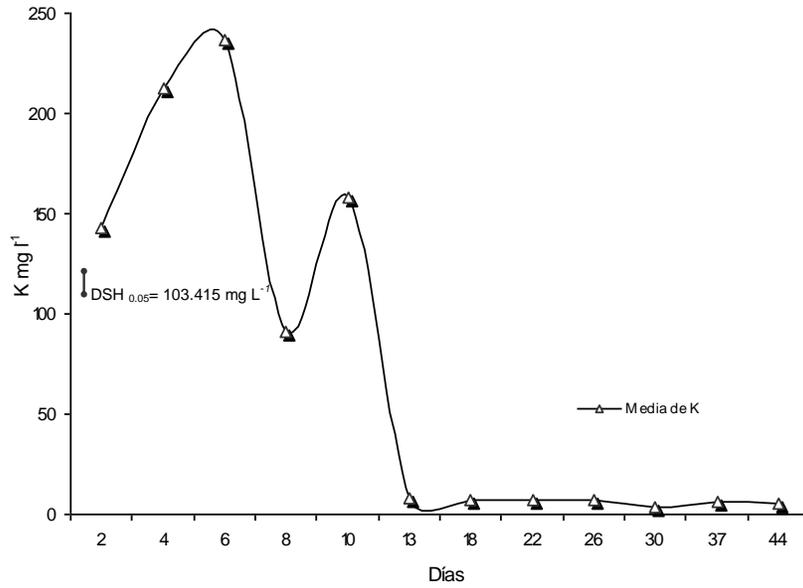


Figura 8. Efecto de la vinaza en la concentración de K por días de muestreo, cosecha 1

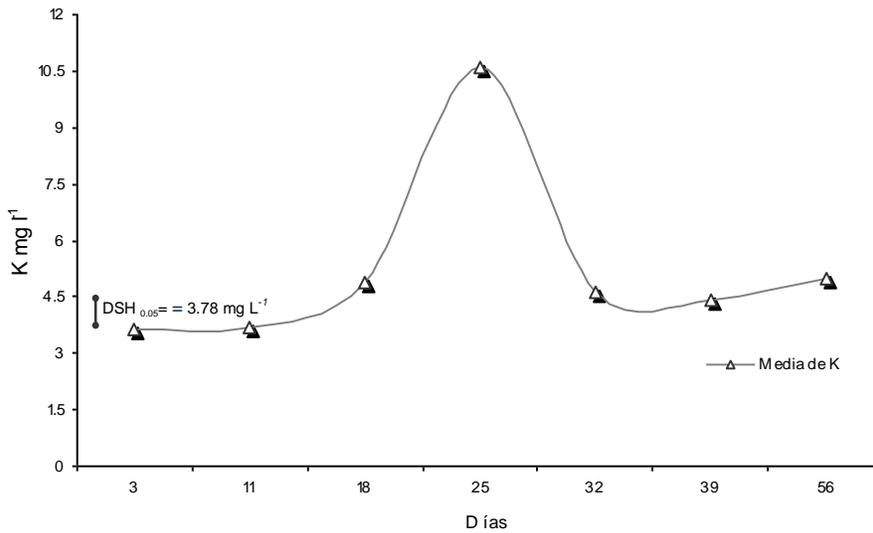


Figura 9. Efecto de la vinaza en la concentración de K por días de muestreo, cosecha 2

#### 6.1.2.4. Efecto de vinaza en concentración de K en lixiviados para la interacción dosis por profundidad

La dosis  $500 \text{ kg ha}^{-1}$ , 23 cm profundidad fue estadísticamente diferente ( $P < 0.05$ ), al resto de la interacción, dicha diferencia puede deberse a la mayor dosis, la mayor concentración de K en los 23 cm de profundidad (Cuadro 20). El mayor incremento en los valores del K,

probablemente se debió al K que contienen las vinazas de acuerdo a Arafat y Yenssen (2002) y Kwong et.al (1997). Gómez (1995) indican que; a la profundidad de 0-20 cm, al incorporar dosis crecientes de vinaza, el contenido de K intercambiable aumentan con respecto a otras profundidades.

Cuadro 20. Medias de K en lixiviados para dosis por profundidad

| Cosecha 2<br>Profundidad | Dosis de K (kg ha <sup>-1</sup> ) |        |         | Promedio |
|--------------------------|-----------------------------------|--------|---------|----------|
|                          | 0                                 | 250    | 500     |          |
| 23                       | 3.78 b                            | 5.44 b | 17.02 a | 3.66 b   |
| 46                       | 2.84 b                            | 2.23 b | 4.63 b  | 3.69 b   |
| 75                       | 3.27 b                            | 4.07 b | 3.98 b  | 4.90 b   |
| Promedio                 | 3.29 b                            | 3.91 b | 8.54 a  |          |

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes. P< 0.05. DSH= 7.09 mg L<sup>-1</sup>

#### 6.1.2.5. Efecto de vinaza en la concentración de K en lixiviados, para la interacción profundidad por días de muestreo

La prueba de Tukey para K en lixiviados en la interacción días de muestreo por profundidad (Cuadro 21), fue estadísticamente (P<0.05), diferente en los 23 cm del día 2 al 6; del resto de la interacción para la cosecha 1 (*Figura 10*). Las concentraciones elevadas de K en lixiviados, se deben a la aplicación de vinaza y disminuyen conforme pasan los días de muestreo; ya que si aumenta la concentración de K soluble, parte de éste dejará la solución del suelo y se unirá electrostáticamente al material coloidal de la fase sólida, K intercambiable (Goulding, 1987).

Cuadro 21. Medias de K en lixiviados para días de muestreo por profundidad

| Cosecha 1 | Profundidad cm |            |          |         |           |
|-----------|----------------|------------|----------|---------|-----------|
|           | Días           | 23         | 46       | 75      | Promedio  |
|           |                |            |          |         | 0         |
|           | 2              | 596.76 a   | 101.17 c | 12.35 c | 143.25 ab |
|           | 4              | 524.74 ab  | 56.59 c  | SL      | 212.64 a  |
|           | 6              | 440.37 ab  | 97.75 c  | 51.45 c | 236.65 a  |
|           | 8              | 298.38 abc | 58.34 c  | 54.88 c | 91.15 bc  |
|           | 10             | 321.02 abc | 49.39 c  | 20.58 c | 157.77 ab |
|           | 13             | 13.43 c    | 5.75 c   | 5.02 c  | 7.92 c    |
|           | 18             | 11.71 c    | 5.72 c   | 4.70 c  | 7.27 c    |
|           | 22             | 11.71 c    | 5.72 c   | 4.66 c  | 7.10 c    |
|           | 26             | 11.54 c    | 5.57 c   | 4.48 c  | 7.20 c    |
|           | 30             | 6.45 c     | 1.83 c   | 2.81 c  | 3.54 c    |
|           | 37             | 5.99 c     | 3.11 c   | 9.45 c  | 5.99 c    |
|           | 44             | 6.59 c     | 3.35 c   | 5.25 c  | 5.05 c    |
|           | Promedio       | 138.89 a   | 27.83 b  | 12.83 b |           |

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.  $P < 0.05$ . DSH =  $192.403 \text{ mg L}^{-1}$  SL = Sin lixiviación

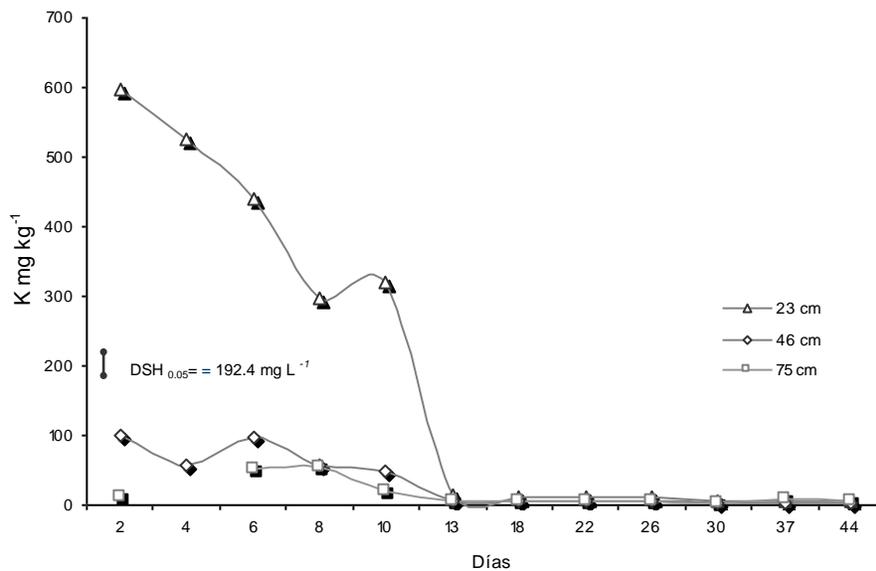


Figura 10. Efecto de vinaza sobre concentración de K en la profundidad para cosecha 1

### 6.1.2.6. Efecto de vinaza en concentración de K para la interacción dosis por días de muestreo

La cosecha 2 existieron diferencias estadísticas ( $P < 0.05$ ), para las medias de lixiviados en la dosis 500 kg de K ha<sup>-1</sup>, del día 25 de muestreo; en el resto de los días no fue significativo (Cuadro 22), se debe a que se aplicó mayor cantidad de K contenido en vinaza, y con el transcurso de los días paso de la forma soluble a intercambiable; como ya se explicó con anterioridad.

Cuadro 22. Medias de K en lixiviados para días de muestreo por dosis

| Cosecha 2 | Dosis de K (kg ha <sup>-1</sup> ) |        |        | Promedio |         |
|-----------|-----------------------------------|--------|--------|----------|---------|
|           | Día                               | 0      | 250    |          | 500     |
|           | 3                                 | 3.40 b | 3.72 b | 3.96 b   | 3.66 b  |
|           | 11                                | 4.16 b | 2.71 b | 4.13 b   | 3.69 b  |
|           | 18                                | 3.21 b | 4.11 b | 7.13 b   | 4.90 b  |
|           | 25                                | 5.15 b | 7.62 b | 19.04 a  | 10.60 a |
|           | 32                                | 1.88 b | 3.19 b | 8.34 b   | 4.62 b  |
|           | 39                                | 2.10 b | 2.51 b | 8.73 b   | 4.44 b  |
|           | 56                                | 2.94 b | 3.52 b | 8.48 b   | 4.97 b  |
| Promedio  |                                   | 3.29 b | 3.91 b | 8.54 a   |         |

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.  $P < 0.05$ . DSH= 7.09 mg L<sup>-1</sup>

### 6.1.2.7. Efecto de vinaza en concentración de K en lixiviados, para la interacción profundidad por dosis por días de muestreo

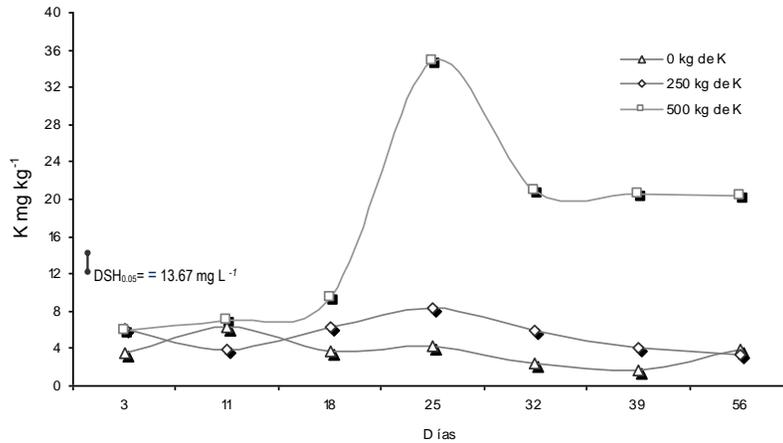
En la prueba de medias de Tukey para la interacción días de muestreo, profundidad y dosis fue estadísticamente significativa ( $P < 0.05$ ), para el día 25 a 23 cm de profundidad y dosis 500 kg de K, siendo diferentes del control y dosis 250 K (kg ha<sup>-1</sup>), para todas los días de muestreo y profundidades; incluyendo los días de muestreo 3, 11, 18 en las tres profundidades para dosis 500 kg de K, el día 25, 32, 39 y 56 a profundidades 46 y 75 de la misma dosis. Las medias que fueron significativamente igual fueron día 25, 32, 39 y 50 a la profundidad 23 cm de dosis 500 kg de K (Cuadro 23).

Cuadro 23. Medias de K en lixiviados para días de muestreo, profundidad y dosis, cosecha 2

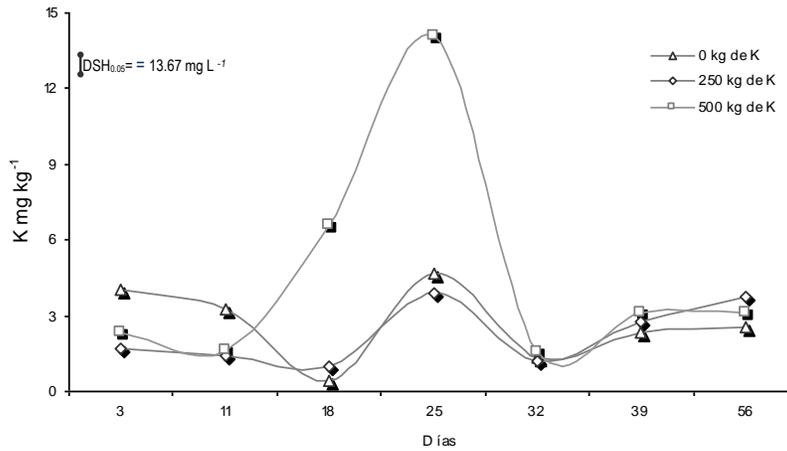
| Días | Profundidad<br>cm | Dosis de K<br>kg ha <sup>-1</sup> |         |          |
|------|-------------------|-----------------------------------|---------|----------|
|      |                   | 0                                 | 250     | 500      |
| 3    | 23                | 3.58 c                            | 6.16 c  | 6.01 c   |
|      | 46                | 4.07 c                            | 1.7 c   | 2.34 c   |
|      | 75                | 2.54 c                            | 3.29 c  | 3.54 c   |
| 11   | 23                | 6.31 c                            | 3.94 c  | 7.09 bc  |
|      | 46                | 3.25 c                            | 1.42 c  | 6.60 c   |
|      | 75                | 2.92 c                            | 2.77 c  | 3.7 c    |
| 18   | 23                | 3.71 c                            | 6.33 c  | 9.39 bc  |
|      | 46                | 0.39 c                            | 0.98 c  | 6.60 c   |
|      | 75                | 4.10 c                            | 5.03 c  | 5.39 c   |
| 25   | 23                | 4.3 c                             | 8.41 bc | 34.83 a  |
|      | 46                | 4.70 c                            | 3.89 c  | 14.07 bc |
|      | 75                | 6.45 c                            | 10.5 bc | 8.21 bc  |
| 32   | 23                | 2.35 c                            | 5.865 c | 20.92 ab |
|      | 46                | 1.37 c                            | 1.17 c  | 1.56 c   |
|      | 75                | 2.15 c                            | 2.545 c | 2.54 c   |
| 39   | 23                | 1.58 c                            | 4.02 c  | 20.53 ab |
|      | 46                | 2.35 c                            | 2.74 c  | 3.13 c   |
|      | 75                | 5.86 c                            | 0.78 c  | 2.54 c   |
| 56   | 23                | 3.91 c                            | 3.32 c  | 20.33 ab |
|      | 46                | 2.55 c                            | 3.72 c  | 3.13 c   |
|      | 75                | 2.35 c                            | 3.52 c  | 1.96 c   |

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.  $P < 0.05$ . DSH= 13.67 mg L<sup>-1</sup>

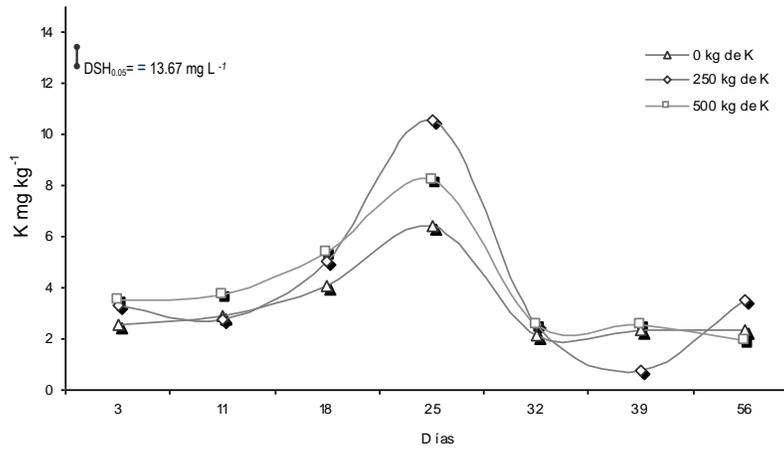
Las medias para dosis 250 y 0 kg de K tienen un incremento en la concentración de K en lixiviados el día 25 de muestreo a profundidad 23; para la misma fecha y profundidad pero dosis 500 kg de K el comportamiento se mantuvo estable con un ligero decremento en la concentración de K (*Figura 11a*); para las profundidades 46 y 75 cm registró un incremento de K para el día de muestreo 25 (*Figuras 11b y 11c*). De acuerdo con Brito y Rolim (2005) y Gómez (1995), dosis crecientes de vinaza aumentan la concentración de K intercambiable, principalmente en capas superficiales.



a) 23 cm



b) 46 cm



c) 75

Figura 11. Efecto de la vinaza en la concentración de K en lixiviados por dosis para días de muestreo a diferentes profundidades, en cosecha 2.

### 6.1.3. Análisis de varianza y comparación de medias en lixiviados para pH

El análisis de varianza para pH en lixiviados fue significativo para los tratamientos profundidad, días de muestreo y la interacción: profundidad por días de muestreo, dosis por días de muestreo y profundidad por dosis por días de muestreo en la cosecha 2 (Cuadro 24).

Cuadro 24. Análisis de varianza para pH en lixiviados

| Fuente de Variación                              | Cosecha 1          |                  |            |        | Cosecha 2          |                  |            |        |
|--|--------------------|------------------|------------|--------|--------------------|------------------|------------|--------|
|  | Grados de libertad | Cuadrados Medios | Valor de F | Pr > F | Grados de libertad | Cuadrados Medios | Valor de F | Pr >F  |
| Profundidad                                      | 2                  | 0.35             | 0.32       | 0.73   | 2                  | 2.68             | 25.37      | 0.002  |
| Dosis de K                                       | 2                  | 0.67             | 0.61       | 0.56   | 2                  | 0.02             | 0.26       | 0.775  |
| Dosis*Profundidad                                | 4                  | 0.70             | 0.64       | 0.65   | 4                  | 0.19             | 1.88       | 0.198  |
| <b>Error a</b><br>(Repetición*Dosis*Profundidad) | 8                  | 1.10             | 1.01       | 0.43   | 9                  | 0.10             | 1.98       | 0.062  |
| Días   | 11                 | 0.66             | 0.61       | 0.81   | 6                  | 2.32             | 43.48      | <.0001 |
| Días*Profundidad                                 | 18                 | 0.67             | 0.62       | 0.87   | 12                 | 0.32             | 6.01       | <.0001 |
| Días*Dosis                                       | 22                 | 0.57             | 0.52       | 0.95   | 12                 | 0.22             | 4.14       | <.0002 |
| Días*Dosis*Profundidad                           | 29                 | 0.73             | 0.67       | 0.87   | 23                 | 0.11             | 2.18       | 0.013  |
| <b>Error b</b>                                   | 52                 | 56.78            |            |        | 48                 | 0.053            |            |        |
| Total  | 149                |                  |            |        | 118                |                  |            |        |

#### 6.1.3.1. Efecto de vinaza en pH de lixiviados para profundidad

En la prueba de Tukey de comparación de medias, a los 23 y 46 cm de profundidad, fue estadísticamente diferente ( $P < 0.05$ ), al valor de 75 cm de profundidad (Cuadro 25); el pH disminuyó 0.54 unidades en el perfil de la columna; lo cual puede deberse a la relación de  $\text{CO}_2$  con los ácidos orgánicos que aceleran el proceso de descomposición disminuyendo pH del suelo (Arafat y Yassen; 2002).

Cuadro 25. Comparación de medias en pH para lixiviados por profundidad de cosecha 2

| Cosecha 2   |          |
|-------------|----------|
| Profundidad | Media pH |
| 23          | 7.85 a   |
| 46          | 7.75 a   |
| 75          | 7.31 b   |

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.  $P < 0.05$ . DSH= 0.198

### 6.1.3.2. Efecto de vinaza en pH de lixiviados para días de muestreo

El análisis de medias para días de muestreo fue significativo ( $P < 0.05$ ), siendo diferente estadísticamente los días de muestreo 3, 11 y 25; los días 3 y 56 no mostraron diferencias, al igual que el día 18 al 39 de muestreo (Cuadro 26). El aumento en el pH puede deberse a la oxidación de la materia orgánica, en condiciones reductoras y debido a la actividad microbiana, forma bióxido de carbono, metano y un aumento de de iones  $\text{OH}^-$  Bohn *et al.*(1993), también es posible que la complejación de las fuentes de acidez del suelo (oxo-hidróxidos de Fe y Al activos y en las superficies de los coloides minerales) por la materia orgánica (Hayes y Bolt, 1991) contenida en la vinaza ocasione el aumento de pH.

Los días transcurridos de la fecha de muestreo 3 a el día 25, habiendo transcurrido 35 de aplicación de vinaza, lo cual corresponde con Brito *et al.* (2007), encontrando diferencias significativas para pH en tiempo por tasa de aplicación de vinaza, encontrando un aumento del pH después de 30 días de aplicación; debido a la intensa degradación de la materia orgánica, liberando electrones de la reducción de oxígeno del agua y por tanto, disminución en la concentración de H, aumentando en consecuencia el pH.

Cuadro 26. Comparación de medias en pH para lixiviados para días de muestreo de cosecha 2

| Cosecha 2 |          |
|-----------|----------|
| Días      | Media pH |
| 3         | 7.07 d   |
| 11        | 7.59 c   |
| 18        | 7.93 ab  |
| 25        | 8.07 a   |
| 32        | 7.85 ab  |
| 39        | 7.72 bc  |
| 56        | 7.19 d   |

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.  $P < 0.05$  DSH = 0.243

### 6.1.3.3. Efecto de vinaza en pH de lixiviados para la interacción profundidad por días de muestreo

En la prueba de Tukey para pH en lixiviados hubieron diferencias estadísticas ( $P < 0.05$ ), para la interacción profundidad por días de muestreo; fueron diferentes el día de muestreo

25 (23 cm) del día 56 a 75 cm; los días de muestreo 3 (23 cm), 32 (75 cm) y 56 (75 cm de profundidad) son estadísticamente iguales; el resto de los días de muestreo fueron iguales estadísticamente a las tres profundidades (Cuadro 27). De manera gráfica se observa (Figura 10) un comportamiento muy similar (profundidad 23 y 46 cm), existiendo un incremento en el día 32 disminuyendo conforme pasan los días de muestreo; lo cual puede deberse a la aplicación de vinaza, como ya se mencionó anteriormente (Figura 12).

Cuadro 27. Comparación de medias para pH en lixiviados en profundidad por número de días

| Cosecha 2<br>Días | Profundidad cm |          |          | Promedio |
|-------------------|----------------|----------|----------|----------|
|                   | 23             | 46       | 75       |          |
| 3                 | 7.14 bc        | 7.00 cd  | 7.11 cd  | 7.07 d   |
| 11                | 7.47 abc       | 7.77 abc | 7.54 abc | 7.59 c   |
| 18                | 8.15 ab        | 8.12 ab  | 7.44 bc  | 7.93 ab  |
| 25                | 8.35 a         | 8.27 ab  | 7.65 abc | 8.07 a   |
| 32                | 8.32 ab        | 8.12 ab  | 7.08 cd  | 7.85 ab  |
| 39                | 7.94 ab        | 7.85 ab  | 7.4 bc   | 7.72 bc  |
| 56                | 7.49 abc       | 7.16 bc  | 6.95 d   | 7.19 d   |
| Promedio          | 7.85 a         | 7.75 a   | 7.31 b   |          |

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.  $P < 0.05$  DSH = 0.513

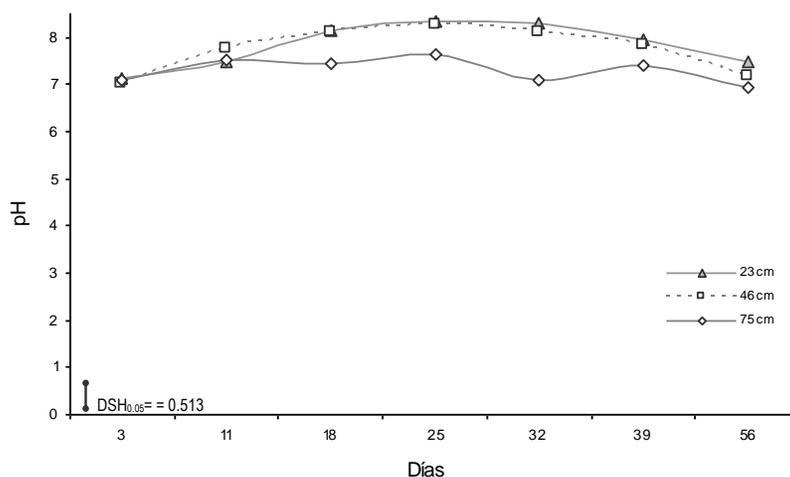


Figura 12. Efecto de la vinaza en pH de lixiviados por dosis para días de muestreo diferentes profundidades, en cosecha 2.

#### 6.1.3.4. Efecto de vinaza en pH de lixiviados para la interacción dosis por días de muestreo

La prueba de medias de Tukey se encontró diferencias significativas ( $P < 0.05$ ), para dosis de 250 y 500  $\text{kg ha}^{-1}$  por el día de muestreo 25, fue estadísticamente diferente del día 3 y 56 para las dos dosis y el testigo (Cuadro 28). Sin embargo la dosis de 250 fueron diferentes los días 11, 39 y 56 para la dosis 500  $\text{kg ha}^{-1}$  y el testigo; estos últimos días de muestreo fueron iguales estadísticamente. Lo que coincide con Arafat y Yassen (2002), concluyen que aplicaciones de vinaza tienen un escaso efecto sobre el pH del suelo.

El efecto de la vinaza sobre el pH para días de muestreo fueron diferentes las días 11 y 39 en la dosis 250 con respecto a la de 500  $\text{kg ha}^{-1}$  y al testigo que fueron estadísticamente iguales.

Cuadro 28. Comparación de medias para pH en lixiviados, cosecha 2

| Día      | Dosis de K ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) |         |         | Promedio |
|----------|------------------------------------|---------|---------|----------|
|          | 0                                  | 250     | 500     |          |
| 3        | 7.12 d                             | 7.04 d  | 7.10 d  | 7.07 d   |
| 11       | 7.82 ab                            | 7.35 cd | 7.66 ab | 7.59 c   |
| 18       | 7.93 ab                            | 8.11 ab | 7.78 ab | 7.93 ab  |
| 25       | 7.97 ab                            | 8.12 a  | 8.12 a  | 8.07 a   |
| 32       | 7.91 ab                            | 7.63 ab | 8.06 ab | 7.85 ab  |
| 39       | 7.91 ab                            | 7.53 cd | 7.75 ab | 7.72 bc  |
| 56       | 7.05 d                             | 7.53 cd | 7.02 d  | 7.19 d   |
| Promedio | 7.65 a                             | 7.64 a  | 7.60 a  |          |

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.  $P < 0.05$  DSH = 0.513

#### 6.1.3.5. Efecto de vinaza en pH de lixiviados para la interacción profundidad por dosis por días de muestreo

En el análisis de comparación de medias de Tukey ( $P < 0.05$ ), para la interacción profundidad, número de días y dosis; en la profundidad no hubo diferencias a los 23 y 26 cm en días de muestreo y la dosis de vinaza no tuvo efecto a estas profundidades; en la profundidad 75 cm para la dosis 250 y 500  $\text{kg ha}^{-1}$  fueron diferentes estadísticamente, para día de muestreo 32 y 56, testigo se fue igual estadísticamente a la dosis 500  $\text{kg ha}^{-1}$ , por lo

anterior se considera que no tuvo efecto la vinaza en el pH para profundidad con respecto de la dosis (Cuadro 29).

El comportamiento del pH se puede apreciar de manera gráfica a través de la profundidad, conforme los días de muestreo se aprecia un incremento para ambas dosis y el testigo y finalmente un descenso en los valores de pH (*Figura 13 a, b y c*).

Cuadro 29. Efecto de vinaza sobre el pH a diferentes profundidades por número de días y dosis

| Días | Profundidad<br>cm | Dosis de K<br>kg ha <sup>-1</sup> |         |         |
|------|-------------------|-----------------------------------|---------|---------|
|      |                   | 0                                 | 250     | 500     |
| 3    | 23                | SL                                | 7.04 bc | 7.23 bc |
|      | 46                | 7.07 bc                           | 6.89 bc | 7.03 bc |
|      | 75                | 7.16 bc                           | 7.16 bc | 7.01 bc |
| 11   | 23                | 6.92 bc                           | 7.19 bc | 8.01 ab |
|      | 46                | 8.25 ab                           | 7.28 bc | 7.76 ab |
|      | 75                | 7.835 ab                          | 7.57 b  | 7.2 bc  |
| 18   | 23                | 8.175 ab                          | 8.19 ab | 8.08 ab |
|      | 46                | 8 ab                              | 8.19 ab | 8.16 ab |
|      | 75                | 7.62 ab                           | 7.78 ab | 7.1 bc  |
| 25   | 23                | 8.27 ab                           | 8.33 ab | 8.40 ab |
|      | 46                | 8.26 ab                           | 8.27 ab | 8.27 ab |
|      | 75                | 7.53 bc                           | 7.74 ab | 7.66 ab |
| 32   | 23                | 8.34 ab                           | 8.26 ab | 8.38 ab |
|      | 46                | 8.05 ab                           | 7.89 ab | 8.41 a  |
|      | 75                | 7.2 bc                            | 6.73 d  | 7.37 bc |
| 39   | 23                | 8.16 ab                           | 7.55 b  | 8.10 ab |
|      | 46                | 7.74 ab                           | 7.78 ab | 8.01 ab |
|      | 75                | 7.81 ab                           | 7.24 bc | 7.14 bc |
| 56   | 23                | 7.40 bc                           | 7.96 ab | 7.10 bc |
|      | 46                | 7.03 bc                           | 7.18 bc | 7.25 bc |
|      | 75                | 6.705 d                           | 7.44 bc | 6.71 d  |

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes. P< 0.05. DSH= 0.880 SL=Sin lixiviado

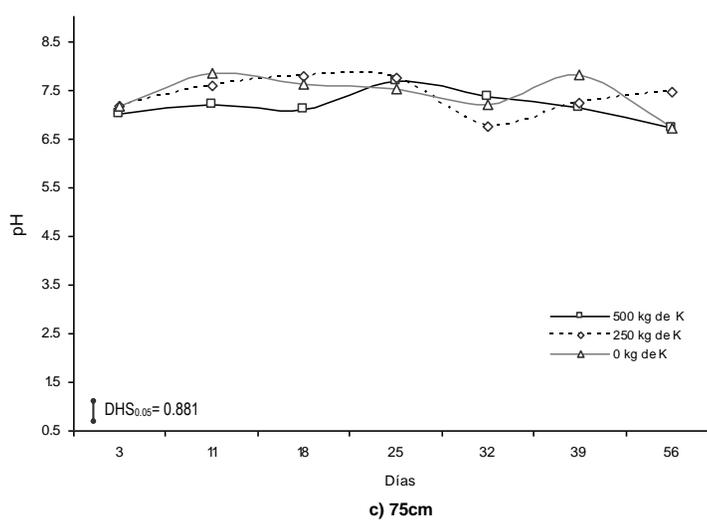
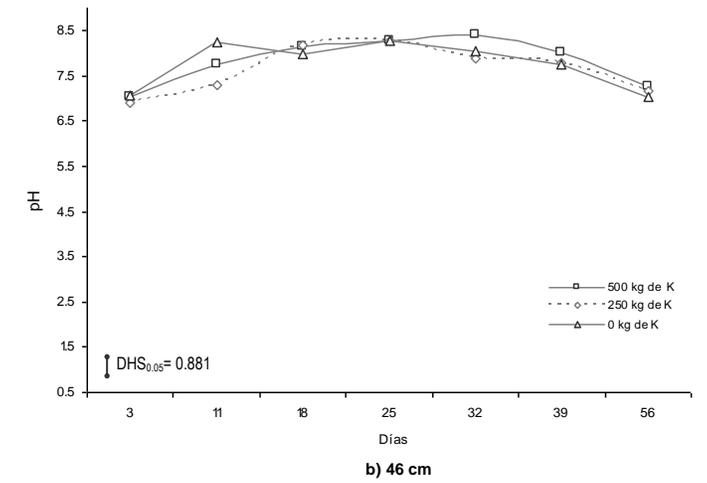
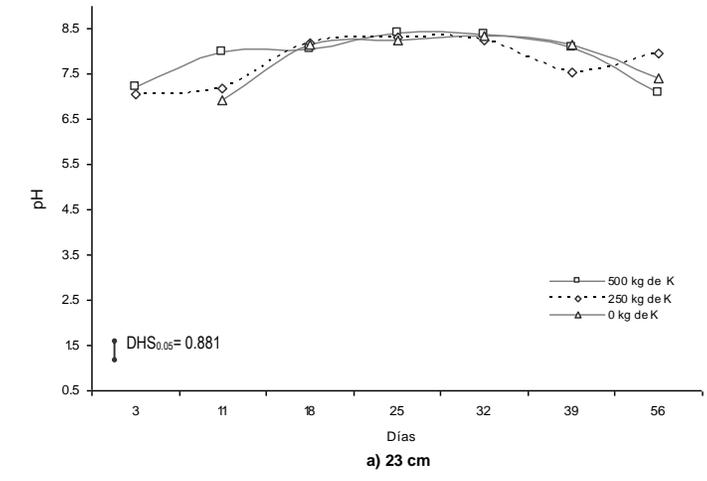


Figura 13. Efecto de la vinaza en el pH de lixiviados por dosis para días de muestreo a diferentes profundidades, en cosecha 2.

## 6.2. Efecto de vinaza en alfalfa

### 6.2.1 Análisis de varianza para variables de respuesta en tejido vegetal de alfalfa

En los Cuadros 30 al 36 se encuentra el resumen de resultados del análisis de varianza (ANOVA) para las variables: Materia Seca, N<sub>Total</sub>, B, Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, Zn y NO<sub>3</sub>.

Cuadro 30. Análisis de varianza para índice de materia seca y nitrógeno en alfalfa

| Fuente de Variación | Materia Seca (%)   |                  |            |        | N (%)              |                  |            |        |
|---------------------|--------------------|------------------|------------|--------|--------------------|------------------|------------|--------|
|                     | Grados de libertad | Cuadrados Medios | Valor de F | Pr > F | Grados de libertad | Cuadrados Medios | Valor de F | Pr > F |
| Cosecha             | 1                  | 103.25           | 14.0       | 0.06   | 1                  | 0.003            | 0.02       | 0.91   |
| Dosis               | 2                  | 4.73             | 0.64       | 0.6    | 2                  | 0.623            | 2.64       | 0.27   |
| Cosecha*Dosis       | 2                  | 7.34             | 1.0        | 0.5    | 2                  | 0.236            | 1.0        | 0.50   |
| <i>Error a</i>      | 6                  | 0.88             |            |        | 6                  | 0.084            |            |        |
| Total               | 11                 |                  |            |        | 11                 |                  |            |        |

Cuadro 31. Análisis de varianza para boro y calcio en alfalfa

| Fuente de Variación | B (mg kg <sup>-1</sup> ) |                  |            |        | Ca (mg kg <sup>-1</sup> ) |                  |            |        |
|---------------------|--------------------------|------------------|------------|--------|---------------------------|------------------|------------|--------|
|                     | Grados de libertad       | Cuadrados Medios | Valor de F | Pr > F | Grados de libertad        | Cuadrados Medios | Valor de F | Pr > F |
| Cosecha             | 1                        | 56.59            | 0.08       | 0.80   | 1                         | 3469132.97       | 6.3        | 0.13   |
| Dosis               | 2                        | 1675.85          | 2.2        | 0.30   | 2                         | 5698207.53       | 10.7       | 0.08   |
| Cosecha*Dosis       | 2                        | 731.87           | 1.0        | 0.50   | 2                         | 557095.96        | 1.0        | 0.50   |
| <i>Error a</i>      | 6                        | 342.62           |            |        | 6                         | 1844666.08       |            |        |
| Total               | 11                       |                  |            |        | 11                        |                  |            |        |

Cuadro 32. Análisis de varianza para cobre y fierro en alfalfa

| Fuente de Variación | Cu ( $mg\ kg^{-1}$ ) |                  |            |        | Fe ( $mg\ kg^{-1}$ ) |                  |            |       |
|---------------------|----------------------|------------------|------------|--------|----------------------|------------------|------------|-------|
|                     | Grados de libertad   | Cuadrados Medios | Valor de F | Pr > F | Grados de libertad   | Cuadrados Medios | Valor de F | Pr >F |
| Cosecha             | 1                    | 5.00             | 2.8        | 0.23   | 1                    | 116.31           | 0.01       | 0.93  |
| Dosis               | 2                    | 8.07             | 4.5        | 0.18   | 2                    | 221573.84        | 14.7       | 0.06  |
| Cosecha*Dosis       | 2                    | 1.78             | 1.0        | 0.50   | 2                    | 14986.44         | 1.0        | 0.50  |
| <i>Error a</i>      | 6                    | 2.98             |            |        | 6                    | 21571.22         |            |       |
| Total               | 11                   |                  |            |        | 11                   |                  |            |       |

Cuadro 33. Análisis de varianza para potasio y magnesio en alfalfa

| Fuente de Variación | K ( $mg\ kg^{-1}$ ) |                  |            |        | Mg ( $mg\ kg^{-1}$ ) |                  |            |       |
|---------------------|---------------------|------------------|------------|--------|----------------------|------------------|------------|-------|
|                     | Grados de libertad  | Cuadrados Medios | Valor de F | Pr > F | Grados de libertad   | Cuadrados Medios | Valor de F | Pr >F |
| Cosecha             | 1                   | 2087001.61       | 0.13       | 0.75   | 1                    | 60335.9          | 0.75       | 0.42  |
| Dosis               | 2                   | 8386360.30       | 0.52       | 0.65   | 2                    | 1435565          | 17.81      | 0.05  |
| Cosecha*Dosis       | 2                   | 16230497.70      | 1.0        | 0.50   | 2                    | 78003.2          | 0.97       | 0.50  |
| <i>Error a</i>      | 6                   | 12979493.6       |            |        | 6                    | 80591.6          |            |       |
| Total               | 11                  |                  |            |        | 11                   |                  |            |       |

Cuadro 34. Análisis de varianza para manganeso y sodio

| Fuente de Variación | Mn ( $mg\ kg^{-1}$ ) |                  |            |        | Na ( $mg\ kg^{-1}$ ) |                  |            |       |
|---------------------|----------------------|------------------|------------|--------|----------------------|------------------|------------|-------|
|                     | Grados de libertad   | Cuadrados Medios | Valor de F | Pr > F | Grados de libertad   | Cuadrados Medios | Valor de F | Pr >F |
| Cosecha             | 1                    | 389.31           | 1.80       | 0.31   | 1                    | 58690.8          | 0.58       | 0.52  |
| Dosis               | 2                    | 751.96           | 3.49       | 0.22   | 2                    | 1459214          | 14.4       | 0.06  |
| Cosecha*Dosis       | 2                    | 251.73           | 1.0        | 0.50   | 2                    | 100874           | 1.0        | 0.50  |
| <i>Error a</i>      | 6                    | 274.97           |            |        | 6                    | 204576.7         |            |       |
| Total               | 11                   |                  |            |        | 11                   |                  |            |       |

Cuadro 35. Análisis de varianza para fósforo y zinc

| Fuente de Variación | P ( $mg\ kg^{-1}$ ) |                  |            |        | Zn ( $mg\ kg^{-1}$ ) |                  |            |       |
|---------------------|---------------------|------------------|------------|--------|----------------------|------------------|------------|-------|
|                     | Grados de libertad  | Cuadrados Medios | Valor de F | Pr > F | Grados de libertad   | Cuadrados Medios | Valor de F | Pr >F |
| Cosecha             | 1                   | 25682.6          | 2.6        | 0.24   | 1                    | 7.19             | 6.32       | 0.12  |
| Dosis               | 2                   | 854152.1         | 87.6       | 0.01   | 2                    | 243.8            | 214.3      | 0.004 |
| Cosecha*Dosis       | 2                   | 9748.8           | 1.0        | 0.50   | 2                    | 1.13             | 1.0        | 0.50  |
| <i>Error a</i>      | 6                   | 131426.29        |            |        | 6                    | 28.05            |            |       |
| Total               | 11                  |                  |            |        | 11                   |                  |            |       |

Cuadro 36. Análisis de varianza para nitratos

| Fuente de Variación | NO <sub>3</sub> ( $mg\ kg^{-1}$ ) |                  |            |        |
|---------------------|-----------------------------------|------------------|------------|--------|
|                     | Grados de libertad                | Cuadrados Medios | Valor de F | Pr > F |
| Cosecha             | 1                                 | 3754983.6        | 1.44       | 0.35   |
| Dosis               | 2                                 | 11918271.3       | 4.59       | 0.17   |
| Cosecha*Dosis       | 2                                 | 2599069.1        | 1.00       | 0.50   |
| <i>Error a</i>      | 6                                 | 2535551.01       |            |        |
| Total               | 11                                |                  |            |        |

### 6.2.2. Comparación de medias

El análisis de varianza y prueba de medias se resumen en el siguiente cuadro. Los valores se expresan en concentraciones totales Cuadro 37.

Cuadro 37. Efecto de vinaza en alfalfa comparación de medias en variables de respuesta

| Medias                  | M.S     | N      | B                               | Ca       | Cu      | Fe       | K      | Mg       | Mn      | Na       | P         | Zn      | NO <sub>3</sub> |
|-------------------------|---------|--------|---------------------------------|----------|---------|----------|--------|----------|---------|----------|-----------|---------|-----------------|
|                         | %       |        | ----- mg kg <sup>-1</sup> ----- |          |         |          |        |          |         |          |           |         |                 |
| <b>Alfalfa</b>          |         |        |                                 |          |         |          |        |          |         |          |           |         |                 |
| Corte 1                 | 13.65 a | 3.23 a | 93.90 a                         | 3836.4 a | 3.78 a  | 324.0 a  | 5148 a | 1541.3 a | 17.92 a | 959.5 a  | 1488.9 a  | 20.47 a | 3976.5 a        |
| Corte 2                 | 19.51 a | 3.19 a | 98.25 a                         | 4911.7 a | 2.49 a  | 330.22 a | 5982 a | 1399.5 a | 29.32 a | 819.6 a  | 1396.3 a  | 18.92 a | 2857.8 a        |
| Pr>F                    | 0.0644  | 0.912  | 0.8071                          | 0.13     | 0.236   | 0.937    | 0.754  | 0.471    | 0.311   | 0.525    | 0.246     | 0.128   | 0.352           |
| <b>Dosis de K</b>       |         |        |                                 |          |         |          |        |          |         |          |           |         |                 |
| 0 kg ha <sup>-1</sup>   | 15.47 a | 3.41 a | 73.65 a                         | 3523.0 a | 1.613 a | 171.4 a  | 5708 a | 1008.4 a | 14.97 a | 539.5 a  | 1025.2 b  | 14.17 b | 5274 a          |
| 250 kg ha <sup>-1</sup> | 16.62 a | 3.46 a | 100.84 a                        | 3821.7 a | 4.423 a | 212.0 a  | 4051 a | 1255.5 a | 16.47a  | 542.1 a  | 1363.4 ab | 16.29 b | 3116 a          |
| 500 kg ha <sup>-1</sup> | 17.65 a | 2.75 a | 113.74 a                        | 5777.5 a | 3.38 a  | 597.9 a  | 6936 a | 2147.3 a | 39.43 a | 1587.0 a | 1939.2 a  | 28.63 a | 1862 a          |
| Pr>F                    | 0.6081  | 0.27   | 0.304                           | 0.085    | 0.1812  | 0.0634   | 0.6593 | 0.0515   | 0.2229  | 0.0647   | 0.0113    | 0.0046  | 0.179           |
| DHS                     |         |        |                                 |          |         |          |        |          |         |          | 786.68    | 11.49   |                 |

Donde: M.S= Materia Seca. a, b; Medias con la misma letra por hilera, no son significativamente diferentes (P<0.05).

### 6.2.3. Efecto de la vinaza en cortes de alfalfa

Los resultados del ANOVA en alfalfa en materia seca no fueron significativos estadísticamente para ninguna variable de respuesta en ambos cortes de alfalfa.

### 6.2.4. Efecto de la vinaza en alfalfa para dosis de K

El análisis de varianza y de medias para dosis de K, hubo diferencias significativas para P y Zn; siendo estadísticamente diferente (P<0.05), la dosis 500 K (kg ha<sup>-1</sup>) a la dosis 0 kg de K (kg ha<sup>-1</sup>); la dosis 250 K (kg ha<sup>-1</sup>) fue estadísticamente igual al testigo (0 kg de K) para las variables de respuesta P y Zn; en el resto de las variables no fueron significativas estadísticamente.

La utilización de la vinaza como fertilizante para la alfalfa mostró ser una buena alternativa, teniendo en cuenta que hubo un aumento en el contenido de potasio en las hojas de alfalfa cultivados en dos tipos de suelo y que el aumento en la producción de materia seca cuando se fertiliza con vinaza (Bianchi, 2008).

El efecto de la vinaza en la dosis 500 kg ha<sup>-1</sup> de K tubo un aumento del 52.86% de P (1939.2 mg kg<sup>-1</sup>) y 49.49% de Zn (28.63 mg kg<sup>-1</sup>), con respecto al testigo (Figura 14 y 15), lo cual puede atribuirse a la aplicación de vinaza; sin embargo los valores obtenidos bajo

esta dosis no cumplen con los valores obtenidos de alfalfa bajo condiciones óptimas  $P=3,300 \text{ mg kg}^{-1}$  y  $Zn = 37.40 \text{ mg kg}^{-1}$  (NRC, 1996).

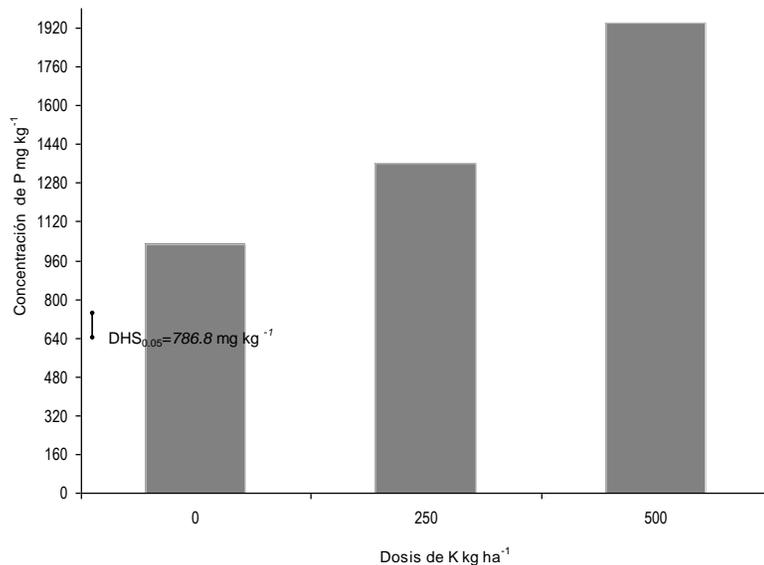


Figura 14. Efecto de la vinaza en contenido de P en tejido vegetal para dosis de K ( $\text{kg ha}^{-1}$ ).

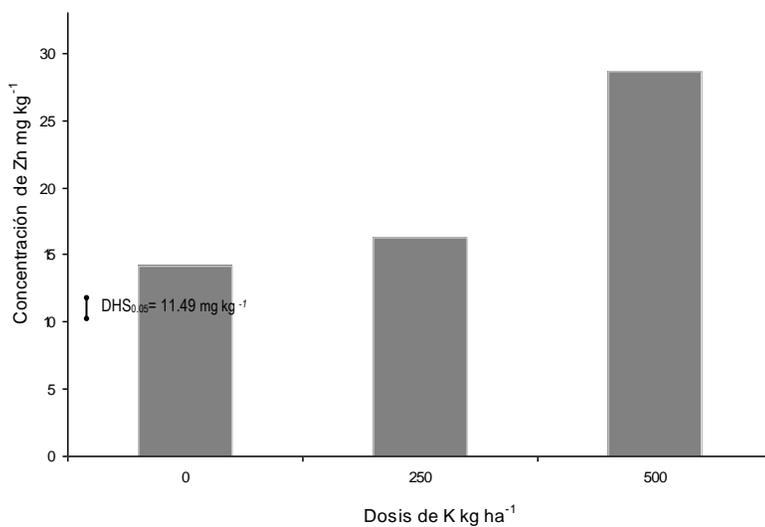


Figura 15. Efecto de la vinaza en contenido de Zn en tejido vegetal para dosis de K ( $\text{kg ha}^{-1}$ ).

### 6.3. Efecto de la vinaza en el suelo

#### 6.3.1. Análisis de varianza para variables de respuesta en suelo

En los Cuadros 38 al 42 se encuentra el resumen de resultados del análisis de varianza, para las variables: CE, pH, NH<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, P, K, Na, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, Mn y materia orgánica (MO).

Cuadro 38. Análisis de varianza para CE, pH y NO<sub>4</sub> en suelo tratado con vinaza

| Fuente de Variación | CE(mmho/cm)        |                  |            |        | pH                 |                  |            |       | NH <sub>4</sub> (mg L <sup>-1</sup> ) |                  |            |       |
|---------------------|--------------------|------------------|------------|--------|--------------------|------------------|------------|-------|---------------------------------------|------------------|------------|-------|
|                     | Grados de libertad | Cuadrados Medios | Valor de F | Pr > F | Grados de libertad | Cuadrados Medios | Valor De F | Pr >F | Grados de libertad                    | Cuadrados Medios | Valor de F | Pr >F |
| P                   | 3                  | 0.22             | 3.81       | 0.02   | 3                  | 0.40             | 84.51      | 0.002 | 3                                     | 0.0004           | 1.94       | 0.30  |
| R                   | 1                  | 0.02             | 0.43       | 0.52   | 1                  | 0.009            | 0.37       | 0.56  | 1                                     | 0.0001           | 0.83       | 0.38  |
| Error a             | 3                  | 0.01             | 0.24       | 0.86   | 3                  | 0.004            | 0.18       | 0.90  | 3                                     | 0.0002           | 1.99       | 0.19  |
| D                   | 2                  | 0.28             | 4.81       | 0.04   | 2                  | 0.006            | 0.23       | 0.79  | 2                                     | 0.0006           | 5.23       | 0.03  |
| D*P                 | 6                  | 0.031            | 0.53       | 0.07   | 6                  | 0.023            | 0.83       | 0.54  | 6                                     | 0.0002           | 1.99       | 0.18  |
| Error b             | 8                  | 0.059            |            |        | 8                  | 0.026            |            |       | 8                                     | 0.0001           |            |       |
| Total               | 23                 |                  |            |        | 23                 |                  |            |       | 23                                    |                  |            |       |

Donde: P= Profundidad, R=Repetición y D=Dosis

Cuadro 39. Análisis de varianza para NO<sub>3</sub>, P y K en suelo tratado con vinaza

| Fuente de Variación | NO <sub>3</sub> (mg L <sup>-1</sup> ) |                  |            |        | P (mg kg <sup>-1</sup> ) |                  |            |        | K (mg kg <sup>-1</sup> ) |                  |            |       |
|---------------------|---------------------------------------|------------------|------------|--------|--------------------------|------------------|------------|--------|--------------------------|------------------|------------|-------|
|                     | Grados de libertad                    | Cuadrados Medios | Valor de F | Pr > F | Grados de libertad       | Cuadrados Medios | Valor de F | Pr >F  | Grados de libertad       | Cuadrados Medios | Valor de F | Pr >F |
| P                   | 3                                     | 0.002            | 2.73       | 0.21   | 3                        | 107.27           | 769.3      | >.0001 | 3                        | 410.8            | 13.73      | 0.07  |
| R                   | 1                                     | 0.0006           | 0.37       | 0.21   | 1                        | 0.33             | 1.04       | 0.33   | 1                        | 35.8             | 1.20       | 0.30  |
| Error a             | 3                                     | 0.0007           | 0.18       | 0.15   | 3                        | 0.13             | 0.44       | 0.73   | 3                        | 61.2             | 2.05       | 0.18  |
| D                   | 2                                     | 0.0006           | 0.23       | 0.20   | 2                        | 0.55             | 1.76       | 0.23   | 2                        | 312.4            | 10.44      | 0.005 |
| D*P                 | 6                                     | 0.0003           | 0.89       | 0.44   | 6                        | 0.24             | 0.78       | 0.60   | 6                        | 153.24           | 5.12       | 0.01  |
| Error b             | 8                                     | 0.0003           |            |        | 8                        | 0.31             |            |        | 8                        | 29.9             |            |       |
| Total               | 23                                    |                  |            |        | 23                       |                  |            |        | 23                       |                  |            |       |

Donde: P= Profundidad, R=Repetición y D=Dosis

Cuadro 40. Análisis de varianza para Na, Ca y Mg en suelo tratado con vinaza

| Fuente de Variación | Na ( $mg\ kg^{-1}$ ) |                  |            |        | Ca ( $ug\ mL^{-1}$ ) |                  |            |        | Mg ( $ug\ mL^{-1}$ ) |                  |            |        |
|---------------------|----------------------|------------------|------------|--------|----------------------|------------------|------------|--------|----------------------|------------------|------------|--------|
|                     | Grados de libertad   | Cuadrados Medios | Valor de F | Pr > F | Grados de libertad   | Cuadrados Medios | Valor de F | Pr > F | Grados de libertad   | Cuadrados Medios | Valor de F | Pr > F |
| P                   | 3                    | 415.1            | 38.51      | 0.006  | 3                    | 8481655          | 420.0      | 0.0002 | 3                    | 62032.6          | 115.9      | 0.001  |
| R                   | 1                    | 49.53            | 1.17       | 0.31   | 1                    | 3528.3           | 0.17       | 0.69   | 1                    | 55.2             | 0.13       | 0.72   |
| Error a             | 3                    | 10.77            | 0.25       | 0.85   | 3                    | 20190.9          | 0.98       | 0.45   | 3                    | 535.0            | 1.26       | 0.35   |
| D                   | 2                    | 105.9            | 2.51       | 0.14   | 2                    | 8654.6           | 0.42       | 0.67   | 2                    | 1588.8           | 3.74       | 0.07   |
| D*P                 | 6                    | 109.6            | 2.59       | 0.10   | 6                    | 33893.6          | 1.64       | 0.25   | 6                    | 3934.4           | 9.26       | 0.003  |
| Error b             | 8                    | 42.2             |            |        | 8                    | 20692.7          |            |        | 8                    | 425.0            |            |        |
| Total               | 23                   |                  |            |        | 23                   |                  |            |        | 23                   |                  |            |        |

Donde: P= Profundidad, R=Repetición y D=Dosis

Cuadro 41. Análisis de varianza para Fe, Cu y Zn en suelo tratado con vinaza

| Fuente de Variación | Fe ( $mg\ kg^{-1}$ ) |                  |            |        | Cu ( $mg\ kg^{-1}$ ) |                  |            |        | Zn ( $mg\ kg^{-1}$ ) |                  |            |        |
|---------------------|----------------------|------------------|------------|--------|----------------------|------------------|------------|--------|----------------------|------------------|------------|--------|
|                     | Grados de libertad   | Cuadrados Medios | Valor de F | Pr > F | Grados de libertad   | Cuadrados Medios | Valor de F | Pr > F | Grados de libertad   | Cuadrados Medios | Valor de F | Pr > F |
| P                   | 3                    | 1768.3           | 44.28      | 0.0056 | 3                    | 1.25             | 26.04      | 0.001  | 3                    | 7.54             | 101.9      | 0.001  |
| R                   | 1                    | 0.49             | 0.01       | 0.92   | 1                    | 0.01             | 0.44       | 0.52   | 1                    | 0.04             | 0.14       | 0.71   |
| Error a             | 3                    | 39.9             | 0.74       | 0.55   | 3                    | 0.04             | 1.21       | 0.36   | 3                    | 0.07             | 0.24       | 0.86   |
| D                   | 2                    | 46.7             | 0.86       | 0.45   | 2                    | 0.04             | 1.11       | 0.37   | 2                    | 0.43             | 1.40       | 0.30   |
| D*P                 | 6                    | 10.9             | 0.20       | 0.96   | 6                    | 0.01             | 0.39       | 0.86   | 6                    | 0.06             | 0.21       | 0.96   |
| Error b             | 8                    | 54.1             |            |        | 8                    | 0.039            |            |        | 8                    | 0.30             |            |        |
| Total               | 23                   |                  |            |        | 23                   |                  |            |        | 23                   |                  |            |        |

Donde: P= Profundidad, R=Repetición y D=Dosis

Cuadro 42. Análisis de varianza para Mn, MO y PS en suelo tratado con vinaza

| Fuente de Variación | Mn ( $mg\ kg^{-1}$ ) |                  |            |        | MO                 |                  |            |        | PS                 |                  |            |        |
|---------------------|----------------------|------------------|------------|--------|--------------------|------------------|------------|--------|--------------------|------------------|------------|--------|
|                     | Grados de libertad   | Cuadrados Medios | Valor de F | Pr > F | Grados de libertad | Cuadrados Medios | Valor de F | Pr > F | Grados de libertad | Cuadrados Medios | Valor de F | Pr > F |
| P                   | 3                    | 269.2            | 26.1       | 0.01   | 3                  | 70.96            | 1119       | <.0001 | 3                  | 166.4            | 11.87      | 0.03   |
| R                   | 1                    | 0.54             | 0.05       | 0.82   | 1                  | 0.11             | 0.10       | 0.76   | 1                  | 9.12             | 1.08       | 0.32   |
| Error a             | 3                    | 11.34            | 1.10       | 0.40   | 3                  | 0.06             | 0.05       | 0.98   | 3                  | 14.02            | 1.66       | 0.25   |
| D                   | 2                    | 1.17             | 0.11       | 0.89   | 2                  | 3.57             | 3.09       | 0.10   | 2                  | 3.8              | 0.45       | 0.65   |
| D*P                 | 6                    | 4.12             | 0.40       | 0.85   | 6                  | 2.22             | 1.92       | 0.19   | 6                  | 1.56             | 0.19       | 0.97   |
| Error b             | 8                    | 10.31            |            |        | 8                  | 1.15             |            |        | 8                  | 8.43             |            |        |
| Total               | 23                   |                  |            |        | 23                 |                  |            |        | 23                 |                  |            |        |

Donde: P= Profundidad, R=Repetición y D=Dosis

### 6.3.1.1. Comparación de medias para variables de respuesta en suelo

En el Cuadro 43 se encuentra el resumen de comparación de medias de Tukey para variables de respuesta por tratamiento: profundidad y dosis. Se incluye la DHS (diferencia

honesta significativa) para las variables que fueron significativas. Para la clasificar los resultados obtenidos se aplicará la NOM-021.RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos.

Cuadro 43. Efecto de vinaza en suelo comparación de medias en variables de respuesta

|                               | CE                 | pH           | NH <sub>4</sub>    | NO <sub>3</sub> | P                   | K           | Na           | Ca                 | Mg            | Fe            | Cu                  | Zn           | Mn           | MO           |
|-------------------------------|--------------------|--------------|--------------------|-----------------|---------------------|-------------|--------------|--------------------|---------------|---------------|---------------------|--------------|--------------|--------------|
| Medias                        | dS m <sup>-1</sup> |              | mL l <sup>-1</sup> |                 | mg kg <sup>-1</sup> |             |              | ug l <sup>-1</sup> |               |               | mg kg <sup>-1</sup> |              |              | %            |
| <b>P (cm)</b>                 |                    |              |                    |                 |                     |             |              |                    |               |               |                     |              |              |              |
| 1 (0 -10)                     | 0.87 a             | 7.55 a       | 3.58 a             | 3.60 a          | 7.85 a              | 17.9 a      | 15.7 a       | 3231 a             | 468.8 a       | 40.34 a       | 0.96 a              | 2.52 a       | 19.04 a      | 7.3 a        |
| 2 (11 - 30)                   | 0.57 b             | 7.57 a       | 3.56 a             | 3.57 a          | 6.88 a              | 5.41 a      | 16.9 a       | 3200 a             | 376.8 b       | 25.5 b        | 0.76 a              | 2.09 a       | 10.6 b       | 6.69 a       |
| 3 (31 - 55)                   | 0.49 b             | 7.29 ab      | 3.57 a             | 3.56 a          | 0.10 b              | 0.58 a      | 2.3 b        | 1362 b             | 270.1 c       | 6.77 c        | 0.12 b              | 0.34 b       | 5.27 bc      | 1.53 b       |
| 4 (56 - 65)                   | 0.43 b             | 7.02 b       | 3.58 a             | 3.56 a          | 0.04 b              | 0.33 a      | 0.77 b       | 985 c              | 249.4 c       | 3.63 c        | 0.05 b              | 0.44 b       | 4.51 c       | 0.66 b       |
| DHS                           | <b>0.213</b>       | <b>0.135</b> |                    |                 | <b>0.768</b>        |             | <b>6.994</b> | <b>302.812</b>     | <b>49.291</b> | <b>13.461</b> | <b>0.467</b>        | <b>0.580</b> | <b>7.176</b> | <b>0.535</b> |
| <b>D (kg ha<sup>-1</sup>)</b> |                    |              |                    |                 |                     |             |              |                    |               |               |                     |              |              |              |
| 0                             | 0.40 b             | 7.36 a       | 3.572 b            | 3.56 a          | 3.64 a              | 0.735 b     | 10.64 a      | 2158 a             | 350 a         | 21.65 a       | 0.55 a              | 1.62 a       | 9.87 a       | 4.17 a       |
| 250                           | 0.58 ab            | 7.38 a       | 3.571 ab           | 3.57 a          | 3.50 a              | 4.55 b      | 11.49 a      | 2220 a             | 348 a         | 16.86 a       | 0.41 a              | 1.25 a       | 9.46 a       | 3.32 a       |
| 500                           | 0.78 a             | 7.33 a       | 3.586 a            | 3.58 a          | 4.01 a              | 12.95 a     | 2.60 a       | 2206 a             | 325 a         | 18.72 a       | 0.45 a              | 1.18 a       | 10.23 a      | 4.64 a       |
| DHS                           | <b>0.395</b>       |              | <b>0.016</b>       |                 |                     | <b>7.81</b> |              |                    |               |               |                     |              |              |              |

a, b; Medias con la misma letra por hilera, no son significativamente diferentes ( $P < 0.05$ ). Donde: P= profundidad, D= dosis, DHS= diferencia honesta significativa, CE= conductividad eléctrica, MO=materia orgánica y PS= porcentaje de saturación en suelo

### 6.3.2. Efecto de vinaza en la profundidad del suelo

#### 6.3.2.1. Efecto en CE

La prueba de medias para CE, fue significativa para profundidad 1 (10 cm), siendo estadísticamente diferente al resto de las profundidades, lo cual puede atribuirse a la aplicación de vinaza; como lo indica Camargo (1983), menciona que la CE alcanzó valores no dañinos para las plantas con las dosis utilizadas, pero indica, sin embargo, que hubo un aumento de sales en proporción a la dosis aplicada, lo que indica riesgo de salinización en suelo.

Bautista (2000b) encontró que la CE disminuye con la profundidad, lo cual atribuye a el tipo de suelo (fluvisol); el cual presenta mayor retención de iones en las arcillas aluminosilicatada, sin embargo la aplicación de vinaza alcanzó niveles entre 3 y 4 dS m<sup>-1</sup> de CE, considera que el valor de CE de la vinaza cruda es de 27 dSm<sup>-1</sup>, el aumento en el suelo, concluye no es tan considerable.

La CE a la profundidad 1, se clasifica con efectos despreciables de la salinidad ( $<1.0 \text{ dSm}^{-1}$  a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , NOM-021.RECNAT-2000)

#### **6.3.2.2. Efecto en pH**

Respecto al pH fue significativo ( $P < 0.05$ ), siendo estadísticamente diferente las profundidades 1 y 2 de la 4, lo cual implica un incremento de pH en los primeros 30 cm, aplicando la normatividad, el pH del suelo es medianamente alcalino (profundidad 1, 2 y 3), en la profundidad 4 el resultado de pH es neutro. Los resultados corresponden a los reportados por Orlando Filho *et al.* (1983), Brito *et al.* (2005) y Bianchi (2008), concluyen que en todas las dosis de vinaza aplicada y el pH del suelo es eleva.; se deba probablemente al potencial de reducción que tiene la vinaza, sobre todo el contenido de la materia orgánica que es degrada fácilmente (Brito *et al.* 2009).

Bautista *et al.* (1998 y 2000b) coincide que tratamientos con dosis de vinaza cruda, los valores de pH fueron más altos ( $0.05$ ) que el control; observó que el pH no disminuye con el tiempo, concluyendo que no será un efecto temporal. El pH de la profundidad 1, se clasifica: medianamente alcalino ( $7.4 - 8.5$  medianamente alcalino, NOM-021.RECNAT-2000)

#### **6.3.2.3. Efecto en P y bases intercambiables**

En la prueba de medias para las variables de respuesta significativas ( $P > 0.05$ ), P y para las bases intercambiables (Na, Mg y Ca) en profundidad para el caso de P y Na, las profundidades 1 y 2 fueron estadísticamente diferentes de 3 y 4; los valores de las profundidades 1, 2 y 3 fueron estadísticamente diferentes entre sí, la 3 y 4 fueron iguales en relación al contenido de Mg; En el caso de Ca las profundidades 1 y 2 fueron estadísticamente diferentes de las profundidades 3 y 4. Las concentraciones de P, Na, Mg y Ca (*Figura 16*), fueron mayores las concentraciones en profundidad 1 disminuyendo en las siguientes profundidades; como lo indican Bautista *et al.* (2000a), encontrando un aumento en el contenido de Mg y Ca intercambiable, al aplicar vinaza al suelo; lo cual es posible ya

que el Ca y Mg y otros iones se encuentren fuertemente retenidos entre las arcillas del suelo y por el efecto de la materia orgánica contenida en vinaza.

Gentos *et al.* (2002), encontró un incremento de Na y Mn disponible, debido a la aplicación de vinaza en el suelo; Brito y Rolim (2005), encontraron que la aplicación de vinaza causó un cambio en las concentraciones de Ca, Mg y Na en el suelo, en algunos casos disminuyó con el paso del tiempo de aplicada la vinaza.

Estudios realizados con dosis crecientes de vinaza aplicadas al suelo (Armengol *et al.* 2003), reportan valores de P mayores que el control y a la fertilización mineral; consideran a la vinaza una fuente importante de aporte de P al suelo, el incremento se debe a la adecuada mineralización de la materia orgánica y debido a que el P se encuentra de forma en la vinaza, se liberó a formas asimilables y se mantienen sostenidos en el tiempo, garantizando la demanda en los diferentes etapas del cultivo.

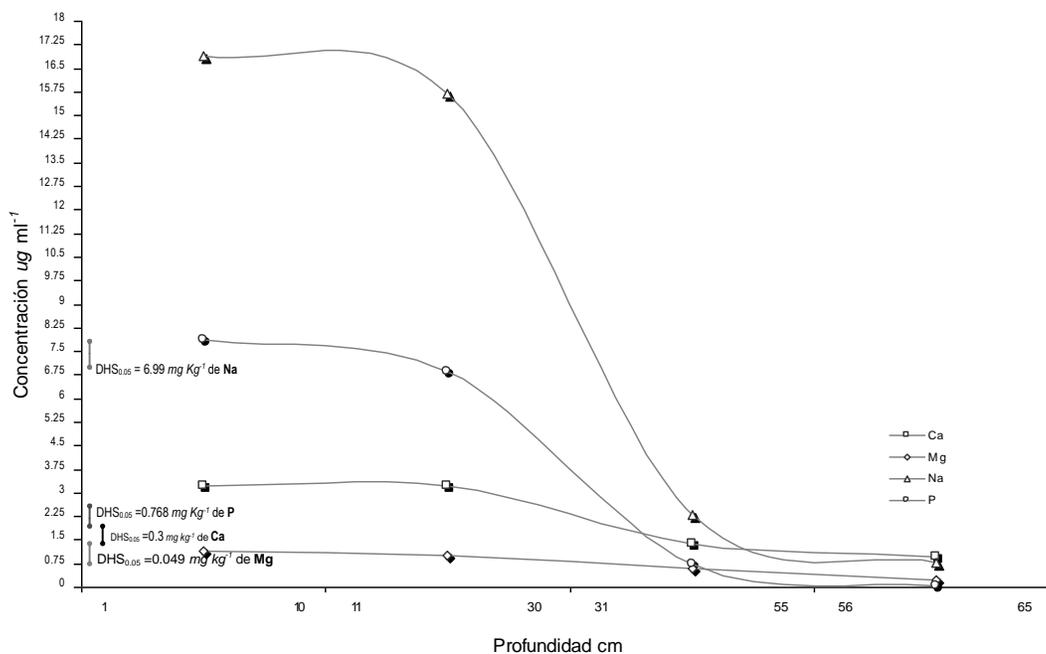


Figura 16. Efecto de vinaza en P y bases intercambiables en el suelo.

Los resultados de Gómez (1996), evidencian que la aplicación de vinaza, puede substituir el 72 % del fósforo ( $P_2O_5$ ), proveniente de la fertilización mineral. Bautista *et al.* (2000b), menciona que el aumento de P posiblemente se deba al efecto combinado del aumento de

pH y de las condiciones reductoras (disminución de la formación de compuestos entre el Fe (III) y el ión  $\text{PO}_4^{3-}$  por el cambio de estado de oxidación de Fe III a Fe II) y la formación de quelatos de Fe.

La concentración P a la profundidad 1, se clasifica como media ( $5.5 - 11 \text{ mg kg}^{-1}$ , NOM-021.RECNAT-2000), en la aplicación de NOM-021.RECNAT-2000 como criterio de clasificación de bases intercambiables, a la profundidad 1, el contenido de Mg ( $3.9 \cdot 10^{-3} \text{ cmol (+) kg}^{-1}$ ) se clasifica: muy baja (menor de  $0.5 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$ ) y Ca ( $0.016 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$ ), se clasifica: muy baja (menor de  $2 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$ ).

#### **6.3.2.4. Efecto en materia orgánica**

En la prueba de medias para la variable de respuesta ( $P > 0.05$ ), materia orgánica se encontraron diferencias significativas a la profundidad 1 y 2 con respecto de la 3 y 4; encontrándose mayor contenido de materia orgánica en los primeros 30 cm de profundidad, lo cual puede atribuirse a la aplicación de vinaza (*Figura 17*), tal como lo menciona Filho (1996), que obtuvo incremento en el contenido de materia orgánica, en suelos adicionados con vinaza.

Armengol *et al.* (2003), señalan a la vinaza como un residuo orgánico capaz de inducir modificaciones en la materia orgánica y producir efecto residual al menos cinco años consecutivos, de aplicación de vinaza ( $150, 200 \text{ y } 250 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ) sobre la materia orgánica, las que se diferencian del resto de los tratamientos, dosis menores de vinaza, el control y del tratamiento que recibió fertilizante mineral; este último no modificó este índice en ninguno de los años evaluados.

Los incrementos de materia orgánica que obtuvieron Arafat y Yanssen (2002), en suelos tratados con vinaza ( $20 \text{ mL L}^{-1}$ ), fueron del 41 % en relación al tratamiento control.

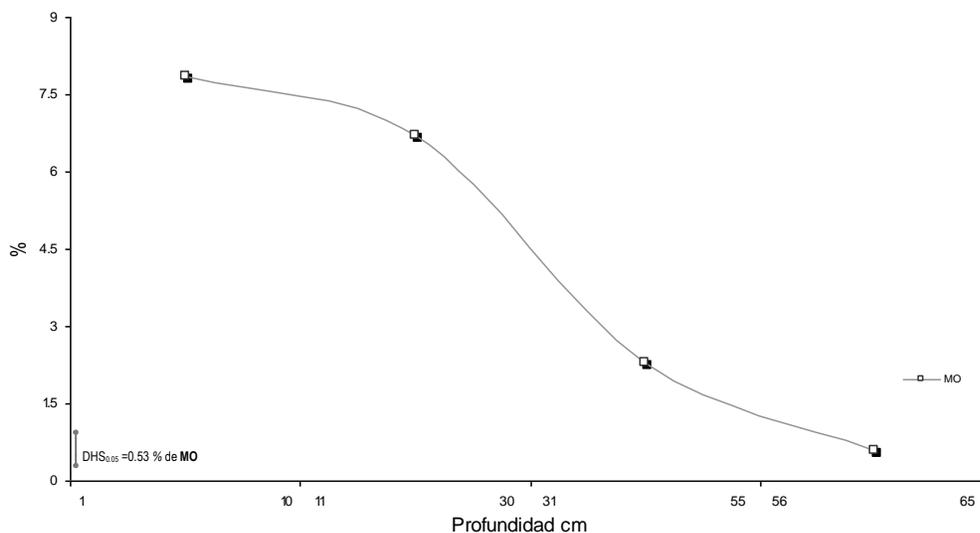


Figura 17. Efecto de vinaza en materia orgánica y porcentaje de saturación en el suelo

Aplicando la NOM-021.RECNAT-2000 como criterio de clasificación de la materia orgánica en suelos volcánicos, a la profundidad 1, el contenido de M.O. (7.3 %), se clasifica como medio (6.1– 10.9 %)

### 6.3.2.5. Efecto en micronutrientes

La prueba de medias de Fe las profundidades 1, 2 y 3 fueron estadísticamente diferentes ( $P < 0.05$ ), la 3 y 4 fueron iguales; en Cu y Zn la prueba de medias a las profundidades 1 y 2 fueron estadísticamente diferentes de 3 y 4. Para el caso de Mn, la prueba de medias a la profundidad 1 fue estadísticamente diferente a la 2, 3 y 4; las cuales estadísticamente son iguales. El Fe y Mn presentan una mayor concentración a los 10 cm de profundidad y para el caso de Cu y Zn presentan más concentración a los 30 cm de profundidad del suelo (Figura 18).

Bautista *et al.* (2000b), encontraron un aumento en la concentración Mn, Zn y Fe, en Cu no se detectó algún cambio, menciona que el aumento de Fe y Mn extraíbles son una evidencia de la presencia de condiciones reductoras ya que el Mg, participa en el proceso de descomposición de la materia orgánica, aceptando electrones.

Bautista (1998), menciona el riesgo por contaminación de metales pesados presentes (para este caso Zn, Cu y Mn) en la vinaza; dichos elementos posiblemente se incorporen a la vinaza durante la preparación de la melaza para la posterior fermentación y obtención del alcohol etílico, probablemente su origen sea el material con el que es fabricada la maquinaria y equipo.

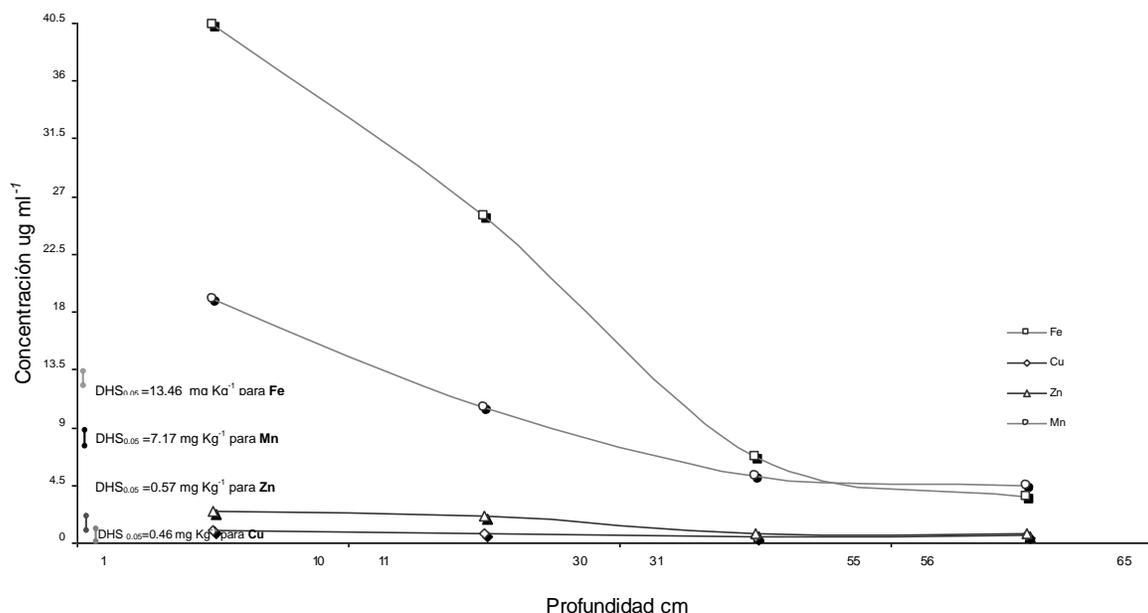


Figura 18. Efecto de la vinaza en micronutrientes del suelo

Aplicando la NOM-021.RECNAT-2000 como criterio de clasificación de micronutrientes, para el caso de la profundidad 1, el contenido de Fe ( $40.34 \text{ mg kg}^{-1}$ ), se clasifica: Adecuado ( $> 4.5 \text{ mg kg}^{-1}$ ), Cu ( $0.96 \text{ mg kg}^{-1}$ ), se clasifica: adecuado ( $> 0.2 \text{ de kg}^{-1}$ ), Zn ( $2.52 \text{ mg kg}^{-1}$ ), se clasifica: adecuado ( $> 1.0 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y Mn ( $19.04 \text{ mg kg}^{-1}$ ), se clasifica: adecuado ( $> 1.0 \text{ de kg}^{-1}$ )

### 6.3.2.6. Efecto de la vinaza en el suelo para dosis de K

La prueba de medias para CE, K y  $\text{NH}_4$  para dosis  $500 \text{ kg de K ha}^{-1}$  fue estadísticamente diferente ( $P < 0.05$ ) al control ( $0 \text{ kg de K ha}^{-1}$ ) gráficamente se aprecia en la Figura 19. Camargo (1984), menciona que la CE aumentó significativamente comparado con el

control, atribuyendo el aumento en gran medida a la saturación de potasio provocado por la aplicación de vinaza. Velloso *et al.* (1982) realizaron un estudio en columnas de suelo con características arenosas, donde fueron adicionadas dosis crecientes de vinaza (0, 50, 100, 150, 200 y 400 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>), encontraron que el contenido de nitrato disminuyó y el del amonio fue creciendo conforme aumentaba la dosis; Bianchi (2008) atribuye la disminución de las pérdidas por nitratos a la desnitrificación, siendo desventajoso desde el punto de vista de nutrición de las plantas y ventajoso ambientalmente.

Arafat y Yassen (2002), registró altos valores de K intercambiable en suelos, lo más probable es este incremento se deba a la dosis (20 mL L<sup>-1</sup>) de vinaza aplicada al suelo.

Aplicando la NOM-021.RECNAT-2000 como criterio de clasificación de bases intercambiables para el caso de K (0.045 cmol (+) kg<sup>-1</sup>), se clasifica: muy baja (menor de 0.2 cmol (+) kg<sup>-1</sup>).

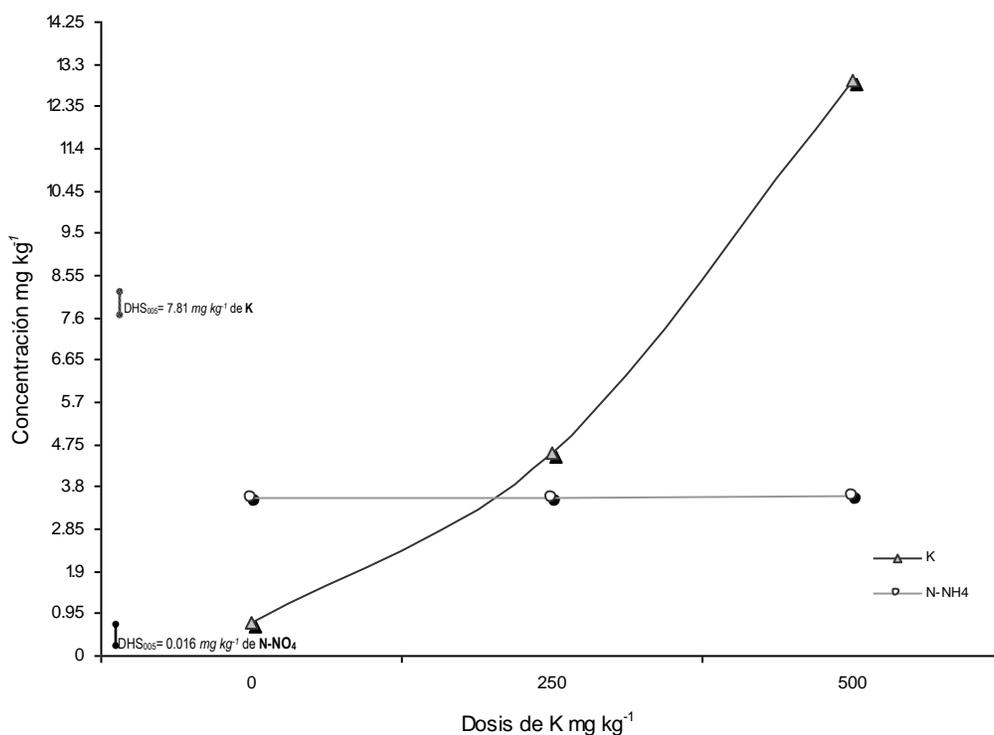


Figura 19. Efecto de la vinaza en contenido de N- NH<sub>4</sub> y K en suelo.

### 6.3.2.7. Efecto de la vinaza para la interacción profundidad por dosis de K

La prueba de medias de Tukey ( $P < 0.05$ ) para la variable de respuesta K, en la interacción profundidad por dosis, la dosis 500 K ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), profundidad 1, fue estadísticamente diferente a la dosis 0, en todas las profundidades y a la dosis 250 ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) profundidades 2, 3 y 4, siendo iguales la dosis 250 y 500  $\text{kg K ha}^{-1}$ , en la profundidad 1 (Cuadro 44).

Cuadro 44. Medias de los contenidos de Potasio en el suelo, por tratamiento y profundidad.

| Profundidad | Dosis de K ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) |          |         | Promedio |
|-------------|------------------------------------|----------|---------|----------|
|             | 0                                  | 250      | 500     |          |
| --- cm ---  | --- $\text{mg kg}^{-1}$ ----       |          |         |          |
| 1 (0- 10 )  | 0.97 b                             | 14.66 ab | 38.32 a | 17.98 a  |
| 2 (11-30)   | 1.56 b                             | 3.13 b   | 11.53 b | 5.41 b   |
| 3 (31-55)   | 0.39 b                             | 0.39 b   | 0.97 b  | 0.58 b   |
| 4 (56-65)   | 0.01 b                             | 0.01 b   | 0.97 b  | 0.33 b   |
| Promedio    | 0.735 b                            | 4.55 b   | 12.95 a |          |

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes. DHS=23.895  $\text{mg kg}^{-1}$

Armengol *et al.* (2002) menciona las cantidades aportadas de K para dosis de vinaza de 50 y 20  $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$  son de 392.5 y 1962  $\text{kg ha}^{-1}$  respectivamente, lo que garantiza la cantidad de K que requiere la caña de azúcar para obtener mayores rendimientos incluso de la fertilización mineral, lo que demuestra el efecto residual de la vinaza en el suelo.

Brito y Rolim (2005), encontraron diferencias para tres tipos de suelo diferentes (análisis de varianza,  $P < 0.05$ ), aplicado a la variable K fue significativa para los efectos de dosis horizontes y su interacción; concluyendo que la concentración de K aumentó en todos los suelos, de acuerdo a las particularidades de cada suelo. Gonzalo *et al.* (2006), registran un incremento del K en la capa superficial, excediendo 11 veces a lo recomendado para caña de azúcar, en suelos fertirrigados con vinaza durante 10 años consecutivos.

Las prueba de medias ( $P < 0.05$ ), para Mg en la interacción dosis por profundidad, a dosis 0  $\text{kg de K ha}^{-1}$  en la profundidad 1 y 2, fue estadísticamente diferente a la profundidad 3 y 4, la dosis 250  $\text{kg de K ha}^{-1}$ , fue estadísticamente igual en todas las profundidades, en la dosis 500  $\text{kg de K ha}^{-1}$ , las profundidades 1 y 4 son estadísticamente diferentes, las profundidades 2 y 3 son iguales, a su vez la 3 es igual a la profundidad 4 y 1, 2 y 3 son iguales (Cuadro

45). A pesar que existió diferencia en concentración para profundidad se puede concluir que la vinaza no tuvo impacto en esta variable de respuesta ya que las diferencias de concentración son iguales para dosis (250 y 500 kg de K ha<sup>-1</sup>) y el control.

Lo anterior coincide con Brito y Rolim (2005), mostraron que a pesar de la variación significativa del Mg, en ningún caso se observó un gran aumento en la concentración este elemento. Es decir, la vinaza aplicada mostró muy bajo contenido de Mg, modificar moderadamente la concentración de este elemento en los suelos.

Cuadro 45. Medias de los contenidos de Magnesio en el suelo

| Profundidad | Dosis de K (kg ha <sup>-1</sup> ) |          |          | Promedio |
|-------------|-----------------------------------|----------|----------|----------|
|             | 0                                 | 250      | 500      |          |
| --- cm ---  | --- mg Kg <sup>-1</sup> -----     |          |          |          |
| 1 (0-10)    | 0.410 ab                          | 0.442 ab | 0.554 a  | 0.468 a  |
| 2 (11-30)   | 0.360 ab                          | 0.399 ab | 0.371 ab | 0.376 b  |
| 3 (31-55)   | 0.233 c                           | 0.270 bc | 0.275 bc | 0.270 c  |
| 4 (56-65)   | 0.254 c                           | 0.281 bc | 0.244 c  | 0.249 c  |
| Promedio    | 0.314 a                           | 0.348 a  | 0.325 a  |          |

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes. DHS=0.090 mg Kg<sup>-1</sup>

## 7. CONCLUSIONES

- Los resultados indican la factibilidad del uso de la vinaza, como insumo de nutrición vegetal ya que al aplicar mayores dosis ( $500 \text{ kg de K ha}^{-1}$ ), la concentración de K se eleva
- Con las aplicaciones de vinaza el contenido de K, aumentó ( $P < 0.05$ ), considerablemente ya que en el análisis de suelo previo al experimento no se detectó, posteriormente la mayor concentración se dio a los 10 cm de profundidad del perfil del suelo en ambas dosis de vinaza ( $250$  y  $500 \text{ kg de K ha}^{-1}$ ), para el caso de lixiviados, fue a los 23 cm de profundidad para ambas dosis.
- La CE de lixiviados y suelo, incrementaron ( $P < 0.05$ ) en el tratamiento  $500 \text{ kg de K ha}^{-1}$ , a las profundidades 23 y 10 cm respectivamente, atribuyendo tal efecto por la adición de vinaza, para los dos cortes de alfalfa (cosecha 1 y 2). En el caso de pH aparentemente existieron cambios pero al realizar interacciones de dosis\*profundidad\*días de muestreo, se descartó tal efecto ( $P < 0.05$ ).
- La vinaza tuvo un efecto sobre la fertilidad del suelo ya que estadísticamente se comprobó ( $P < 0.05$ ), tal efecto con los tratamientos sobre: materia orgánica,  $\text{NH}_4$ , K, P, Ca, Na, Mg, Fe, Cu, Zn y Mn; siendo el de  $500 \text{ kg de K ha}^{-1}$ , donde se registraron mayores concentraciones.
- El análisis de tejido vegetal de alfalfa para P =  $1939.2$  y Zn =  $28.63 \text{ mg kg}^{-1}$  las concentraciones que corresponden a dosis de  $500 \text{ kg de K ha}^{-1}$  incrementaron ( $P < 0.05$ ) en relación al control el P =  $1025.2$  y Zn =  $14.17 \text{ mg kg}^{-1}$  respectivamente.

## 8. LITERATURA CITADA

- Alcantar G y G. Sandoval 1999. Manual de análisis químico de tejido vegetal. Publicación especial No. 10. Sociedad mexicana de la ciencia del suelo. (ed) Universidad autónoma Chapingo. Chapingo Edo. México, México 158 p
- Arafat S.M. and E. Yassen A. 2002. Agronomic evaluation of fertilizing efficiency of vinasse. In: 14<sup>th</sup> World Congress of Soil Science. Soil and Fertilizer Society of Thailand Volumen II: Bangkok 14-21 August. Thailand 474 pp.
- Armegol J. A., R. Lorenzo and N. Fernández. 2003. Utilización de la vinaza como enmienda orgánica y su influencia en las propiedades químicas de vertisoles y en los rendimientos de la caña de azúcar. *Cultivos Tropicales* 24:67-71.
- Ayers R. S. and W. Westcot D. 1987. La calidad del agua y su uso en la agricultura. Traducción al español por J. F. Alfaro de: *Water quality and use in agriculture*. (ed) FAO Riego y Drenaje Manual 29. Roma 174 pp.
- Barber S. A. 1984. Soil nutrient bioavailability. A mechanistic approach. John Wiley and Sons Inc. New York; USA. 398 pp.
- Barbosa V. 2006. Novas tecnologias no uso da vinhaça e aspectos legais. In: Marques, M.O. *Tópicos em tecnologia sucroalcooleira*. Jabotical, Unesp, p. 141-150.
- Basanta R., M. García D., J. Cervantes M., H. Mata V., G. Bustos V. 2007. Sostenibilidad del reciclaje de residuos de la agroindustria azucarera: una revisión. *Ciencia y Tecnología Alimentaria* 5: 293-305.
- Bates R. G. 1973. Determination of pH, theory and practice 2nd ed. Wiley, E.U.A 215 pp

- Bautista Z. F. y M. C. D. de B. 1998. Análisis de Beneficios y Riesgo Potenciales de la Aplicación de Vinazas Crudas y Tratados Biológicamente. Revista Internacional de Contaminación Ambiental 14: 13-19.
- Bautista Z. F., T. J. Reina T., L. Villers R. y C. Durán de B. 2000a. Mejoramiento de suelos agrícolas usando aguas residuales agroindustriales. Caso: Vinazas crudas y tratadas. Química Ambiental de suelos. Vol. 1. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F. pp.131.
- Bautista Z. F., M. C. Durán de B. y R. Lozano. 2000b. Cambios químicos en el suelo por la aplicación de materia orgánica soluble tipo vinazas. Revista Internacional de Contaminación Ambiental 16: 89-101.
- Bebe F. V., M. M. Rolim, E. M. R. Pedrosa, G. B. Silva e V. S. Oliverira. 2009 .Dinâmica do potássio em cana de açúcar fertirrigada com vinhaça. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 13: 781-787.
- Becorral M. 1987. Efecto de los residuos de la industria azúcar alcoholera, bagazo, cachaza y vinaza, en la producción de cana y azúcar en un vertisol de guanacaste. Agronomía Costarricense 12: 147-153.
- Bermúdez S. R., J. A. Hoyos H., y S. Rodríguez P. 2000. Evaluación de la disminución de la carga contaminante de la vinaza de destilería por tratamiento anaerobio. Revista de Contaminación Ambiental 16 (3):103-107.
- Berón M. G. 2005. Usos alternativos de las Vinazas de Acuerdo con su Composición Química. Nota técnica. Técnicaña 17: 15-19.
- Bianchi S. R. 2008. Avaliação química de solos tratados com vinhaça e cultivados com alfafa. Tese Mestrado. Universidade Federal de São Carlos. Centro de ciências exatas e de tecnologia. Depto de Química. Programa de Pós-graduacao em química. Brasil. pp 108.

- Bohn, H. L., L. McNeal B., y A. O'Connor G. 1993. Química de suelos. Limusa editores, México DF. 370 p.
- Brito F. L. e M. M. Rolim. 2005. Comportamento do efluente e do solo fertirrigado com vinhaça. *Agropecuária Técnica* 26: 60-67.
- Brito F. L., M. M. Rolim, J. A. A. da Silva e E. M. R. Pedrosa. 2007. Qualidade do percolado de solos que receberam vinhaça em diferentes doses e tempo de incubação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 11: 318-323.
- Brito F. L., M. M. Rolim e E. M. R. Pedrosa. 2009. Efeito da aplicação de vinhaça nas características químicas de solos da zona da mata de Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias* 4: 456-462.
- Camargo P. B. 1989. Dinâmica do nitrogênio dos fertilizantes: uréia ( $^{15}\text{N}$ ) e aquamônia ( $^{15}\text{N}$ ) incorporados ao solo na cultura de cana-de-açúcar. Dissertação de Mestrado. Centro de Energia Nuclear na Agricultura. (ed) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. 104 pp.
- Chiang, C. F. 1970. La vegetación de Córdoba, Veracruz. Tesis profesional. Facultad de Ciencias. (ed) Universidad Autónoma de México. México 51 pp.
- CNA. 1997. Ley federal de derechos en materia de agua. Comisión Nacional del Agua. D.F. México 96 pp.
- Eaton, A. D. 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater, 19th edition. American Public Health Association. Washington, D.C. 1368 pp.
- Fassbender, H. W. y E. Bornemisza. 1984. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. 4<sup>ta</sup> Edición. (ed) Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). Costa Rica. 398 pp.

- Filho O. J., E. Zambello J., E. Aguajaro R. e J. Rosseto A. L. 1983. Efeitos da aplicação prolongada de vinhaça nas propriedades químicas dos solos com cana de açúcar. Estudo exploratório. Revista Stab Açúcar 1: 28-33.
- Fireman, M. 1944. Permeability measurements on disturbed soil samples. Soil Science 58:337-353.
- García, M. J. 1986. Aplicación de vinaza como abono en el maíz (*Zea mays*, L.) y su efecto sobre las propiedades químicas del suelo. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional, Escuela de Ciencias Agrarias. Heredia Costa Rica 57 pp.
- García, O. A y C. Rojas. 2006. Posibilidades de uso de la vinaza en la agricultura de acuerdo con su modo de acción en los suelos. Técnicaña 17: 3-13.
- Gemtos T. A., N. Chouliaras and St. Marakis. 1999. Vinasse rate, time of application and compaction effect and soil properties and durum wheat crop. Journal of Agricultural Engineering Research 73: 283-296.
- Gómez, T. J. M. 1995. Efecto de la vinaza sobre el contenido de potasio intercambiable en un suelo representativo del área cañera del Valle del Río Turbio. Revista Venesuelos 3:69-72.
- Gómez, T. J. M. 1996. Efecto de la aplicación de vinaza en la producción de la caña de azúcar. Caña de Azúcar. 14: 15-34.
- Gómez, J. and O. Rodríguez. 2000. Effects of vinasse on sugarcane (*Saccharum officinarum*) productivity. Revista de la Facultad de Agronomía (LUZ) 17: 318 - 326.
- Gómez P. J. F. 2009. Nutrición líquida de la caña de azúcar con vinurea. Revista Técnicaña 21: 31-32.

- Gonzalo P. D. D., J. Casagrande, M. Soares and E. Mouta. 2006. Effect of high levels of vinasse application on soil fertility and potash leaching. In: 18<sup>th</sup> Congress of Soil Science July 9-15 Philadelphia, Pennsylvania, U SA 166-167.
- Golding K. W. T. 1987. Potassium fixation and release. Proceeding of 20<sup>th</sup> Colloquium of international potash institute held in Baden Bein Wein. Australia 137-154.
- Henríquez C., E. Bornemisza y F. Bertsch. 1994. Fijación de potasio en vertisoles, inceptisoles, andisoles y ultisoles de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 18:133-140.
- Herrera, H. J. G y A. Barreras S. 2005. Análisis estadístico de experimentos pecuarios, utilización del programa SAS. Segunda edición. (ed) Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo 213 pp.
- Heyes M. H. and H. Bolt G. 1991. Soil colloids and the soil solution. In: Interactions at the soil colloids-soils solution interphase. Edited by Bolt. G. H, Hayes M. H. B, and McBride M. B. Kluwer Academic Publishers. Amsterdam 1-33 pp.
- Huang P. M. 1994. Role of organics and microbes in mineral transformations. In. Symposio 8a weathering and the formation of soil minerals 15<sup>th</sup> world congress of soil science. International soil science society. Acapulco, México.
- Huang P. M. 2005. Chemistry of soil potassium. In: Tabatabai. (eds.) M.A., Sparks, D.L. *Chemical Processes in Soils*. Soil Science Society of America. Madison, WI, USA. 227-292 pp.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1984. Carta de efectos climáticos regionales Córdoba E14-3. Escala 1:50,000. Aguascalientes, México.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1985. Carta topográfica. Córdoba, Veracruz E14B57. Escala 1:50,000. Aguascalientes, México.

- Jalali M. 2008. Effect of sodium and magnesium on kinetics of potassium release in some calcareous soils of western Iran. *Geoderma* 145: 207-215.
- Jones J. B. and W. Case V. 1990. Sampling, handling, and analyzing tissue samples. *In:* Westerman, R.L. (Ed.). Soil testing and plant analysis. 3<sup>rd</sup> Edition. Soil Science Society of America Book Series. Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin, USA, 389-427 pp.
- Johnston A. E. and W.T. Goulding K. 1992. Potassium concentrations in surface and groundwater and the loss of potassium in relation to land use. *In:* Potassium in Ecosystems, Biogeochemical Fluxes of cations in Agro and Forest Systems. International Potash Institute, Basel 35–15 pp.
- Kolahchi Z. and M. Jalali. 2007. Effect of water quality on the leaching of potassium from sandy soil. *Journal of Arid Environments* 68:624- 639.
- Lima I. T. 1980. Efeitos da aplicação de vinhaça sobre a microflora do solo. Tese Mestrado. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Barzil 150 pp.
- Mengel K. 1982. Factors of plant nutrient availability relevant to soil testing. *Plant and soil* 64: 129-138.
- Mengel K. and E. Kirkby A. 1987. Principles of plant nutrition. 4<sup>th</sup> Edition. (ed) International Potash Institute, Bern, Switzerland 234 pp.
- Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. 1998. Elementos metodológicos para la introducción de prácticas de producción más limpia. Alternativas para el aprovechamiento económico de residuales. La Habana Cuba 48 pp.

- Montenegro G., S. P., J. C. Menjivol F. y C.R. Bonilla C. 2009. Influencia de la aplicación de vinaza sobre la presencia, actividad y biomasa microbiana del suelo en el cultivo de maíz dulce (*Zea mays*). *Acta Agronómica* 58 (1): 41-45.
- Navarro B. S. y G. Navarro G. 2003. Química agrícola: el suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal. 2a. Ed. Mundi-prensa, España 486 pp.
- Ng Kee Kwong, K. F and J. Deville. 1984. Nitrogen leaching from soils cropped with sugarcane under the humid tropical climate of Mauritius, Indian Ocean. *Journal of Environmental Quality* 13: 471-474.
- Norma PA. 231. CETESB. 2005. Dispõe sobre os Vinhaça, critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola. Coordenadoria de Defesa Agropecuária, da Secretaria de Agricultura e Abastecimento. São Paulo. Brasil. (Citado el 28 de noviembre de 2009) Disponible en: <http://www.cetesb.sp.gov.br/Tecnologia/camaras/P4-231.pdf>
- Norma Oficial Mexicana NOM-064-ECOL-1994. Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la industria de la destilería. *Diario Oficial de la Federación* el 10 de junio de 1994. México 75 pp.
- Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. *Diario Oficial*, 31 de diciembre de 2002. México 85 pp.
- NRC.1996. Nutrient requirements of beef cattle. 7<sup>th</sup> Ed. National Academy Press. Washington 242 pp.
- Oliveira M. W., P. C. O. Trivelin, A. E. Boaretto, T. Muraoka and J. Mortatti. 2002. Leaching of nitrogen, potassium, calcium and magnesium in a sandy cultivated with sugarcane. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 37: 861-868.

- Pande, Y. N. 1994. Influence of industrial effluents on fresh and dry matter production (biomass) of crop plants. *Journal of Living World* 1:120-125.
- Pandiyan T., De Bazúa C. D., Ilangovan K., Noyola A. 1999.  $^{13}\text{C}$  NMR Studies on vinasses effluent treated with iron; *Water Resources* 33(1):189-195.
- Paturau J. M. 1989. By-products of the cane sugar industry: An introduction to their industrial utilization. *Sugar series vol.11. 3rd edition* (ed) Elsevier. Amsterdam 435 pp.
- Perret S. J., J. Reyes E., V. Bazán R., B. Singh K., K. Morgan T., and R. Gilbert A. 2010. Lysimeter Experiments to Investigate the Fate and Transport of Vinasse Application. In: Tropical Soils 21st Century Watershed Technology, (eds) Improving Water Quality and Environment Conference Proceedings. 21-24 February 2010. Universidad EARTH Costa Rica American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- PROY-NMX-AA-003/1-SCFI-2008. establece los lineamientos generales y recomendaciones para muestrear las descargas de aguas residuales. Secretaría de economía, 9 de octubre de 2009. México 55 pp.
- Quemener J. 1986. Nutrient balances and need for potassium. In: Nutrient balances and the need for potassium. 13th IPI Congress. (ed). Interational Potash Institute Bern, Switzerland. 290 pp.
- Quintero D. R. 2003. Resultados preliminares y proyecciones acerca del uso de la vinaza en Colombia. In VI Congreso colombiano de asociación de técnicos de la caña de azúcar. Memoria Volumen 1. (Ed) Tecnicaña. Cali, Colombia. 113-121 pp.
- Reyes C. P. 1987. Bioestadística aplicada. Agronomía, biología, química. Editorial Trilas. México, D.F. 216 pp.

- Richards, L. A. 1990. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Trad. Al español por N. Sánchez D. Sexta edición. Ed. Limusa. México 171 pp.
- Rivas S. H., F. Bautista Z., C. Durán de B. 1996. Estudio y evaluación de algunas propiedades físicas y químicas de los suelos agrícolas aledaños al ingenio azucarero “El Potrero” en Córdoba, Veracruz, México. Programa Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental. (ed) Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F. 67 pp.
- Roldán M. F., A. Venialgo C. y N. Gutiérrez C. 2004. Potasio disponible, de reserva y energía de reemplazamiento en suelos y el nivel foliar en rye-grass. Universidad Nacional del Nordeste. Comunicaciones Científicas y Tecnológicas. Resumen: A-072 Argentina 1-3 pp.
- Salcedo I. H., V. S. B. Sampaio E. e C. Carneiro J. G. 1988. Dinâmica de nutrientes em cana de açúcar, IV: perdas de N por lixiviação em cana planta fertilizada com uréia <sup>15</sup>N. Pesquisa Agropecuária Brasileira 23:725-732.
- Sarria P. y T. Preston R. 1992. Reemplazo parcial del jugo de caña con vinaza y uso del grano de soya a cambio de torta en dietas de cerdos de engorde. Livestock Research for Rural Development 1:80-88.
- Sarria P., A. Solano and T. R. Preston. 1990 Utilización de jugo de caña y cachaza panelera en la alimentación de cerdos. Livestock Research for Rural Development 4(1):80-88.
- SAS. 2000. Statistical Analysis System for Windows. Version 9.00. SAS Institute Inc. Campus Drive. Cary, NC. USA.
- Seoáñez, C. M., E. Bellas V. y P. Seoáñez O. 2003. Manual de tratamiento, reciclado, aprovechamiento y gestión de las aguas residuales de las industrias agroalimentarias. A. Madrid V. y Ediciones Mundi-Prensa. Ed. Mundi-Prensa. Madrid 467 pp.

- Shainberg, I., Rhoades, J.D., Prather, R.J., 1981. Effect of low electrolyte concentration on clay dispersion and hydraulic conductivity of a sodic soil. *Soil Science Society of America Journal* 45:273-277
- Sparks, D.L. and M. Huang P. 1985. Physical chemistry of soil potassium. In: Potassium in Agriculture. Munson, R.D. (ed) Potash in Agriculture. Soil Science Society of America, Madison, WI. USA 201-276 pp.
- Sparks D.L. 1987. Potassium dynamics in soils. *Advances in Soil Science* 6:1-63.
- Subirós J. F. y E. Molina. 1992. Efecto de la aplicación de vinazas en la producción de caña de azúcar y en las características químicas de un inceptisol de guanacaste, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 16: 55-60.
- Talibudeen, O. 1981. Cation exchange in soils. *In: The Chemistry of Soil Processes.* Greenland, D. J. and Hayes, M. H. B. (eds.) John Wiley & Sons, Ltd. UK. 115-177 pp.
- Tejada, M. and L. González J. 2005. Beet vinasse applied to wheat under dryland conditions affects soil properties and yield. *European Journal of Agronomy*. 23:336-347.
- Tejada, M., L. González J.; A. M. García M. and J. Parrado R. 2008. Application of green manure and green manure composted with beet vinasse on soil restoration: Effects on soil properties. *Bioresource Tecnololy*. 99:494-495.
- Urbano D. y C. Dávila. 2003. Evaluación del rendimiento y composición química de once variedades de alfalfa (*Medicago sativa*) bajo corte en la zona Alta del Estado Mérida, Venezuela. *Revista de la Facultad de Agronomía* 20: 97-107.

- Varadachari C., A. Haque M., N. Dulal C. and K. Ghosh. 1994. Clay-humus complexation: Effect of pH and the nature of bonding. *Soil Biology and Biochemistry*. 26:1145-1149
- Vargas M. 1987. Evaluación de vinaza aplicada al suelo a la siembra y escalonada, en comparación con la fertilización recomendada en viveros de café en bolsa. Heredia. Universidad Nacional C.R. Tropical Costa Rica. [Citado el 19 de septiembre de 2008]. Disponible en: [www.ots.ac.cr/rdmcnfs/datasets/exsrch.phtml?ds=global&qbe=3475](http://www.ots.ac.cr/rdmcnfs/datasets/exsrch.phtml?ds=global&qbe=3475).
- Velloso, A. C. X., M. R. Nunes e J. R. Leal. 1982. Efeito da vinhaca na lixiviação de nutrientes do solo. I. Nitrato e amônio. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 17: 51-55.
- Webster, C.P., A. Shepherd M., W. T. Goulding K., and Lord E. 1993. Comparison of methods for measuring the leaching of mineral nitrogen from arable land. *Journal of Soil Science* 44: 49-62.

## **ANEXOS**

Anexo1. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales

| LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA METALES PESADOS Y CIANUROS |                           |      |                        |      |                                 |      |                                   |      |                        |      |   |      |                |      |               |      |                           |      |                         |      |
|---|---------------------------|------|------------------------|------|---------------------------------|------|-----------------------------------|------|------------------------|------|---|------|----------------|------|---------------|------|---------------------------|------|-------------------------|------|
| PARÁMETROS<br>(*)   | RÍOS                      |      |                        |      |                                 |      | EMBALSES NATURALES Y ARTIFICIALES |      |                        |      | AGUAS COSTERAS                                    |      |                |      |               |      | SUELO                     |      | HUMEDALES NATURALES (B) |      |
|   | Uso en riego agrícola (A) |      | Uso público urbano (B) |      | Protección de vida acuática (C) |      | Uso en riego agrícola (B)         |      | Uso público urbano (C) |      | Explotación pesquera, navegación y otros usos (A) |      | Recreación (B) |      | ESTUARIOS (B) |      | Uso en riego agrícola (A) |      |                         |      |
|   | P.M.                      | P.D. | P.M.                   | P.D. | P.M.                            | P.D. | P.M.                              | P.D. | P.M.                   | P.D. | P.M.  | P.D. | P.M.           | P.D. | P.M.          | P.D. | P.M.                      | P.D. | P.M.                    | P.D. |
| Arsénico  | 0.2                       | 0.4  | 0.1                    | 0.2  | 0.1                             | 0.2  | 0.2                               | 0.4  | 0.1                    | 0.2  | 0.1   | 0.2  | 0.2            | 0.4  | 0.1           | 0.2  | 0.2                       | 0.4  | 0.1                     | 0.2  |
| Cadmio  | 0.2                       | 0.4  | 0.1                    | 0.2  | 0.1                             | 0.2  | 0.2                               | 0.4  | 0.1                    | 0.2  | 0.1   | 0.2  | 0.2            | 0.4  | 0.1           | 0.2  | 0.05                      | 0.1  | 0.1                     | 0.2  |
| Cianuros  | 1.0                       | 3.0  | 1.0                    | 2.0  | 1.0                             | 2.0  | 2.0                               | 3.0  | 1.0                    | 2.0  | 1.0   | 2.0  | 2.0            | 3.0  | 1.0           | 2.0  | 2.0                       | 3.0  | 1.0                     | 2.0  |
| Cobre   | 4.0                       | 6.0  | 4.0                    | 6.0  | 4.0                             | 6.0  | 4.0                               | 6.0  | 4                      | 6.0  | 4   | 6.0  | 4.0            | 6.0  | 4.0           | 6.0  | 4                         | 6.0  | 4.0                     | 6.0  |
| Cromo   | 1                         | 1.5  | 0.5                    | 1.0  | 0.5                             | 1.0  | 1                                 | 1.5  | 0.5                    | 1.0  | 0.5   | 1.0  | 1              | 1.5  | 0.5           | 1.0  | 0.5                       | 1.0  | 0.5                     | 1.0  |
| Mercurio  | 0.01                      | 0.02 | 0.005                  | 0.01 | 0.005                           | 0.01 | 0.01                              | 0.02 | 0.005                  | 0.01 | 0.01  | 0.02 | 0.01           | 0.02 | 0.01          | 0.02 | 0.005                     | 0.01 | 0.005                   | 0.01 |
| Níquel  | 2                         | 4    | 2                      | 4    | 2                               | 4    | 2                                 | 4    | 2                      | 4    | 2   | 4    | 2              | 4    | 2             | 4    | 2                         | 4    | 2                       | 4    |
| Plomo   | 0.5                       | 1    | 0.2                    | 0.4  | 0.2                             | 0.4  | 0.5                               | 1    | 0.2                    | 0.4  | 0.2   | 0.4  | 0.5            | 1    | 0.2           | 0.4  | 5                         | 10   | 0.2                     | 0.4  |
| Zinc  | 10                        | 20   | 10                     | 20   | 10                              | 20   | 10                                | 20   | 10                     | 20   | 10  | 20   | 10             | 20   | 10            | 20   | 10                        | 20   | 10                      | 20   |

(\*) Medidos de manera total. P.D. = Promedio Diario P.M. = Promedio Mensual N.A. = No es aplicable  
(A), (B) y (C): Tipo de Cuerpo Receptor según la Ley Federal de Derechos.

## Anexo 2. Datos y variables utilizadas para el análisis estadístico en lixiviados para cosecha 1

| D | R | Dosis | P  | CE   | K      | NT | pH;  | D  | R | Dosis | P  | CE   | K      | NT    | pH   |
|---|---|-------|----|------|--------|----|------|----|---|-------|----|------|--------|-------|------|
| 2 | 1 | 500   | 75 | 0.31 | 20.58  | .  | 6.99 | 8  | 2 | 500   | 46 | 0.65 | 92.60  | .     | 7.48 |
| 2 | 2 | 500   | 75 | 0.29 | 10.29  | .  | 6.75 | 8  | 1 | 250   | 46 | 0.46 | 82.31  | .     | 7.62 |
| 2 | 1 | 250   | 75 | 0.33 | 10.29  | .  | 6.82 | 8  | 2 | 250   | 46 | 0.48 | .      | .     | 7.41 |
| 2 | 2 | 250   | 75 | 0.30 | 10.29  | .  | 6.97 | 8  | 1 | 0     | 46 | 0.30 | .      | .     | 7.74 |
| 2 | 1 | 0     | 75 | 0.22 | 10.29  | .  | 6.84 | 8  | 2 | 0     | 46 | 0.35 | .      | .     | 7.45 |
| 2 | 2 | 0     | 75 | 0.24 | .      | .  | 6.72 | 8  | 1 | 500   | 23 | .    | 298.38 | .     | .    |
| 2 | 1 | 500   | 46 | 0.39 | 72.02  | .  | 7.18 | 8  | 2 | 500   | 23 | .    | .      | .     | .    |
| 2 | 2 | 500   | 46 | 0.54 | 133.76 | .  | 7.69 | 8  | 1 | 250   | 23 | .    | .      | .     | .    |
| 2 | 1 | 250   | 46 | 0.54 | 72.02  | .  | 7.40 | 8  | 2 | 250   | 23 | .    | .      | .     | .    |
| 2 | 2 | 250   | 46 | 0.39 | 82.31  | .  | 7.28 | 8  | 1 | 0     | 23 | .    | .      | .     | .    |
| 2 | 1 | 0     | 46 | 0.42 | 92.60  | .  | 7.51 | 8  | 2 | 0     | 23 | .    | .      | .     | .    |
| 2 | 2 | 0     | 46 | 0.37 | 154.33 | .  | 7.62 | 10 | 1 | 500   | 75 | .    | .      | .     | .    |
| 2 | 1 | 500   | 23 | 1.68 | 771.67 | .  | 7.13 | 10 | 2 | 500   | 75 | 0.45 | .      | .     | 7.14 |
| 2 | 2 | 500   | 23 | .    | .      | .  | .    | 10 | 1 | 250   | 75 | .    | 30.87  | .     | .    |
| 2 | 1 | 250   | 23 | .    | .      | .  | .    | 10 | 2 | 250   | 75 | 0.32 | 10.29  | .     | 6.97 |
| 2 | 2 | 250   | 23 | 0.96 | .      | .  | 7.85 | 10 | 1 | 0     | 75 | .    | .      | .     | .    |
| 2 | 1 | 0     | 23 | 0.46 | 421.85 | .  | 7.46 | 10 | 2 | 0     | 75 | .    | .      | .     | .    |
| 2 | 2 | 0     | 23 | .    | .      | .  | .    | 10 | 1 | 500   | 46 | 0.40 | 30.87  | .     | 7.48 |
| 4 | 1 | 500   | 75 | .    | .      | .  | .    | 10 | 2 | 500   | 46 | .    | .      | .     | .    |
| 4 | 2 | 500   | 75 | .    | .      | .  | .    | 10 | 1 | 250   | 46 | 0.40 | 30.87  | .     | 7.42 |
| 4 | 1 | 250   | 75 | .    | .      | .  | .    | 10 | 2 | 250   | 46 | 0.39 | 41.16  | .     | 7.70 |
| 4 | 2 | 250   | 75 | .    | .      | .  | .    | 10 | 1 | 0     | 46 | 0.27 | 41.16  | .     | 7.68 |
| 4 | 1 | 0     | 75 | .    | .      | .  | .    | 10 | 2 | 0     | 46 | 0.34 | 102.89 | .     | 7.53 |
| 4 | 2 | 0     | 75 | .    | .      | .  | .    | 10 | 1 | 500   | 23 | 1.32 | 411.56 | .     | 7.84 |
| 4 | 1 | 500   | 46 | 0.47 | 51.44  | .  | 7.69 | 10 | 2 | 500   | 23 | 3.66 | 113.18 | .     | 7.72 |
| 4 | 2 | 500   | 46 | .    | 0.01   | .  | .    | 10 | 1 | 250   | 23 | 1.67 | 565.89 | .     | 7.37 |
| 4 | 1 | 250   | 46 | 0.53 | 51.44  | .  | 7.73 | 10 | 2 | 250   | 23 | 0.63 | 370.40 | .     | 7.82 |
| 4 | 2 | 250   | 46 | 0.42 | 61.73  | .  | 7.68 | 10 | 1 | 0     | 23 | .    | 144.05 | .     | .    |
| 4 | 1 | 0     | 46 | 0.31 | 61.73  | .  | 7.84 | 10 | 2 | 0     | 23 | .    | .      | .     | .    |
| 4 | 2 | 0     | 46 | 0.36 | 113.18 | .  | 7.56 | 13 | 1 | 500   | 75 | 0.29 | 4.99   | 1.34  | 7.00 |
| 4 | 1 | 500   | 23 | 1.60 | 535.03 | .  | 7.86 | 13 | 2 | 500   | 75 | 0.32 | .      | 0.01  | 6.99 |
| 4 | 2 | 500   | 23 | .    | .      | .  | .    | 13 | 1 | 250   | 75 | 0.33 | 5.96   | 0.01  | 6.78 |
| 4 | 1 | 250   | 23 | 0.81 | .      | .  | 7.64 | 13 | 2 | 250   | 75 | 0.30 | 4.61   | 0.01  | 6.82 |
| 4 | 2 | 250   | 23 | .    | 679.07 | .  | .    | 13 | 1 | 0     | 75 | 0.39 | 5.06   | 0.01  | 7.10 |
| 4 | 1 | 0     | 23 | 0.51 | 360.11 | .  | 7.62 | 13 | 2 | 0     | 75 | 0.24 | 4.47   | 0.01  | 6.85 |
| 4 | 2 | 0     | 23 | .    | .      | .  | .    | 13 | 1 | 500   | 46 | 0.40 | 5.24   | 0.01  | 7.32 |
| 6 | 1 | 500   | 75 | .    | 30.87  | .  | .    | 13 | 2 | 500   | 46 | 0.74 | 6.20   | 0.01  | 7.21 |
| 6 | 2 | 500   | 75 | .    | .      | .  | .    | 13 | 1 | 250   | 46 | 0.49 | 5.20   | 0.01  | 7.35 |
| 6 | 1 | 250   | 75 | .    | 30.87  | .  | .    | 13 | 2 | 250   | 46 | 0.38 | 5.42   | 0.01  | 7.46 |
| 6 | 2 | 250   | 75 | .    | .      | .  | .    | 13 | 1 | 0     | 46 | 0.26 | 5.49   | 0.01  | 7.66 |
| 6 | 1 | 0     | 75 | .    | 41.16  | .  | .    | 13 | 2 | 0     | 46 | 0.30 | 6.92   | 0.01  | 7.46 |
| 6 | 2 | 0     | 75 | .    | 102.89 | .  | .    | 13 | 1 | 500   | 23 | 1.20 | 12.13  | 0.16  | 7.43 |
| 6 | 1 | 500   | 46 | 0.43 | .      | .  | 7.52 | 13 | 2 | 500   | 23 | 1.77 | 21.89  | .     | 7.19 |
| 6 | 2 | 500   | 46 | 0.82 | 113.18 | .  | 7.80 | 13 | 1 | 250   | 23 | 0.10 | 12.22  | .     | 7.75 |
| 6 | 1 | 250   | 46 | 0.46 | .      | .  | 7.81 | 13 | 2 | 250   | 23 | .    | 11.45  | .     | .    |
| 6 | 2 | 250   | 46 | .    | .      | .  | .    | 13 | 1 | 0     | 23 | .    | 9.44   | 1.26  | .    |
| 6 | 1 | 0     | 46 | .    | 82.31  | .  | .    | 13 | 2 | 0     | 23 | .    | .      | .     | .    |
| 6 | 2 | 0     | 46 | 0.36 | .      | .  | 7.42 | 18 | 1 | 500   | 75 | 0.33 | 4.82   | 15.78 | 6.85 |
| 6 | 1 | 500   | 23 | .    | 617.34 | .  | .    | 18 | 2 | 500   | 75 | .    | 4.30   | .     | .    |
| 6 | 2 | 500   | 23 | 2.90 | 411.56 | .  | 7.86 | 18 | 1 | 250   | 75 | 0.56 | 4.43   | .     | 7.30 |
| 6 | 1 | 250   | 23 | 1.51 | 884.85 | .  | 7.63 | 18 | 2 | 250   | 75 | 0.40 | 4.34   | 20.20 | 6.97 |
| 6 | 2 | 250   | 23 | .    | 0.01   | .  | .    | 18 | 1 | 0     | 75 | 0.24 | 5.74   | 14.40 | 7.03 |
| 6 | 1 | 0     | 23 | 0.42 | 288.09 | .  | 7.88 | 18 | 2 | 0     | 75 | 0.25 | 4.32   | 16.40 | 6.67 |
| 6 | 2 | 0     | 23 | .    | .      | .  | .    | 18 | 1 | 500   | 46 | 0.46 | 5.20   | 16.60 | 6.98 |
| 8 | 1 | 500   | 75 | .    | 30.87  | .  | .    | 18 | 2 | 500   | 46 | 0.76 | 6.03   | .     | 7.48 |
| 8 | 2 | 500   | 75 | .    | .      | .  | .    | 18 | 1 | 250   | 46 | 0.42 | 5.32   | 3.23  | 7.30 |
| 8 | 1 | 250   | 75 | .    | 30.87  | .  | .    | 18 | 2 | 250   | 46 | 0.37 | 5.34   | 1.42  | 7.44 |
| 8 | 2 | 250   | 75 | .    | .      | .  | .    | 18 | 1 | 0     | 46 | 0.33 | 5.62   | 0.35  | 7.05 |
| 8 | 1 | 0     | 75 | .    | .      | .  | .    | 18 | 2 | 0     | 46 | 0.29 | 6.78   | 0.01  | 7.46 |
| 8 | 2 | 0     | 75 | .    | 102.89 | .  | .    | 18 | 1 | 500   | 23 | 1.25 | 11.45  | .     | 7.34 |
| 8 | 1 | 500   | 46 | 0.42 | 0.10   | .  | 7.84 |    |   |       |    |      |        |       |      |

| D  | R | Dosis | P  | CE   | K     | NT    | pH   |
|----|---|-------|----|------|-------|-------|------|
| 18 | 2 | 500   | 23 | 1.26 | 13.39 | 0.01  | 7.08 |
| 18 | 1 | 250   | 23 | 0.96 | 9.60  | 0.01  | 7.25 |
| 18 | 2 | 250   | 23 | .    | 15.92 | .     | .    |
| 18 | 1 | 0     | 23 | .    | 8.17  | .     | .    |
| 18 | 2 | 0     | 23 | .    | .     | .     | .    |
| 22 | 1 | 500   | 75 | 0.45 | 4.82  | 0.01  | 7.25 |
| 22 | 2 | 500   | 75 | 0.30 | 4.30  | 0.01  | 7.08 |
| 22 | 1 | 250   | 75 | 0.32 | 4.43  | 0.01  | 7.03 |
| 22 | 2 | 250   | 75 | 0.28 | 4.34  | 0.01  | 6.88 |
| 22 | 1 | 0     | 75 | .    | 5.74  | 0.01  | .    |
| 22 | 2 | 0     | 75 | 0.23 | 4.32  | 0.01  | 7.00 |
| 22 | 1 | 500   | 46 | 0.45 | 5.20  | 0.01  | 7.28 |
| 22 | 2 | 500   | 46 | 0.73 | 6.03  | 0.01  | 7.22 |
| 22 | 1 | 250   | 46 | 0.44 | 5.32  | 0.01  | 7.10 |
| 22 | 2 | 250   | 46 | 0.38 | 5.34  | 20.40 | 7.00 |
| 22 | 1 | 0     | 46 | 0.29 | 5.62  | 2.12  | 7.26 |
| 22 | 2 | 0     | 46 | 0.28 | 6.78  | 3.84  | 7.23 |
| 22 | 1 | 500   | 23 | 1.24 | 11.45 | 2.02  | 7.39 |
| 22 | 2 | 500   | 23 | 1.22 | 13.39 | 0.73  | 7.25 |
| 22 | 1 | 250   | 23 | 0.87 | 9.60  | 0.10  | 7.43 |
| 22 | 2 | 250   | 23 | .    | 15.92 | .     | .    |
| 22 | 1 | 0     | 23 | .    | 8.17  | .     | .    |
| 22 | 2 | 0     | 23 | .    | .     | .     | .    |
| 26 | 1 | 500   | 75 | 0.39 | 4.44  | 0.01  | 6.85 |
| 26 | 2 | 500   | 75 | 0.37 | 4.30  | 0.01  | 6.72 |
| 26 | 1 | 250   | 75 | 0.36 | 4.22  | 0.01  | 6.65 |
| 26 | 2 | 250   | 75 | 0.30 | 4.52  | 0.01  | 6.65 |
| 26 | 1 | 0     | 75 | 0.36 | 4.85  | 0.01  | 6.91 |
| 26 | 2 | 0     | 75 | 0.25 | 4.53  | 0.01  | 7.42 |
| 26 | 1 | 500   | 46 | 0.50 | 5.17  | 0.01  | 6.95 |
| 26 | 2 | 500   | 46 | 0.75 | 5.81  | 6.57  | 7.02 |
| 26 | 1 | 250   | 46 | 0.48 | 5.14  | 0.01  | 6.90 |
| 26 | 2 | 250   | 46 | 0.40 | 5.27  | 1.84  | 6.91 |
| 26 | 1 | 0     | 46 | 0.29 | 5.51  | 27.70 | 7.01 |
| 26 | 2 | 0     | 46 | 0.30 | 6.54  | 4.53  | 7.10 |
| 26 | 1 | 500   | 23 | 1.31 | 11.28 | 11.60 | 7.12 |
| 26 | 2 | 500   | 23 | 1.15 | 10.74 | 22.40 | 7.01 |
| 26 | 1 | 250   | 23 | 0.94 | 8.88  | 2.21  | 7.14 |
| 26 | 2 | 250   | 23 | .    | 13.43 | 2.03  | .    |
| 26 | 1 | 0     | 23 | .    | 8.77  | .     | .    |
| 26 | 2 | 0     | 23 | 0.40 | 16.15 | 6.38  | 7.43 |
| 30 | 1 | 500   | 75 | 0.39 | 5.46  | 10.20 | 7.00 |
| 30 | 2 | 500   | 75 | 0.36 | 5.21  | 14.10 | 7.08 |
| 30 | 1 | 250   | 75 | 0.33 | 2.17  | 0.10  | 6.64 |
| 30 | 2 | 250   | 75 | 0.29 | 1.38  | 17.60 | 6.78 |
| 30 | 1 | 0     | 75 | 0.29 | 1.56  | 4.48  | 7.19 |
| 30 | 2 | 0     | 75 | 0.22 | 1.10  | .     | 6.86 |
| 30 | 1 | 500   | 46 | 0.55 | 1.30  | .     | 7.12 |
| 30 | 2 | 500   | 46 | 0.72 | 2.22  | 20.40 | 7.50 |
| 30 | 1 | 250   | 46 | 0.50 | 1.53  | 0.31  | 7.35 |

|    |   |     |    |      |       |       |      |
|----|---|-----|----|------|-------|-------|------|
| 30 | 2 | 250 | 46 | 0.45 | 1.70  | 0.01  | 7.16 |
| 30 | 1 | 0   | 46 | 0.27 | 1.71  | 0.01  | 7.43 |
| 30 | 2 | 0   | 46 | 0.26 | 2.53  | 0.17  | 7.30 |
| 30 | 1 | 500 | 23 | 1.33 | 7.18  | 0.01  | 7.25 |
| 30 | 2 | 500 | 23 | 1.17 | 6.79  | 38.60 | 7.25 |
| 30 | 1 | 250 | 23 | 0.79 | 4.63  | 1.06  | 7.41 |
| 30 | 2 | 250 | 23 | .    | .     | 0.01  | .    |
| 30 | 1 | 0   | 23 | .    | 0.67  | 0.91  | .    |
| 30 | 2 | 0   | 23 | .    | 12.96 | 1.79  | .    |
| 37 | 1 | 500 | 75 | 0.42 | 5.74  | 11.60 | 6.60 |
| 37 | 2 | 500 | 75 | .    | 3.18  | .     | .    |
| 37 | 1 | 250 | 75 | .    | 2.41  | .     | .    |
| 37 | 2 | 250 | 75 | 0.30 | 30.70 | 14.80 | 6.75 |

|    |   |     |    |      |       |       |      |
|----|---|-----|----|------|-------|-------|------|
| 37 | 1 | 0   | 75 | 0.57 | 5.24  | 21.80 | 6.79 |
| 37 | 2 | 0   | 75 | .    | .     | 0.01  | .    |
| 37 | 1 | 500 | 46 | 0.57 | 2.95  | 0.01  | 7.01 |
| 37 | 2 | 500 | 46 | 0.66 | 1.72  | 0.01  | 6.95 |
| 37 | 1 | 250 | 46 | 0.53 | 2.44  | 0.01  | 6.95 |
| 37 | 2 | 250 | 46 | 0.50 | 2.00  | 0.01  | 6.80 |
| 37 | 1 | 0   | 46 | 0.29 | 2.89  | 0.01  | 6.87 |
| 37 | 2 | 0   | 46 | 0.30 | 6.63  | 0.01  | 6.87 |
| 37 | 1 | 500 | 23 | 1.27 | 6.24  | 31.20 | 7.01 |
| 37 | 2 | 500 | 23 | 1.09 | 4.40  | 0.65  | 6.88 |
| 37 | 1 | 250 | 23 | 0.81 | 8.14  | 0.01  | 7.06 |
| 37 | 2 | 250 | 23 | .    | .     | 0.01  | .    |
| 37 | 1 | 0   | 23 | .    | .     | 0.01  | .    |
| 37 | 2 | 0   | 23 | 0.59 | 5.16  | 0.01  | 7.28 |
| 44 | 1 | 500 | 75 | 0.49 | 4.42  | 13.80 | 6.91 |
| 44 | 2 | 500 | 75 | 0.51 | 12.96 | 13.60 | 6.94 |
| 44 | 1 | 250 | 75 | .    | .     | 12.20 | .    |
| 44 | 2 | 250 | 75 | 0.54 | 0.68  | .     | 6.91 |
| 44 | 1 | 0   | 75 | 0.58 | 6.12  | 19.60 | 6.90 |
| 44 | 2 | 0   | 75 | 0.37 | 2.09  | 0.38  | 7.01 |
| 44 | 1 | 500 | 46 | 0.66 | 2.81  | 0.01  | 6.90 |
| 44 | 2 | 500 | 46 | 0.72 | 2.50  | 0.01  | 8.81 |
| 44 | 1 | 250 | 46 | 0.54 | 2.43  | 0.01  | 6.97 |
| 44 | 2 | 250 | 46 | 0.51 | 1.89  | 0.01  | 6.64 |
| 44 | 1 | 0   | 46 | 0.31 | 3.27  | 0.01  | 6.84 |
| 44 | 2 | 0   | 46 | 0.36 | 7.22  | 0.01  | 6.92 |
| 44 | 1 | 500 | 23 | 1.12 | 5.93  | 0.07  | 7.14 |
| 44 | 2 | 500 | 23 | 1.14 | 4.92  | 0.07  | 6.75 |
| 44 | 1 | 250 | 23 | 0.87 | 7.18  | 1.99  | 7.29 |
| 44 | 2 | 250 | 23 | 0.83 | 5.80  | 0.07  | 6.77 |
| 44 | 1 | 0   | 23 | 0.49 | 13.75 | 0.07  | 6.97 |
| 44 | 2 | 0   | 23 | .    | 1.93  | 0.07  | .    |

Donde las variables dependientes son:

D=Días, R = Repetició, Dosis =Dosis P=Profundidad, CE = Conductividad Eléctrica, K=Potasio, NT=Nitratos, pH= pH

### Anexo 3. Datos y variables utilizadas para el análisis estadístico en lixiviados para cosecha 2

| D  | R | Dosis | P  | CE   | K     | NT    | pH   |  |  |  |  |  |  |
|----|---|-------|----|------|-------|-------|------|--|--|--|--|--|--|
| 3  | 1 | 500   | 75 | 0.65 | 4.71  | 28.00 | 7.07 |  |  |  |  |  |  |
| 3  | 2 | 500   | 75 | 0.48 | 2.38  | 0.01  | 6.96 |  |  |  |  |  |  |
| 3  | 1 | 250   | 75 | 0.40 | 2.27  | 12.28 | 7.22 |  |  |  |  |  |  |
| 3  | 2 | 250   | 75 | 0.44 | 4.32  | 15.70 | 7.11 |  |  |  |  |  |  |
| 3  | 1 | 0     | 75 | 0.27 | 3.12  | 20.00 | 7.16 |  |  |  |  |  |  |
| 3  | 2 | 0     | 75 | 0.30 | 10.97 | 19.60 | 7.16 |  |  |  |  |  |  |
| 3  | 1 | 500   | 46 | 0.45 | 1.99  | 0.48  | 7.16 |  |  |  |  |  |  |
| 3  | 2 | 500   | 46 | 0.67 | 1.68  | 0.01  | 6.91 |  |  |  |  |  |  |
| 3  | 1 | 250   | 46 | 0.55 | 1.76  | 0.01  | 6.88 |  |  |  |  |  |  |
| 3  | 2 | 250   | 46 | 0.51 | 1.64  | 0.01  | 6.91 |  |  |  |  |  |  |
| 3  | 1 | 0     | 46 | 0.30 | 3.04  | 0.01  | 7.11 |  |  |  |  |  |  |
| 3  | 2 | 0     | 46 | 0.44 | 5.09  | 0.18  | 7.04 |  |  |  |  |  |  |
| 3  | 1 | 500   | 23 | 1.02 | 3.95  | .     | 7.38 |  |  |  |  |  |  |
| 3  | 2 | 500   | 23 | 0.93 | 4.07  | .     | 7.09 |  |  |  |  |  |  |
| 3  | 1 | 250   | 23 | 0.94 | 5.99  | .     | 7.00 |  |  |  |  |  |  |
| 3  | 2 | 250   | 23 | 0.86 | 5.33  | 9.00  | 7.09 |  |  |  |  |  |  |
| 3  | 1 | 0     | 23 | .    | 39.23 | .     | .    |  |  |  |  |  |  |
| 3  | 2 | 0     | 23 | .    | 3.93  | .     | .    |  |  |  |  |  |  |
| 11 | 1 | 500   | 75 | 0.94 | 5.20  | .     | 7.40 |  |  |  |  |  |  |
| 11 | 2 | 500   | 75 | 0.59 | 2.20  | .     | 7.00 |  |  |  |  |  |  |
| 11 | 1 | 250   | 75 | 0.68 | 3.23  | 26.10 | 8.04 |  |  |  |  |  |  |
| 11 | 2 | 250   | 75 | 0.40 | 2.32  | 20.80 | 7.10 |  |  |  |  |  |  |
| 11 | 1 | 0     | 75 | 0.59 | 4.31  | 3.38  | 8.10 |  |  |  |  |  |  |
| 11 | 2 | 0     | 75 | 0.16 | 1.52  | 0.00  | 7.57 |  |  |  |  |  |  |
| 11 | 1 | 500   | 46 | 0.99 | 1.75  | 16.80 | 7.98 |  |  |  |  |  |  |
| 11 | 2 | 500   | 46 | 1.00 | 1.44  | 0.76  | 7.55 |  |  |  |  |  |  |
| 11 | 1 | 250   | 46 | 0.83 | 1.38  | .     | 7.76 |  |  |  |  |  |  |
| 11 | 2 | 250   | 46 | 0.76 | 1.45  | 0.26  | 6.81 |  |  |  |  |  |  |
| 11 | 1 | 0     | 46 | 0.26 | 1.96  | .     | 8.26 |  |  |  |  |  |  |
| 11 | 2 | 0     | 46 | 0.33 | 4.54  | .     | 8.24 |  |  |  |  |  |  |
| 11 | 1 | 500   | 23 | 1.39 | 4.03  | 11.14 | 7.96 |  |  |  |  |  |  |
| 11 | 2 | 500   | 23 | 1.37 | 3.16  | 22.50 | 8.06 |  |  |  |  |  |  |
| 11 | 1 | 250   | 23 | 0.98 | 5.07  | 14.60 | 7.34 |  |  |  |  |  |  |
| 11 | 2 | 250   | 23 | 0.42 | 2.81  | 9.49  | 7.05 |  |  |  |  |  |  |
| 11 | 1 | 0     | 23 | 0.52 | 3.61  | 28.20 | 6.92 |  |  |  |  |  |  |
| 11 | 2 | 0     | 23 | .    | 9.01  | 0.27  | .    |  |  |  |  |  |  |
| 18 | 1 | 500   | 75 | 0.89 | 0.39  | 0.01  | 6.84 |  |  |  |  |  |  |
| 18 | 2 | 500   | 75 | 0.89 | 0.39  | 0.01  | 7.36 |  |  |  |  |  |  |
| 18 | 1 | 250   | 75 | .    | 62.56 | 0.01  | .    |  |  |  |  |  |  |
| 18 | 2 | 250   | 75 | 0.67 | 12.51 | 0.01  | 7.78 |  |  |  |  |  |  |
| 18 | 1 | 0     | 75 | 0.35 | 0.78  | 0.01  | 7.15 |  |  |  |  |  |  |
| 18 | 2 | 0     | 75 | 0.61 | 7.43  | 0.01  | 8.09 |  |  |  |  |  |  |
| 18 | 1 | 500   | 46 | 0.82 | 15.64 | 0.01  | 8.28 |  |  |  |  |  |  |
| 18 | 2 | 500   | 46 | 0.70 | 62.56 | 0.01  | 8.04 |  |  |  |  |  |  |
| 18 | 1 | 250   | 46 | 0.55 | 1.96  | 0.01  | 8.12 |  |  |  |  |  |  |
| 18 | 2 | 250   | 46 | 0.54 | 0.00  | 0.01  | 8.26 |  |  |  |  |  |  |
| 18 | 1 | 0     | 46 | 0.26 | 0.39  | 0.01  | 7.96 |  |  |  |  |  |  |
| 18 | 2 | 0     | 46 | 0.26 | .     | 1.60  | 8.04 |  |  |  |  |  |  |
| 18 | 1 | 500   | 23 | 1.25 | 10.95 | 0.01  | 7.98 |  |  |  |  |  |  |
| 18 | 2 | 500   | 23 | 1.28 | 7.82  | 12.00 | 8.19 |  |  |  |  |  |  |
| 18 | 1 | 250   | 23 | 0.92 | 2.35  | 0.15  | 8.22 |  |  |  |  |  |  |
| 18 | 2 | 250   | 23 | 0.99 | 4.30  | 0.01  | 8.17 |  |  |  |  |  |  |
| 18 | 1 | 0     | 23 | 0.45 | 2.35  | 0.01  | 8.11 |  |  |  |  |  |  |
| 18 | 2 | 0     | 23 | 0.51 | 5.08  | 0.01  | 8.24 |  |  |  |  |  |  |
| 25 | 1 | 500   | 75 | 0.51 | 17.20 | 0.01  | 7.70 |  |  |  |  |  |  |
| 25 | 2 | 500   | 75 | 0.75 | 51.22 | 16.50 | 7.63 |  |  |  |  |  |  |
| 25 | 1 | 250   | 75 | 0.59 | 0.78  | 11.10 | 7.72 |  |  |  |  |  |  |
| 25 | 2 | 250   | 75 | 0.49 | 20.33 | 0.20  | 7.76 |  |  |  |  |  |  |
| 25 | 1 | 0     | 75 | 0.25 | 6.26  | 1.90  | 7.63 |  |  |  |  |  |  |
| 25 | 2 | 0     | 75 | 0.20 | 6.65  | 1.15  | 7.44 |  |  |  |  |  |  |
| 25 | 1 | 500   | 46 | 0.78 | 7.82  | 6.66  | 8.35 |  |  |  |  |  |  |
| 25 | 2 | 500   | 46 | 0.81 | 20.33 | 2.08  | 8.20 |  |  |  |  |  |  |
| 25 | 1 | 250   | 46 | 0.68 | 25.03 | 17.30 | 8.33 |  |  |  |  |  |  |
| 25 | 2 | 250   | 46 | 0.48 | 2.74  | 13.60 | 8.22 |  |  |  |  |  |  |
| 25 | 1 | 0     | 46 | 0.21 | 10.17 | 1.48  | 8.18 |  |  |  |  |  |  |
| 25 | 2 | 0     | 46 | 0.25 | 84.07 | 21.20 | 8.35 |  |  |  |  |  |  |
| 25 | 1 | 500   | 23 | 1.71 | 31.28 | 27.00 | 8.46 |  |  |  |  |  |  |
| 25 | 2 | 500   | 23 | 1.55 | 18.38 | 18.40 | 8.35 |  |  |  |  |  |  |
| 25 | 1 | 250   | 23 | 0.84 | 6.65  | 0.19  | 8.36 |  |  |  |  |  |  |
| 25 | 2 | 250   | 23 | 0.82 | 10.17 | 17.00 | 8.30 |  |  |  |  |  |  |
| 25 | 1 | 0     | 23 | 0.34 | 8.60  | 0.17  | 8.27 |  |  |  |  |  |  |
| 25 | 2 | 0     | 23 | .    | 0.00  | 0.00  | .    |  |  |  |  |  |  |
| 32 | 1 | 500   | 75 | 0.70 | 2.74  | 1.95  | 7.39 |  |  |  |  |  |  |
| 32 | 2 | 500   | 75 | 0.62 | 2.35  | 0.01  | 7.35 |  |  |  |  |  |  |
| 32 | 1 | 250   | 75 | 0.41 | 3.13  | 0.03  | 7.03 |  |  |  |  |  |  |
| 32 | 2 | 250   | 75 | 0.38 | 1.96  | 0.22  | 6.44 |  |  |  |  |  |  |
| 32 | 1 | 0     | 75 | .    | 0.78  | .     | .    |  |  |  |  |  |  |
| 32 | 2 | 0     | 75 | 0.26 | 3.52  | 0.33  | 7.20 |  |  |  |  |  |  |
| 32 | 1 | 500   | 46 | 0.87 | 1.56  | 22.20 | 8.37 |  |  |  |  |  |  |
| 32 | 2 | 500   | 46 | 1.07 | 1.56  | 3.74  | 8.46 |  |  |  |  |  |  |
| 32 | 1 | 250   | 46 | 0.94 | 0.78  | 3.88  | 8.11 |  |  |  |  |  |  |
| 32 | 2 | 250   | 46 | 0.82 | 1.56  | 18.90 | 7.68 |  |  |  |  |  |  |
| 32 | 1 | 0     | 46 | 0.32 | 1.17  | 2.56  | 7.95 |  |  |  |  |  |  |
| 32 | 2 | 0     | 46 | 0.34 | 1.56  | 0.07  | 8.15 |  |  |  |  |  |  |
| 32 | 1 | 500   | 23 | 1.65 | 25.03 | 0.01  | 8.41 |  |  |  |  |  |  |
| 32 | 2 | 500   | 23 | 2.00 | 16.81 | 0.01  | 8.35 |  |  |  |  |  |  |
| 32 | 1 | 250   | 23 | 0.90 | 4.30  | 0.01  | 8.32 |  |  |  |  |  |  |
| 32 | 2 | 250   | 23 | 0.94 | 7.43  | 0.01  | 8.20 |  |  |  |  |  |  |
| 32 | 1 | 0     | 23 | 0.42 | 2.35  | 0.01  | 8.34 |  |  |  |  |  |  |
| 32 | 2 | 0     | 23 | .    | .     | 0.01  | .    |  |  |  |  |  |  |
| 39 | 1 | 500   | 75 | 0.94 | 4.30  | 22.00 | 7.16 |  |  |  |  |  |  |
| 39 | 2 | 500   | 75 | 0.59 | 0.78  | 32.40 | 7.13 |  |  |  |  |  |  |
| 39 | 1 | 250   | 75 | 0.68 | 0.78  | 15.40 | 7.45 |  |  |  |  |  |  |
| 39 | 2 | 250   | 75 | 0.40 | 0.78  | 19.40 | 7.04 |  |  |  |  |  |  |
| 39 | 1 | 0     | 75 | 0.59 | 9.38  | 0.19  | 8.02 |  |  |  |  |  |  |
| 39 | 2 | 0     | 75 | 0.16 | 2.35  | 0.01  | 7.60 |  |  |  |  |  |  |
| 39 | 1 | 500   | 46 | 0.99 | 3.13  | 0.01  | 8.13 |  |  |  |  |  |  |
| 39 | 2 | 500   | 46 | 1.00 | 3.13  | 0.01  | 7.89 |  |  |  |  |  |  |
| 39 | 1 | 250   | 46 | 0.83 | 2.74  | 0.01  | 7.84 |  |  |  |  |  |  |
| 39 | 2 | 250   | 46 | 0.76 | 2.74  | 0.01  | 7.73 |  |  |  |  |  |  |
| 39 | 1 | 0     | 46 | 0.26 | 2.35  | 0.67  | 7.70 |  |  |  |  |  |  |
| 39 | 2 | 0     | 46 | 0.33 | 2.35  | 17.10 | 7.79 |  |  |  |  |  |  |
| 39 | 1 | 500   | 23 | 1.44 | 27.37 | 27.30 | 7.97 |  |  |  |  |  |  |

| D  | R | Dosis | P  | CE   | K     | NT    | pH   |
|----|---|-------|----|------|-------|-------|------|
| 39 | 2 | 500   | 23 | 1.57 | 13.69 | 2.60  | 8.24 |
| 39 | 1 | 250   | 23 | 1.07 | 3.52  | 18.60 | 7.53 |
| 39 | 2 | 250   | 23 | 1.12 | 3.52  | 0.15  | 7.58 |
| 39 | 1 | 0     | 23 | 0.67 | 2.74  | 0.01  | 7.96 |
| 39 | 2 | 0     | 23 | 0.60 | 0.43  | 0.01  | 8.37 |
| 56 | 1 | 500   | 75 | 0.96 | 1.96  | 0.01  | 6.76 |
| 56 | 2 | 500   | 75 | 1.01 | 1.96  | 0.01  | 6.66 |
| 56 | 1 | 250   | 75 | 0.55 | 4.30  | 0.01  | 7.82 |
| 56 | 2 | 250   | 75 | 0.48 | 2.74  | 0.01  | 7.06 |
| 56 | 1 | 0     | 75 | 0.24 | 1.96  | 3.96  | 6.57 |
| 56 | 2 | 0     | 75 | 0.21 | 2.74  | 0.01  | 6.84 |
| 56 | 1 | 500   | 46 | 0.82 | 3.13  | 0.01  | 7.00 |
| 56 | 2 | 500   | 46 | 0.89 | 3.13  | 31.50 | 7.51 |
| 56 | 1 | 250   | 46 | 0.94 | 4.30  | 10.50 | 6.91 |
| 56 | 2 | 250   | 46 | 1.01 | 3.13  | 1.93  | 7.45 |
| 56 | 1 | 0     | 46 | 0.32 | 2.35  | 20.90 | 6.79 |
| 56 | 2 | 0     | 46 | 0.40 | 2.74  | 16.70 | 7.27 |
| 56 | 1 | 500   | 23 | 1.23 | 26.59 | 12.80 | 7.20 |
| 56 | 2 | 500   | 23 | 1.82 | 14.08 | 22.10 | 7.01 |
| 56 | 1 | 250   | 23 | 1.10 | 3.13  | 0.27  | 7.90 |
| 56 | 2 | 250   | 23 | 1.15 | 3.52  | 0.01  | 8.02 |
| 56 | 1 | 0     | 23 | 0.55 | 3.13  | 0.01  | 7.20 |
| 56 | 2 | 0     | 23 | 0.65 | 4.69  | 0.01  | 7.61 |

Donde las variables dependientes son:

D=Días, R = Repetición, Dosis =Dosis P=Profundidad, CE = Conductividad Eléctrica, K=Potasio, NT=Nitratos, pH= pH

Anexo 4. Datos y variables utilizadas para el análisis estadístico para suelos de las columnas experimentales

| Profundidad | Dosis | CE      | pH   | NH4                | NO3                | Fosforo | K     | Na    | Ca                  | Mg                  | Fe    | Cu   | Zn   | Mn    | MO    |
|-------------|-------|---------|------|--------------------|--------------------|---------|-------|-------|---------------------|---------------------|-------|------|------|-------|-------|
| cm          |       | mmho/cm |      | mg L <sup>-1</sup> | mg L <sup>-1</sup> | ppm     | ppm   | ppm   | µg mL <sup>-1</sup> | µg mL <sup>-1</sup> | ppm   | ppm  | ppm  | ppm   | %     |
| 15          | 1     | 0.788   | 7.52 | 3.63               | 3.56               | 9.84    | 24.24 | 0.01  | 3399.00             | 574.63              | 51.11 | 0.82 | 2.19 | 10.56 | 8.15  |
| (15-40)     | 1     | 0.606   | 7.68 | 3.57               | 3.58               | 7.28    | 14.47 | 6.90  | 3239.00             | 382.72              | 36.93 | 1.15 | 2.98 | 25.87 | 6.04  |
| (40-60)     | 1     | 0.487   | 7.34 | 3.57               | 3.56               | 0.07    | 1.56  | 0.01  | 1237.00             | 224.29              | 5.18  | 0.14 | 0.26 | 4.38  | 2.23  |
| (60-70)     | 1     | 0.593   | 7.12 | 3.57               | 3.57               | 0.04    | 1.17  | 2.30  | 1014.00             | 270.16              | 3.11  | 0.04 | 0.29 | 4.63  | 0.27  |
| 15          | 1     | 1.638   | 7.2  | 3.6                | 3.66               | 7.50    | 52.40 | 0.01  | 3371.00             | 533.59              | 44.99 | 1.25 | 3.42 | 17.81 | 10.51 |
| (15-40)     | 1     | 0.703   | 7.51 | 3.57               | 3.57               | 7.17    | 8.60  | 16.09 | 3153.00             | 359.50              | 31.09 | 0.72 | 1.94 | 17.00 | 6.83  |
| (40-60)     | 1     | 0.812   | 7.41 | 3.59               | 3.57               | 0.22    | 0.39  | 9.20  | 1646.00             | 264.08              | 7.90  | 0.15 | 0.38 | 4.84  | 2.89  |
| (60-70)     | 1     | 0.674   | 6.88 | 3.6                | 3.57               | 0.02    | 0.78  | 2.30  | 1029.00             | 279.87              | 3.81  | 0.06 | 0.16 | 4.85  | 0.27  |
| 15          | 2     | 0.598   | 7.6  | 3.58               | 3.61               | 7.01    | 10.17 | 25.29 | 3232.00             | 454.66              | 43.46 | 0.71 | 2.18 | 9.85  | 6.83  |
| (15-40)     | 2     | 0.655   | 7.43 | 3.57               | 3.57               | 6.56    | 1.96  | 22.99 | 3050.00             | 368.19              | 34.49 | 0.80 | 2.26 | 18.25 | 6.83  |
| (40-60)     | 2     | 0.649   | 7.38 | 3.56               | 3.56               | 0.10    | 0.78  | 4.60  | 1336.00             | 267.68              | 5.60  | 0.09 | 0.23 | 4.49  | 0.27  |
| (60-70)     | 2     | 0.437   | 6.88 | 3.58               | 3.56               | 0.03    | 0.01  | 0.01  | 946.00              | 278.15              | 3.02  | 0.03 | 0.33 | 3.54  | 0.82  |
| 15          | 2     | 0.763   | 7.73 | 3.58               | 3.64               | 7.38    | 19.16 | 27.59 | 3230.00             | 429.94              | 43.14 | 0.67 | 1.73 | 9.35  | 3.94  |
| (15-40)     | 2     | 0.593   | 7.65 | 3.57               | 3.57               | 6.84    | 4.30  | 11.49 | 3279.00             | 430.31              | 26.32 | 0.82 | 2.64 | 17.05 | 6.57  |
| (40-60)     | 2     | 0.539   | 7.23 | 3.56               | 3.56               | 0.09    | 0.01  | 0.01  | 1614.00             | 274.22              | 7.11  | 0.15 | 0.40 | 8.07  | 0.82  |
| (60-70)     | 2     | 0.485   | 7.2  | 3.57               | 3.56               | 0.03    | 0.01  | 0.01  | 996.00              | 284.20              | 3.40  | 0.04 | 0.26 | 5.15  | 0.55  |
| 15          | 3     | 0.924   | 7.73 | 3.57               | 3.57               | 7.70    | 1.56  | 16.09 | 3312.00             | 422.09              | 21.65 | 0.59 | 1.75 | 6.27  | 7.09  |
| (15-40)     | 3     | 0.422   | 7.65 | 3.57               | 3.57               | 7.19    | 1.96  | 9.20  | 3231.00             | 374.93              | 18.32 | 1.39 | 2.95 | 17.95 | 7.09  |
| (40-60)     | 3     | 0.353   | 7.15 | 3.56               | 3.56               | 0.14    | 0.39  | 0.01  | 1325.00             | 235.19              | 10.60 | 0.17 | 0.57 | 5.90  | 2.32  |
| (60-70)     | 3     | 0.243   | 7.09 | 3.57               | 3.56               | 0.13    | 0.01  | 0.01  | 986.00              | 261.40              | 5.26  | 0.11 | 0.77 | 4.80  | 1.50  |
| 15          | 3     | 0.539   | 7.56 | 3.57               | 3.57               | 7.69    | 0.39  | 25.29 | 3106.00             | 398.03              | 22.68 | 0.57 | 1.31 | 9.76  | 7.36  |
| (15-40)     | 3     | 0.458   | 7.51 | 3.56               | 3.56               | 6.27    | 1.17  | 29.89 | 2991.00             | 345.31              | 21.27 | 0.89 | 2.40 | 18.17 | 6.83  |
| (40-60)     | 3     | 0.139   | 7.26 | 3.59               | 3.56               | 0.03    | 0.39  | 0.01  | 1017.00             | 231.36              | 4.27  | 0.05 | 0.23 | 3.94  | 0.68  |
| (60-70)     | 3     | 0.199   | 6.95 | 3.59               | 3.56               | 0.03    | 0.01  | 0.01  | 944.00              | 247.25              | 3.21  | 0.02 | 0.87 | 4.12  | 0.55  |

Donde: 1= 500 kg de K ha<sup>-1</sup>, 2=250 kg de K ha<sup>-1</sup>, 3= 0 kg de K ha<sup>-1</sup>,

### Anexo 5. Datos y variables utilizadas para el análisis estadístico en tejido vegetal de alfalfa

| Dosis | Corte | % de MS | N <sub>T</sub> | Boro   | Calcio  | Cobre | Fierro | Potasio | Magnesio | Manganeso | Sodio  | Fósforo | Zinc  | NO <sub>3</sub> |
|-------|-------|---------|----------------|--------|---------|-------|--------|---------|----------|-----------|--------|---------|-------|-----------------|
|       |       | %       | %              |        |         |       |        | ppm     |          |           |        |         |       |                 |
| 0     | C1    | 12.88   | 3.8            | 58.59  | 2333.99 | 1.67  | 68.6   | 1749.86 | 863.04   | 9.89      | 488.94 | 893.85  | 11.29 | 7446.81         |
| 0     | C1    | 14.00   | 3.31           | 83.59  | 3793.69 | 2.54  | 127.91 | 9419.56 | 1159.58  | 14.01     | 544.76 | 1312.9  | 17.48 | 5926.05         |
| 250   | C1    | 15.37   | 3.36           | 99.58  | 4945.79 | 3.13  | 359.22 | 8204.16 | 1454.38  | 21.43     | 654.12 | 1287.7  | 18.46 | 2887.54         |
| 250   | C1    | 13.33   | 3.92           | 125.18 | 809.79  | 8.47  | 144.64 | 2766.66 | 1013.18  | 11.38     | 388.5  | 1581.5  | 15.82 | 4255.32         |
| 500   | C1    | 12.81   | 2.26           | 117.89 | 6298.89 | 4.23  | 478.29 | 4958.26 | 2778.78  | 23.17     | 2462.8 | 2479.9  | 37.15 | 2279.64         |
| 500   | C1    | 13.51   | 2.73           | 78.59  | 4836.19 | 2.67  | 765.31 | 3790.16 | 1978.78  | 27.69     | 1217.7 | 1377.2  | 22.66 | 1063.83         |
| 0     | C2    | 16.53   | 3.34           | 77.53  | 4256.79 | 2.08  | 420.03 | 7359.86 | 1035.58  | 19.46     | 684.99 | 966.43  | 18.38 | 6079.03         |
| 0     | C2    | 18.50   | 3.21           | 74.87  | 3707.59 | -0.16 | 69.23  | 4303.56 | 975.24   | 16.52     | 439.48 | 927.59  | 9.55  | 1645.01         |
| 250   | C2    | 18.90   | 3.12           | 86.76  | 4903.59 | 3.32  | 147.01 | 2060.36 | 1279.58  | 15.49     | 418.63 | 1239.5  | 14.65 | 1823.71         |
| 250   | C2    | 18.88   | 3.46           | 91.83  | 4627.49 | 2.77  | 197.2  | 3172.66 | 1274.98  | 17.58     | 707.21 | 1344.9  | 16.26 | 3495.44         |
| 500   | C2    | 22.60   | 3.18           | 146.95 | 5678.69 | 3.45  | 555.68 | 13220.6 | 1814.68  | 81.49     | 919.11 | 2096.9  | 27.82 | 2811.55         |
| 500   | C2    | 21.69   | 2.86           | 111.54 | 6296.29 | 3.18  | 592.18 | 5776.06 | 2016.78  | 25.38     | 1748.2 | 1802.6  | 26.91 | 1291.79         |

Donde: 0, 250 y 500 = kg de K ha<sup>-1</sup>, C1= Corte 1, C2= Corte 2, N<sub>T</sub>= nitrógeno total y NO<sub>3</sub>= nitratos