

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA**

**LA MOLINA**

**FACULTAD DE AGRONOMÍA**



**“APLICACIÓN DE RESIDUOS DE LA INDUSTRIA AZUCARERA  
PARA LA REMEDIACIÓN DE UN SUELO SALINO-SÓDICO DE  
COSTA CENTRAL”**

Presentada por:

**JOSÉ EMANUEL QUINTANILLA ROSAS**

Tesis para optar el Título de:

**INGENIERO AGRÓNOMO**

**Lima - Perú**

**2019**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA**  
**LA MOLINA**  
**FACULTAD DE AGRONOMIA**  
**“APLICACIÓN DE RESIDUOS DE LA INDUSTRIA AZUCARERA**  
**PARA LA REMEDIACIÓN DE UN SUELO SALINO-SÓDICO DE**  
**COSTA CENTRAL”**

Presentada por:

**JOSÉ EMANUEL QUINTANILLA ROSAS**

Tesis para optar el Título de:

**INGENIERO AGRÓNOMO**

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

.....  
Dra. Luz Gomez Pando

**PRESIDENTE**

.....  
Dr. Sady Javier García Bendezú

**ASESOR**

.....  
Dr. Oscar Loli Figueroa

**MIEMBRO**

.....  
Ing. Mg. Sc. Ruby Vega Ravello

**MIEMBRO**

Lima – Perú

2019

## **DEDICATORIA**

A violeta y José, mis queridos padres

## ÍNDICE GENERAL

<b>I. INTRODUCCION.....</b>	<b>1</b>
1.1. OBJETIVO GENERAL .....	2
1.2. OBJETIVO ESPECÍFICO .....	2
<b>II. REVISIÓN DE LITERATURA.....</b>	<b>3</b>
2.1. SUELOS SALINOS .....	3
2.2. SUELOS SALINO-SÓDICOS .....	5
2.3. SUELOS SÓDICOS .....	6
2.4. ESTRÉS SALINO EN LOS CULTIVOS .....	9
2.5. ESTRATEGIAS DE REMEDIACIÓN DE SUELOS AFECTADOS POR SALES Y SODIO.....	11
2.5.1. Lixiviado o lavado de sales .....	11
2.5.2. Drenaje .....	13
2.5.3. Enmiendas en suelos salinos y suelos salinos sódicos .....	13
2.5.4. Enmiendas en suelos sódicos .....	14
2.6. PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELOS .....	17
2.6.1. Conductividad hidráulica .....	17
2.6.2. Velocidad de infiltración .....	21
<b>III. MATERIALES Y METODOS.....</b>	<b>22</b>
3.1. UBICACIÓN .....	22
3.2. CARACTERÍSTICAS DEL SUELO EXPERIMENTAL .....	22
3.3. CARACTERÍSTICAS DE LAS ENMIENDAS EMPLEADAS .....	24
3.3.1. Suspensión de yeso agrícola.....	24
3.3.2. Cachaza de la caña azúcar .....	24
3.3.3. Vinaza de la caña de azúcar .....	25
3.4. MATERIALES.....	25
3.4.1. Fase de invernadero.....	25
3.4.2. Fase determinación de pruebas físicas .....	25
3.4.3. Fase determinación de pruebas químicas .....	26
3.4.4. Equipos eléctricos de laboratorio .....	27
3.4.5. Reactivos para las pruebas químicas .....	27
3.5. DESCRIPCIÓN DE LOS TRATAMIENTOS.....	27
3.5.1. Enmiendas .....	27

3.5.2.	Tratamiento sin enmienda .....	27
3.6.	<b>METODOLOGÍA Y PROCEDIMIENTO</b> .....	28
3.6.1.	Colecta, preparación y muestreo de suelo .....	28
3.6.2.	Preparación de las macetas.....	28
3.6.3.	Aplicación de enmiendas.....	28
3.6.4.	Incubación en húmedo.....	30
3.6.5.	Determinación de densidad aparente.....	30
3.6.6.	Pruebas de conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ) .....	30
3.6.7.	Lavado de los suelos .....	31
3.6.8.	Determinación de conductividad eléctrica y pH en los suelos lavados.....	32
3.6.9.	Análisis de iones solubles en el extracto de pasta de saturación de los suelos lavados y agua de drenaje.....	32
3.7.	<b>ANÁLISIS ESTADÍSTICO</b> .....	35
3.7.1.	Factores del diseño experimental .....	35
3.7.2.	Tratamientos o niveles de los factores del diseño experimental .....	35
3.7.3.	Unidad experimental .....	35
3.7.4.	Replicas por tratamiento: Cinco .....	35
3.7.5.	Variables respuesta.....	35
3.7.6.	Tratamiento estadístico.....	36
<b>IV.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>38</b>
4.1.	<b>RESULTADOS</b> .....	38
4.1.1.	Distribución normal de errores y homogeneidad de varianzas .....	38
4.1.2.	Densidad aparente .....	39
4.1.3.	Conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ) .....	39
4.1.4.	Conductividad eléctrica en el extracto de saturación ( $CE_{(eps)}$ ).....	41
4.1.5.	Relación de adsorción de sodio en el extracto de saturación ( $RAS_{(eps)}$ ) .....	41
4.1.6.	Cloruro en el extracto de saturación.....	42
4.1.7.	Sulfato en el extracto de saturación.....	42
4.1.8.	Nitrato, bicarbonato y carbonato en el extracto de saturación .....	43
4.1.9.	Potasio en el extracto de saturación .....	44
4.1.10.	Calcio en el extracto de saturación.....	44
4.1.11.	Magnesio en el extracto de saturación .....	45
4.1.12.	Sodio en el extracto de pasta de saturación.....	45
4.1.13.	Conductividad eléctrica del agua de drenaje ( $CE_{ad}$ ).....	46

4.1.14. Relación de adsorción de sodio en el agua de drenaje ( $RAS_{ad}$ ) .....	46
4.1.15. Potasio en el agua de drenaje .....	47
4.1.16. Calcio, magnesio y sodio en el agua de drenaje.....	49
4.1.17. Cloruro en el agua de drenaje.....	50
4.1.18. Sulfato en el agua de drenaje.....	50
4.1.19. Nitrato, bicarbonato y carbonato en el agua de drenaje .....	51
<b>4.2. DISCUSIÓN.....</b>	<b>52</b>
4.2.1. Densidad aparente (d.a).....	52
4.2.2. Conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ) .....	52
4.2.3. Conductividad eléctrica.....	53
4.2.4. Ras del extracto de saturación del suelo ( $RAS_{(eps)}$ ).....	54
4.2.5. Concentración de calcio .....	55
4.2.6. Concentración de potasio .....	55
4.2.7. Concentración de magnesio.....	56
4.2.8. Concentración de sulfato .....	56
<b>V. CONCLUSIONES.....</b>	<b>57</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>58</b>
<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>59</b>
<b>VIII. ANEXOS .....</b>	<b>63</b>

## INDICE DE CUADROS

<b>Cuadro N° 1:</b> Clasificación de la salinidad de los suelos y su efecto sobre las cosechas ....	4
<b>Cuadro N° 2:</b> Clasificación general de suelos afectados por salinidad, salino-sodicidad y sodicidad.....	9
<b>Cuadro N° 3:</b> Valores de conductividad eléctrica umbral (A) y porcentaje de disminución de rendimiento (B) para algunos cultivos .....	13
<b>Cuadro N° 4:</b> Valores de conductividad hidráulica (K) asociados al grado de permeabilidad de los suelos.....	20
<b>Cuadro N° 5:</b> Clasificación de permeabilidades de suelo para la agricultura y la conservación .....	20
<b>Cuadro N° 6:</b> Velocidad de infiltración final para algunos suelos según su clase textural.....	21
<b>Cuadro N° 7:</b> Características fisicoquímicas del suelo experimental .....	22
<b>Cuadro N° 8:</b> Análisis de Salinidad del suelo experimental .....	23
<b>Cuadro N° 9:</b> Propiedades físicas y químicas de la suspensión de yeso .....	24
<b>Cuadro N° 10:</b> Características físico-químicas de la cachaza utilizada .....	24
<b>Cuadro N° 11:</b> Características físico-químicas de la vinaza utilizada .....	25
<b>Cuadro N° 12:</b> Tratamientos o factores en estudio .....	28
<b>Cuadro N° 13:</b> Dosis de enmiendas para desplazar el 100% y el 200% del sodio del complejo de cambio por kilogramo de suelo.....	29
<b>Cuadro N° 14:</b> Enmiendas incorporadas por maceta con 3 Kg de suelo y número de repeticiones.....	29
<b>Cuadro N° 15:</b> Determinación de $K_s$ en una arena fina y en un suelo franco arenoso-Ustic Torrifluvents.....	31
<b>Cuadro N° 16:</b> Distribución de grados de libertad, suma de cuadrados y cuadrado medio por fuente de variación (ANVA) .....	37
<b>Cuadro N° 17:</b> P-valores de las pruebas de Anderson-Darling y de Levene para algunas de las variables respuesta.....	38
<b>Cuadro N° 18:</b> Efecto del tipo de enmienda y de las dos dosis sobre la densidad aparente.....	39
<b>Cuadro N° 19:</b> Efecto del tipo de enmienda y de las dos dosis sobre la conductividad hidráulica .....	40

<b>Cuadro N° 20:</b> Efecto del tipo de enmienda y de las dos dosis sobre $CE_{(es)}$ y $RAS_{(es)}$ ....	42
<b>Cuadro N° 21:</b> Efecto del tipo de enmienda y de las dos dosis sobre las concentraciones finales de cloruro y sulfato en el extracto de saturación.....	43
<b>Cuadro N° 22:</b> Concentración de nitrato y bicarbonato según el tipo de enmienda en el extracto de saturación .....	44
<b>Cuadro N° 23:</b> Efecto del tipo de enmienda y de las dos dosis sobre las concentraciones finales de potasio, calcio, magnesio y sodio en el extracto de saturación.....	46
<b>Cuadro N° 24:</b> Efecto del tipo de enmienda y de las dos dosis sobre $CE_{(ad)}$ y $RAS_{(ad)}$ .....	47
<b>Cuadro N° 25:</b> Efecto del tipo de enmienda y de las dos dosis sobre la concentración de potasio en el agua de drenaje .....	48
<b>Cuadro N° 26:</b> Concentración de calcio, magnesio y sodio según el tipo de enmienda en el agua de drenaje .....	50
<b>Cuadro N° 27:</b> Efecto del tipo de enmienda y de las dos dosis sobre la concentración de cloruro y sulfato en el agua de drenaje .....	51
<b>Cuadro N° 28:</b> Concentración de nitrato y bicarbonato según el tipo de enmienda en el agua de drenaje .....	51

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura N° 1:</b> Hidrólisis del sodio en el complejo de cambio.....	5
<b>Figura N° 2:</b> Flujo vertical descendente en una columna vertical de suelo saturado .....	19
<b>Figura N° 3:</b> Efecto de tres enmiendas (cachaza, vinaza, yeso) aplicadas a dos dosis sobre la conductividad hidráulica del suelo experimental.....	41
<b>Figura N° 4:</b> Efecto de tres enmiendas (cachaza, vinaza y yeso) aplicadas a dos dosis sobre la concentración final de calcio en el extracto de saturación.....	45
<b>Figura N° 5:</b> Efecto de tres enmiendas (cachaza, vinaza y yeso) aplicadas a dos dosis sobre la concentración de potasio en el agua de drenaje .....	48
<b>Figura N° 6:</b> Concentración de calcio en al agua de drenaje según tipo de enmienda y dosis empleada.....	49

## INDICE DE ANEXOS

<b>ANEXO 1:</b> ANVA de la densidad aparente .....	63
<b>ANEXO 2:</b> ANVA de la conductividad hidráulica.....	63
<b>ANEXO 3:</b> ANVA de la conductividad eléctrica del extracto de saturación .....	63
<b>ANEXO 4:</b> ANVA del RAS del extracto de saturación .....	64
<b>ANEXO 5:</b> ANVA de la concentración de cloruro en el extracto de saturación.....	64
<b>ANEXO 6:</b> ANVA de la concentración de potasio en el extracto de saturación.....	64
<b>ANEXO 7:</b> ANVA de la concentración de sulfato en el extracto de saturación .....	64
<b>ANEXO 8:</b> ANVA de la concentración de calcio en el extracto de saturación.....	64
<b>ANEXO 9:</b> ANVA de la concentración de magnesio en el extracto de saturación .....	65
<b>ANEXO 10:</b> ANVA de la concentración de sodio en el extracto de saturación.....	65
<b>ANEXO 11:</b> ANVA de la concentración de potasio en el agua de drenaje.....	65
<b>ANEXO 12:</b> ANVA del RAS del agua de drenaje .....	65
<b>ANEXO 13:</b> ANVA de la concentración de cloruro en el agua de drenaje.....	65
<b>ANEXO 14:</b> ANVA de la concentración de sulfato en el agua de drenaje .....	66
<b>ANEXO 15:</b> ANVA de la conductividad eléctrica del agua de drenaje .....	66
<b>ANEXO 16:</b> Curva patrón, relación lineal, y ecuación para la determinación de azufre. ..	66
<b>ANEXO 17:</b> Curva patrón, relación lineal, y ecuación para la determinación de nitratos.	67

## RESUMEN

Dos residuos orgánicos (cachaza, vinaza) derivados de la industrialización de la caña de azúcar, y una suspensión concentrada de yeso fueron aplicados para la corrección de un suelo salino-sódico de textura franco arenosa, pH de 8.59,  $CE_{(eps)}$  de 42.5 dS m<sup>-1</sup>, PSI de 15.76 %. Las dosis fueron calculadas para desplazar 100 y 200 % del sodio intercambiable, respectivamente. El suelo fue incubado a capacidad de campo durante 4 meses. Se empleó un diseño completamente al azar con arreglo factorial de tres enmiendas más un control. La densidad aparente (d.a), conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ), conductividad eléctrica (CE), RAS, y composición final de iones solubles en el extracto de saturación y el agua de drenaje fueron evaluados. La  $CE_{(eps)}$  y la  $K_s$  resultaron significativamente mayores en el tratamiento cachaza. La vinaza disminuyó significativamente la d.a y aumentó significativamente la concentración de potasio. Ambos residuos orgánicos presentan un buen potencial como enmiendas para la corrección de la sodicidad y la salinidad del suelo, requiriendo mayor investigación a nivel de campo.

**Palabras clave:** suelo salino-sódico, conductividad hidráulica, iones solubles

## ABSTRACT

Two organic products of sugar cane industry (vinasse, press mud) and a gypsum suspension were incorporated to reclaim a saline-sodic soil (sandy loam, pH 8.59,  $CE_{(eps)}$  42.5 dS m<sup>-1</sup>, PSI 15.76%). Doses were established to displace 100% and 200% of exchangeable sodium. The soil was kept in field capacity for a period of 4 months (incubation). Bulk density, saturated hydraulic conductivity ( $K_s$ ), electrical conductivity (CE), RAS, and soluble ions final composition in saturated paste extract and drainage water was evaluated.  $CE_{(eps)}$  and  $K_s$  values were significantly major in press mud treatment. Vinasse reduced significantly bulk density and significantly increased potassium concentration. Both organic amendments have good potential for reclaiming saline and sodic soils, making field research necessary.

**Key words:** saline-sodic soil, hydraulic conductivity, soluble ions.

## I. INTRODUCCION

Los suelos afectados por salinidad afectan al 30 % del área agrícola de la costa del Perú. En un suelo salino-sódico el porcentaje de sodio que satura el complejo de cambio (PSI) es mayor al 15 % y la CE es mayor a  $2 \text{ dS m}^{-1}$  (Fassbender, 1975). La corrección de estos suelos requiere el uso de enmiendas que aporten calcio en forma directa o indirecta. Si bien el yeso agrícola ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) es la enmienda de más extenso uso, las enmiendas orgánicas, por su amplia gama de propiedades, también han sido propuestas como alternativa: las materias orgánicas contrarrestan los efectos nocivos del sodio y el cloruro sobre el suelo y el cultivo (Hernández, 2000). De manera similar al efecto del yeso en suelos alcalinos dispersados, la adición de estiércoles o compost tiene numerosos efectos benéficos en la estructura del suelo a través de la formación de complejos arcillo-húmicos (Lal y Shukla, 2004). El carbono presente en el suelo es utilizado por los microorganismos como fuente de energía, en dicho proceso, una gran parte del carbono orgánico es transformado a  $\text{CO}_2$  (Paul y Clark, 1989), el incremento de la presión parcial de  $\text{CO}_2$  origina que el  $\text{CaCO}_3$  se desdoble en calcio soluble e ión bicarbonato (Bohn et al., 1993). El presente trabajo fue realizado en invernadero y laboratorio con el objetivo de evaluar la eficacia de dos residuos orgánicos derivados de la industria azucarera (vinaza y cachaza) en comparación con una suspensión concentrada de yeso en la corrección de un suelo salino-sódico.

La vinaza posee un buen potencial de uso agrícola debido a su alto contenido de materia orgánica, nitrógeno, y potasio; aunque su empleo podría estar limitado debido a su contenido de sodio (Madejón *et al.*, 2001). De acuerdo con Mavi *et al.*, 2012, el alto contenido de cationes monovalentes de la vinaza puede causar la dispersión de la materia orgánica y partículas de arcilla. Sin embargo Gutierrez *et al.* (2016), encontraron una reducción del porcentaje de sodio intercambiable por encima del 50% al utilizar vinaza en altas dosis.

La cachaza puede utilizarse como enmienda debido a su importante contenido de calcio, magnesio, azufre, elementos traza, y materia orgánica (Solaimalai *et al.*, 2001), se genera a partir del proceso de purificación del azúcar por carbonatación o sulfitación, cuando se obtiene por sulfitación, la cachaza contiene  $\text{CaSO}_4$  y es ácida, si se obtiene por carbonatación la cachaza contiene  $\text{CaCO}_3$  (Dotaniya *et al.*, 2001).

La presente investigación propone que la aplicación de estas enmiendas causará variaciones en los parámetros físicos de densidad aparente y de conductividad hidráulica, así como también en la composición final de cationes y aniones en el extracto de pasta de saturación luego de un lavado, para ello el presente trabajo de investigación a nivel de invernadero y laboratorio fue planteado, los objetivos fueron los siguientes:

### **1.1. OBJETIVO GENERAL**

- Evaluar la factibilidad del uso de dos residuos orgánicos derivados de la industria azucarera (cachaza y vinaza) y de una suspensión de yeso para la corrección de un suelo salino-sódico de la costa central del Perú proveniente de Paramonga.

### **1.2. OBJETIVO ESPECÍFICO**

- Evaluar el efecto de la aplicación de cachaza, vinaza y yeso sobre algunos parámetros físicos (densidad aparente, conductividad hidráulica) y químicos (conductividad eléctrica, relación de adsorción de sodio) en un suelo salino-sódico de Paramonga.
- Determinar el efecto de la aplicación de cachaza, vinaza y yeso sobre la composición final de cationes y aniones solubles en el agua de drenaje y extracto de pasta de saturación del suelo experimental en comparación con un testigo sin enmienda.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. SUELOS SALINOS

Se consideran sales solubles a aquellas cuya solubilidad es mayor que la del yeso, equivalente a  $2.41 \text{ g L}^{-1}$  (Fassbender *et al.*, 1994). Los suelos salinos son aquellos que poseen en el extracto de pasta de saturación una conductividad eléctrica mayor a  $4 \text{ dS m}^{-1}$ , el porcentaje de sodio intercambiable es menor a 15 % y por lo general el pH es inferior a 8.5 (USDA, 1954). El contenido de sales solubles controla la presión osmótica de la solución suelo. El catión sodio raramente constituye más de la mitad de la composición de cationes en solución, por tanto, no es adsorbido al complejo arcillo húmico significativamente. Las cantidades de calcio y magnesio tanto en solución como el complejo varían considerablemente y generalmente el potasio soluble o intercambiable es el que se encuentra en menor cantidad, aunque ocasionalmente puede ser el catión que se encuentre en mayoría. Los principales aniones que se puede encontrar en un suelo salino son cloruros, sulfatos y algunas veces nitratos. Pequeñas cantidades de bicarbonato pueden existir pero los carbonatos solubles siempre estarán ausentes. Debido al exceso de sales neutras solubles y a la no significativa cantidad de sodio en el complejo de cambio, los suelos salinos siempre están floculados y en consecuencia, tienen una permeabilidad igual o mayor a la de los suelos no salinos. Muchos de los suelos salinos pueden contener apreciables cantidades de yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) en el perfil.

Aunque el valor umbral de  $4 \text{ dS m}^{-1}$  en el extracto de pasta de saturación para limitar los suelos salinos y no salinos ha sido notablemente aceptado, el Consejo de la Sociedad de Ciencia del Suelo de América ha disminuido este valor a  $2 \text{ dS m}^{-1}$ . Si bien es cierto que los suelos salinos poseen propiedades físicas favorables (buena estructura, aptitud para la labranza y permeabilidad), cuando estos son lavados con agua de bajo contenido salino, algunos suelos salinos podrían ser propensos a dispersarse, lo que los llevaría a convertirse en suelos de baja permeabilidad para el agua y el aire, dicha lixiviación incluso podría conllevar un aumento en los niveles pH debido a la disminución en el contenido

de sales solubles neutras, sin embargo, los suelos salinos raramente se convierten sódicos si es que existe un adecuado drenaje (Abrol *et al.*, 1988).

En condiciones de campo la salinidad puede reconocerse por el crecimiento desuniforme de los cultivos, usualmente existen en el área del terreno los denominados focos de crecimiento y las costras salinas. Las plantas que crecen en los suelos afectados por salinidad tienen síntomas similares a aquellas plantas que sufren estrés hídrico debido a que el potencial osmótico del agua de suelo se hace muy negativo; comúnmente es la marchitez el síntoma visual más evidente, y a diferencia de las plantas que sufren sólo de estrés hídrico o sequía, la marchitez por salinidad es mucho menos prevalente debido a que el potencial osmótico del agua del suelo puede cambiar constantemente y a que las plantas usualmente tienen la capacidad de ajustar sus contenidos internos de sales lo suficientemente como para mantenerse turgentes.

La salinidad no solo tiene un efecto a nivel del potencial osmótico del agua, sino también posee un efecto de ión específico pudiendo causar fitotoxicidad, generalmente los iones a los que se les atribuye este último efecto son el sodio, cloro y algunas veces el boro. El contenido de las sales del suelo no es uniforme, varía en sentido vertical, horizontal y a lo largo del tiempo. Las sales son favorecidas en su acumulación cuando las precipitaciones son inferiores a 400 mm (Fassbender *et al.*, 1994).

La clasificación de los suelos con respecto a la salinidad y su efecto sobre las cosechas se presenta en el Cuadro N° 1.

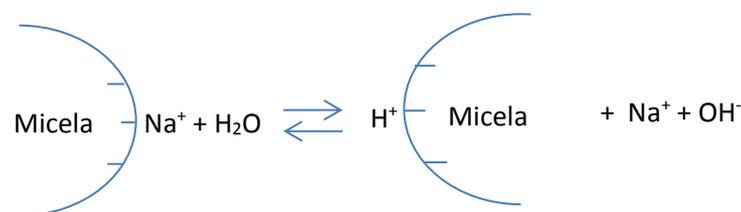
**Cuadro N° 1: Clasificación de la salinidad de los suelos y su efecto sobre las cosechas**

Conductividad eléctrica (dS m <sup>-1</sup> )	Clasificación	Efecto sobre la cosecha
0-2	No salino	Comúnmente despreciable
2-4	Poco salino	Cultivos muy sensibles afectados
4-8	Medianamente salino	Muchos cultivos afectados
8-16	Muy salino	Solo cultivos tolerantes crecen bien
>16	Extremadamente salino	Solo cultivos muy tolerantes crecen bien

Adaptado de Fassbender *et al.* (1994)

## 2.2. SUELOS SALINO-SÓDICOS

Los suelos salinos sódicos contienen grandes cantidades de sales solubles neutras y suficiente sodio para afectar seriamente a las plantas (Brady *et al.*, 1984). La conductividad eléctrica en el extracto de pasta de saturación de estos suelos es mayor a  $4 \text{ dS m}^{-1}$  y el porcentaje de sodio intercambiable es más grande que 15. El pH es comúnmente 8.5 o menos debido a la presencia de sales solubles neutras. La relación de adsorción de sodio es al menos 13. Si un suelo salino-sódico es lavado y las concentraciones de calcio y magnesio en el suelo o en el agua utilizada para el riego son bajas, el pH del suelo podría ascender marcadamente debido al hecho de que las sales neutras solubles fueron removidas. En tal contexto, el sodio intercambiable rápidamente se hidroliza y por lo tanto incrementa las concentraciones de iones  $\text{OH}^-$  en la solución suelo, así:



**Figura N° 1: Hidrólisis del sodio en el complejo de cambio**

En la presencia de sales neutras que contengan sodio, la reacción mostrada en la Figura N° 1 se desplaza hacia la izquierda, por tanto la concentración de iones  $\text{OH}^-$  se reduce y el pH se mantiene alrededor de 8.0. Si las sales neutras son removidas, el pH de la solución subirá hasta por encima de 8.5 y los coloides serán dispersados, lo que conllevará al deterioro de la estructura del suelo, al mismo tiempo, el riesgo de toxicidad por sodio aumentará.

O'Geen (2015) menciona que la condición de las propiedades físicas de los suelos salinos-sódicos son mejores que las de los suelos no salinos, básicamente porque la alta concentración de sales mantiene las partículas del suelo floculadas y por su estructura estable. Davis *et al.* (2012), prefieren decir que las condiciones de las propiedades físicas de los suelos salino-sódicos son más bien variables. Los síntomas en las plantas que crecen en los suelos salino-sódicos vendrían a ser muy parecidos a los síntomas ocasionados por los suelos que son solamente salinos.

### 2.3. SUELOS SÓDICOS

Los suelos sódicos son aquellos que contienen más de 15 % de sodio intercambiable, las sales neutras solubles no son abundantes, pero sí contienen importantes cantidades de sales de reacción alcalina como el carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). La conductividad eléctrica del extracto de pasta de saturación es menor a  $4 \text{ dS m}^{-1}$ , el pH es mayor a 8.2 y en casos extremos podría llegar a valores de hasta 10.5. El exceso de sodio desmedra las propiedades físicas y nutricionales, lo que al final se traduce en una total o drástica reducción del crecimiento de las plantas. La materia orgánica dispersa y disuelta en la solución suelo, podría llegar a ser depositada en la superficie debido a la acción capilar y a la evaporación, lo que muchas veces origina suelos de superficie negra. La aparición de grietas es común cuando estos suelos se encuentran secos o deshidratados (Abrol *et al.*, 1988).

El aumento de la proporción de sodio intercambiable, sin que exista una concentración significativa de sales disueltas en la fase líquida, implica que durante la edafogénesis ha habido una solución exterior rica en ión sodio y continuamente renovada, lo que ha inducido un aumento progresivo del porcentaje de sodio en las sedes de intercambio; posteriormente, habrá tenido lugar una pérdida progresiva de iones de la fase líquida por lavado. Paralelamente, ha tenido lugar un proceso de iluviación de arcillas sódicas, que resultan fácilmente traslocables por el efecto dispersante del sodio, incluso en presencia de carbonato de calcio o de yeso. Los suelos sódicos a veces se forman a partir de materiales no consolidados, sedimentos de textura fina, a veces depósitos marinos o materiales aluviales salinos que han sido drenados o se han secado de forma natural. Acostumbran a estar asociados a llanuras o a terrenos suavemente ondulados, en climas con veranos cálidos y secos, en regiones semiáridas, templadas o subtropicales (Porta *et al.*, 2011).

En los suelos sódicos la hidrólisis del sodio intercambiable que fue descrita en la Figura N° 1 es más intensa, como vimos en dicha reacción, el hidrógeno ( $\text{H}^+$ ) es capaz de desplazar al sodio del complejo arcillo-húmico y este a su vez es incapaz de inactivar los iones hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ) que se liberan tras la reacción, y por tanto, se produce un incremento fuerte en el pH. La medida en que los cationes del complejo de cambio son hidrolizados dependerá de sus habilidades para competir con los iones hidrógeno por los sitios de

intercambio, el sodio y el potasio no son buenos competidores frente al hidrógeno como sí lo son el calcio y el magnesio, y es por esta razón que el sodio y el potasio son hidrolizados en mucho mayor medida. Los suelos que contienen apreciables cantidades de carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) poseen niveles de pH por encima de 8.2, el pH se incrementa conforme las cantidades de esta sal también lo hacen. La sal de carbonato de sodio a diferencia del carbonato de calcio y magnesio que también se encuentran presentes a dichos pHs, posee una gran solubilidad y por tanto, incrementa el potencial de hidrólisis del sodio (Abrol *et al.*, 1988).

El porcentaje de sodio intercambiable puede calcularse en base a la relación (Fassbender *et al.*, 1994):

$$PSI = \left( \frac{Na^+ \text{intercambiable}}{\sum \text{cationes intercambiables}} \right) \times 100 \quad (2.1)$$

Los suelos en los cuales pasa agua de riego con abundantes niveles de sodio, adsorben este catión gradualmente a pesar de su gran solubilidad. Para estimar este problema se usa el valor de la relación de absorción de sodio (RAS):

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}} \quad (2.2)$$

Donde  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  son las concentraciones en miliequivalentes por litro ( $\text{meq L}^{-1}$ ) en el agua de riego. También es posible expresar las concentraciones de los iones en milimol de carga por litro ( $\text{mmol (+) L}^{-1}$ )

Frecuentemente, los suelos sódicos son el resultado de la exposición de suelos anteriores a aguas con altos niveles de sodio y con una alta proporción de carbonato ácido. La velocidad con que se presenten los problemas depende del RAS del agua, de la precipitación de yeso en esas aguas y de la disolución de minerales en el suelo. No todos los suelos sódicos tienen niveles altos de pH aunque los valores comunes se encuentren entre 8.5 y 10. Cuando los iones sodio en la solución del suelo se presentan como sales neutras (es decir como cloruros o sulfatos), el pH es cercano a la neutralidad. Las

reacciones fuertemente alcalinas de los suelos sódicos se deben a que el anión acompañante sea el carbonato ácido o el carbonato, lo que resulta en un pH entre 8.5 y 11. El uso del RAS no sólo se limita para el análisis de las aguas de riego, sino ha sido extendido también al agua de la solución suelo obtenida a través de la elaboración de una pasta saturada. La relación de sodio intercambiable (RSI o PSI) puede ser estimado a partir del RAS mediante la siguiente relación (Porta, 2003):

$$RSI = RAS * K_G \quad (2.3)$$

Donde  $K_G$  es el coeficiente de selectividad de Gapon.

El coeficiente de Gapon ( $K_G$ ) ha sido estimado para una serie de suelos del oeste de los Estados Unidos (EE.UU) y su valor oscila entre 0.010 y 0.015 ( $\text{mmol}^{-1} \cdot \text{L}$ )<sup>1/2</sup> (Bohn *et al.*, 1993).

La estimación directa del PSI haciendo uso de la ecuación 2.1, en lo que respecta a la utilización de un índice para medir la sodicidad, ha sido considerada poco práctica y con varios inconvenientes a nivel de laboratorio; el uso del RAS, en toda la bibliografía citada en este documento, es en cambio considerado como un método más fácil y rápido.

Los altos niveles de sodio causan una dispersión de los agregados del suelo, lo que daña su estructura, como resultado, la aireación y la conducción hidráulica del agua empeoran. En los suelos sódicos, la capacidad de infiltración de agua se reduce fuertemente, lo que a su vez significa que la capacidad de almacenamiento de agua disponible dentro del perfil del suelo también se reduce. Después de que una lámina de agua atraviesa el suelo, con el transcurrir del tiempo, muchas de las necesidades hídricas de los cultivos son cubiertas por el agua que se mueve en condiciones insaturadas desde las capas sub-superficiales del suelo hacia las partes superiores, los altos valores de PSI de los suelos sódicos al reducir drásticamente la conductividad hidráulica, disminuyen así la transmisión de agua hacia las raíces de los cultivos. La penetración y la proliferación de raíces son también extremadamente restringidas (Abrol *et al.*, 1988).

A continuación en el Cuadro N° 2, se muestra una comparación general entre los suelos salinos, suelos salino-sódicos y suelos sódicos:

**Cuadro N° 2: Clasificación general de suelos afectados por salinidad, salino-sodicidad y sodicidad**

<b>Clasificación</b>	<b>Conductividad eléctrica (ds/m)</b>	<b>Relación de adsorción de sodio (RAS)</b>	<b>pH del suelo</b>	<b>Condición de las propiedades físicas</b>
Ligero salino	2-4	Menor a 13	Menor de 8.5	Normal
Salino	Mayor a 4	Menor a 13	Menor de 8.5	Normal
Salino-sódico	Mayor a 4	Mayor a 13	Menor de 8.5	Variable
Sódico	Menor a 4	Mayor a 13	Mayor a 8.5	Pobre

FUENTE: Davis *et al.* (2012)

#### **2.4. ESTRÉS SALINO EN LOS CULTIVOS**

Un interesante resumen del estrés salino en los cultivos puede ser encontrado en Taiz y Zeiger (2006). El efecto de una cantidad excesiva de solutos en la solución suelo es muy similar al efecto que produce el déficit hídrico y la mayoría de las plantas hacen frente a él de la misma manera. Una diferencia importante entre el bajo potencial hídrico provocado por la salinidad y por la desecación es la cantidad de agua, así, en un suelo seco la planta sólo puede obtener una cantidad muy limitada de agua precisamente porque esta no está presente, en cambio en la mayoría de los entornos salinos, existen considerables cantidades de agua aunque a un potencial hídrico muy reducido. Los cultivos que crecen en suelos salinos se ven en la necesidad de desarrollar un potencial hídrico mucho más negativo que el agua de suelo para mantenerse turgentes, esto lo logran ajustando sus propios potenciales osmóticos.

Además de los potenciales hídricos muy negativos que podría presentar un suelo salino, también existen los efectos tóxicos específicos de los iones que se presentan cuando estos se acumulan en concentraciones peligrosas (por ejemplo sodio y cloruro). En condiciones no salinas, el citoplasma de las células de las plantas superiores contiene entre 100 y 200 mM de potasio y de 1 a 10 mM de sodio, lo que es un medio óptimo para muchas enzimas, una relación anormalmente alta de sodio y potasio y altas concentraciones de sales totales inactiva las enzimas e inhibe la síntesis de proteínas. A altas concentraciones, el sodio puede desplazar al calcio en la membrana plasmática de los pelos radiculares de algodón y

provocan un cambio en la permeabilidad de la membrana plasmática que puede ser detectado por la pérdida de potasio proveniente de las células. Cuando se acumulan altas concentraciones de iones sodio y cloruro en los cloroplastos, se inhibe la fotosíntesis, dado que el transporte fotosintético de electrones parece ser relativamente insensible a las sales, bien el metabolismo del carbono o bien la fosforilación debe verse afectada.

Una forma en la que las plantas que son sensibles a la sal hacen frente a dicho estrés es que excluyen a las sales de los meristemos, sobre todo en los brotes de las hojas fotosintéticamente activas.

La banda de Caspary supone una restricción al movimiento apoplástico de los iones hacia la xilema, para evitar la banda de Caspary, los iones han de pasar a la ruta simplástica a través de las membranas celulares, esta transición ofrece a las plantas resistentes a la sal un mecanismo para excluir parcialmente los iones perjudiciales. Los iones sodio pueden entrar a las raíces pasivamente por movimiento a favor del gradiente de potencial electroquímico, por lo que las células deben utilizar energía para activar el transporte de sodio de vuelta a la solución extracelular.

Algunas plantas resistentes como *Atriplex* spp., no excluyen los iones de las raíces, pero tienen glándulas salinas en la superficie de las hojas a donde son transportados los iones y en donde se cristalizan pasando a convertirse en no perjudiciales.

Las plantas, como los manglares, que constantemente ajustan su potencial osmótico interno para asegurar un continuo suministro de agua, acumulan y sintetizan solutos como la glicina betaína, prolina, sorbitol y sacarosa en la vacuola y el citoplasma. El tipo de soluto empleado depende de la especie de planta. La cantidad de carbono estimada para la síntesis de estos solutos podría llegar hasta un 10 % del peso en planta; si bien es cierto que toda esta cantidad de carbono utilizado para la síntesis de iones orgánicos que se utilizan para hacer frente al muy negativo potencial osmótico del agua del suelo, no afecta la supervivencia de plantas silvestres, para el caso de plantas cultivadas significa pérdidas considerables en los rendimientos.

El proceso de ajuste osmótico también puede realizarse mediante la acumulación de iones en la vacuola, donde pueden contribuir al potencial osmótico sin dañar a las enzimas sensibles a la sal. Las plantas glicófitas (sensibles a la sal) también tienen esta capacidad, aunque en menor medida que las halófitas (tolerantes a la sal).

## **2.5. ESTRATEGIAS DE REMEDIACIÓN DE SUELOS AFECTADOS POR SALES Y SODIO**

### **2.5.1. Lixiviado o lavado de sales**

Cierta cantidad de sales son agregadas al suelo con cada riego y aunque los cultivos absorben una parte de ellas siempre quedan en el perfil cantidades considerables, este problema se agudiza cuando las aguas utilizadas en irrigación son clasificadas como salinas (Ayers y Wescott, 1985).

Una porción de las sales adicionadas al suelo deben ser removidas de la zona radicular antes que la concentración de estas llegue a ser peligrosa y los cultivos empiecen a verse afectados. La cantidad de agua que pasa a través de la zona radicular, que percola, y que acarrea una porción de las sales es conocida como fracción de lavado. Matemáticamente la fracción de lavado puede ser definida como:

$$FL = \frac{L_p}{L_a} \quad (2.4)$$

Donde FL es fracción de lavado,  $L_p$  es la lámina de agua que percola a través de la zona radicular,  $L_a$  es la lámina de agua aplicada en la superficie.

Cuando un suelo es regado sucesivamente con las mismas aguas de riego, su concentración de sales llegará a un equilibrio en función de la salinidad del agua que se utiliza y de la fracción de lavado. La concentración de sales del agua de drenaje puede ser obtenida mediante la siguiente ecuación:

$$EC_{dw} = EC_w / LF \quad (2.5)$$

Dónde:  $EC_{dw}$  = salinidad de la fracción de lavado;  $EC_w$ =Salinidad del agua de riego;  
 $LF$ =Fracción de lavado.

Si la zona radicular de los cultivos es dividida en zonas de absorción que difieran en cuanto su capacidad de mayor consumo de agua, la ecuación 2.5 puede ser adaptada para estimar las conductividades eléctricas de las fracciones parciales de lavado que atraviesan cada sección de raíces. Se establece que la zona radicular puede dividirse en cuatro secciones: en la primera sección que es la más próxima a la superficie se consume el 40 por ciento de la ETC, en la subsiguiente se consume el 30 por ciento de la ETC, y en las dos últimas secciones se consume el 20 y el 10 por ciento restantes, siendo la última la de menor absorción de agua.

La expresión 2.4 de la fracción de lavado, no puede en sí misma contribuir al cálculo exacto de la lámina de agua que debe pasar a través de la zona radicular acarreado sales para la conservación de los suelos. Para ello la expresión de Rhoades y Merrill, 1976 debe ser usada:

$$FL = \frac{CEar}{5xCES - CEar} \quad (2.6)$$

Dónde:  $FL$ = fracción de lavado;  $CEar$ = conductividad eléctrica del agua de riego;  $CES$ = conductividad eléctrica del extracto de pasta de saturación.

El valor  $CES$  en la ecuación 2.6 corresponde a un máximo valor de conductividad eléctrica de extracto de pasta saturada que podemos tolerar en un suelo en función a un rendimiento planificado en algún cultivo; puede ser obtenido a partir de la ecuación de Maas y Hoffman (1977):

$$Y = 100 - B (CES - A) \quad (2.7)$$

Dónde:  $Y$ = rendimiento relativo (%);  $CES$ = conductividad eléctrica del extracto de pasta saturada del suelo en  $dS\ m^{-1}$  a  $25\ ^\circ C$ ;  $A$ = valor de salinidad a partir del cual el rendimiento comienza a disminuir (conductividad eléctrica umbral en  $dS\ m^{-1}$ );  $B$ =Porcentaje en que disminuye el rendimiento por el aumento de la conductividad eléctrica del suelo en una

unidad. Los valores de B y A para algún cultivo de interés pueden ser encontrados en las tabulaciones realizadas por Ayers y Westcot (1976) y por Carter (1981). Con fines ilustrativos, algunos valores de A y B son dados a continuación:

**Cuadro N° 3: Valores de conductividad eléctrica umbral (A) y porcentaje de disminución de rendimiento (B) para algunos cultivos**

<b>Especie</b>	<b>CE umbral ds.m<sup>-1</sup> 25°C (A)</b>	<b>Porcentaje de disminución del rendimiento por unidad de CE (B)</b>
Alfalfa	2	7.3
Algodón	7.7	5.2
Arroz	3	12.2
Cebada	8	5
Cebolla	1.2	16.1
Fresa	1	33.3
Granado	4	-
Haba	1.6	9.6
Tomate	2.5	9.9

### **2.5.2. Drenaje**

Muchos de los suelos salinos tienen su origen en la presencia de aguas subterráneas salinas muy cercanas a la superficie, en dichos casos, el lavado de las sales del suelo es limitado y la construcción de drenajes artificiales se convierte en una necesidad, para ello, el diseño apropiado y la eficacia de los sistemas de drenaje se convierte en la pieza clave para la remoción de las sales del perfil. El destino final de las aguas que acarrean la carga salina debe ser planificado junto con la construcción de los drenes.

### **2.5.3. Enmiendas en suelos salinos y suelos salinos sódicos**

Es común que en los suelos en donde el problema de salinidad se deba principalmente al cloruro de sodio los niveles de RAS sean altos también; el RAS, como se sabe, está en correlación directa con el PSI, por eso aquellos suelos salinos en los que los valores de relación de adsorción de sodio van creciendo pueden ir tornándose suelos salinos-sódicos. Los trabajos realizados por Khosla *et al.* (1979) señalan que el uso de una enmienda (por ejemplo yeso) para la remediación de un suelo salino y con altos niveles de RAS parece ser

de carácter no esencial y dependerá de que la aplicación o su uso sea práctico o no; para dichos autores, la desalinización siempre conlleva a la desodificación, por tanto, una relación favorable del calcio frente al sodio en el agua de riego puede ser suficiente para un proceso satisfactorio de desodificación. Como parte de los trabajos realizados por el autor mencionado, un mismo suelo fue lavado con y sin aplicaciones de yeso con una lámina de agua de 35 cm y 0.25 dS m<sup>-1</sup>; se encontró que la enmienda tiene casi ningún efecto en el proceso de desalinización, sin embargo, el uso de yeso significó menores niveles de RAS en las capas inferiores del suelo, pero como la salinización y la desodificación ocurren en forma simultánea, es muy probable que el mismo efecto del yeso en las capas inferiores del suelo hubiera sido logrado simplemente si más agua hubiera pasado a través del suelo. La remoción de las sales solubles no significó una considerable disminución de la tasa de infiltración como se hubiera esperado en un suelo que se hubiera tornado sódico. Por otro lado, las aplicaciones de yeso significaron un incremento en la tasa de infiltración.

Para Khosla *et al.* (1979), los resultados así expuestos indican que las aplicaciones de yeso pueden acelerar, a través de mejoras en la infiltración, los procesos de desalinización y desodificación, sin embargo son de carácter no esencial, la decisión de usar una enmienda para la remediación de suelos con exceso de sales solubles y altos niveles de RAS dependerá principalmente de las características de infiltración de los suelos o de si es que el agua utilizada en el lavado contiene una muy baja cantidad de electrolitos.

#### **2.5.4. Enmiendas en suelos sódicos**

El uso de enmiendas para los suelos sódicos está ampliamente justificado; la selección de alguna dependerá de factores como por ejemplo: el tiempo de remediación, la disponibilidad, y los recursos económicos (Abrol *et al.*, 1988). Se pueden diferenciar entre enmiendas químicas y orgánicas, las primeras son de acción más rápida que las segundas.

- **Enmiendas químicas:**

**Yeso:** sulfato de calcio dihidratado (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O); es un mineral de color blanco que se encuentra en forma natural en algunos suelos. Es medianamente soluble en agua y por lo tanto, constituye una fuente directa de calcio. El yeso reacciona tanto con el carbonato de sodio como con el sodio adsorbido al complejo de cambio, así:





El ácido sulfúrico formado podrá reaccionar con el calcáreo del suelo o con el carbonato de sodio así como se muestra en las reacciones 2.10 y 2.11.

**Azufre elemental:** (S), se comercializa en general con la formulación tipo polvo, posee un color amarillo y no es soluble en agua. Para ejercer su papel de enmienda primero debe sufrir una oxidación biológica que es la que conlleva a la formación de ácido sulfúrico. El ácido, una vez formado, reacciona con el carbonato de sodio o con el calcáreo como ya fue expuesto en los párrafos anteriores.

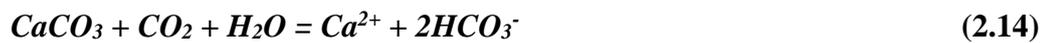
De todas las enmiendas de las que se hizo mención, el yeso es el compuesto de uso más común; aunque no posee una gran solubilidad, sí posee otras ventajas frente a las demás que lo hacen ser muchas veces el producto de utilización más práctica. El cloruro de calcio es bastante soluble y de acción remediadora rápida, pero es bastante caro, lo que limita su uso en grandes extensiones, lo mismo sucede con el sulfato de aluminio, sulfato de hierro y ácido sulfúrico. Para el caso del Perú, habría que agregar que el ácido sulfúrico es un producto de uso controlado. El azufre elemental, por su parte, requiere un pH idóneo, condiciones de buena aireación, contenido apropiado de humedad, temperaturas de suelo elevadas, y la presencia de microorganismos del tipo *Thiobacillus* sp.; todo esto al parecer haría del azufre una enmienda de reacción demasiado lenta.

- **Enmiendas orgánicas**

Las materias orgánicas aumentan la productividad de los suelos, mejoran la absorción de nutrientes por las plantas, proporcionan nutrientes a los microorganismos, mejoran la estructura, el aprovechamiento del agua, el coeficiente de infiltración, y en los suelos afectados por sales, contrarrestan los efectos nocivos del sodio y cloruro sobre el suelo y el cultivo (Hernández, 2000).

La adición de materias orgánicas al suelo, como por ejemplo compost y estiércoles, tiene numerosos efectos benéficos en la estructura del suelo a través de la formación de complejos arcillo-húmicos. De manera similar, las aplicaciones de yeso conllevan al mejoramiento de la agregación de los suelos alcalinos dispersados (Lal y Shukla, 2004). Los microorganismos del suelo utilizan los compuestos de carbono como fuente de energía, en dicho proceso, una gran parte del carbono

orgánico es transformado a CO<sub>2</sub> (Paul y Clark, 1989), al CO<sub>2</sub> liberado por descomposición de los compuestos carbonados o materia orgánica habría que añadir el CO<sub>2</sub> liberado por la respiración de las raíces, el incremento de la presión parcial de CO<sub>2</sub> origina que el CaCO<sub>3</sub> se desdoble en calcio soluble e ión bicarbonato (Bohn *et al.*, 1993):



Así, el Ca<sup>2+</sup> liberado a solución podría ahora efectuar el desplazamiento del Na<sup>+</sup> del complejo de cambio de los suelos sódicos.

Aunque muchos trabajos reconocen la importancia del uso de las materias orgánicas en el proceso de remediación de los suelos salinos y sódicos, sus mecanismos de acción no llegan a ser totalmente esclarecidos. Los efectos más notorios y de pronta aparición tras el uso de las materias orgánicas parecen ser siempre la mejora de la estructura y el aumento de la permeabilidad del suelo.

## **2.6. PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELOS**

### **2.6.1. Conductividad hidráulica**

El exceso de sodio, como se ha señalado en las secciones anteriores, puede significar el desmedro de las propiedades físicas del suelo, lo que se traduce en, por ejemplo: obturación de los poros del suelo, empeoramiento de la estructura, disminución de la tasa de infiltración, entre otras. Es lógico que los suelos así afectados posean entonces valores muy pequeños de conductividad hidráulica.

La conductividad hidráulica es la propiedad que describe la facilidad con la que los poros del suelo permiten el flujo del agua. Cuando el suelo se satura, todos los poros pueden dirigir el agua y la conductividad está en su máxima expresión, generalmente se representa como K<sub>s</sub>; en condiciones insaturadas la conductividad puede representarse como K<sub>q</sub>. En cualquier caso, esta propiedad depende del tamaño, número, orientación, y de la

distribución y continuidad de los poros, el tamaño de partículas del suelo y el tipo de fluido son otros factores que también deben considerarse (Gabriels *et al.*, 2006).

Los factores más importantes que influyen en la velocidad del flujo de agua en el suelo son los siguientes (Vásquez *et al.*, 2017):

- El gradiente hidráulico o fuerza motriz, que es igual a la diferencia de potencial del agua entre dos puntos del suelo, dividida por la distancia que separa a ambos puntos.
- El grado de facilidad con el que el suelo permite el flujo del agua (conductividad hidráulica)

Los procesos de transferencia de agua pueden ocurrir bajo condiciones saturadas y no saturadas. En este trabajo es de interés solo el del primer tipo.

- **Movimiento de agua en suelos saturados:**

En el año 1856 el investigador-ingeniero Francés Henry Philibert Gaspard Darcy estableció las leyes del movimiento del agua en los flujos saturados. Él encontró que la velocidad del movimiento del agua que fluye a través de una muestra de suelo de longitud  $L$ , puede ser expresada mediante la siguiente relación que ahora lleva su nombre (Vásquez *et al.*, 2017):

$$V = \frac{\Delta H \cdot K}{L} \quad (2.15)$$

Dónde:  $V$ : velocidad de flujo o de escurrimiento en  $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$  o  $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ;  $\Delta H$ : diferencia de presión hidráulica entre dos puntos considerados en  $\text{cm}$ ;  $L$ : distancia entre los puntos considerados expresada en  $\text{cm}$ ;  $K$ : Conductividad hidráulica o coeficiente de proporcionalidad de Darcy cuyas unidades pueden ser  $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$  o  $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . La relación  $\Delta H/L$  es conocida como gradiente hidráulico.

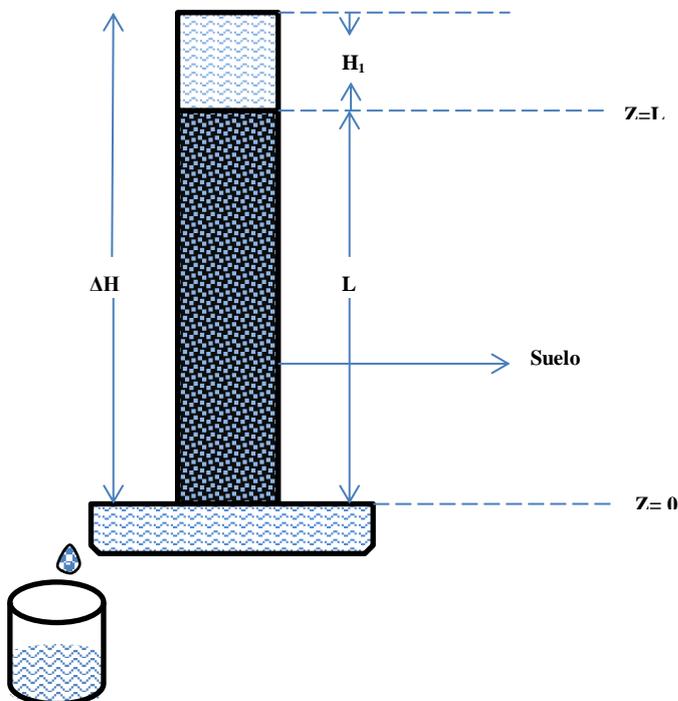
La ecuación 2.15 señala que la velocidad de flujo del agua en suelos saturados es directamente proporcional al gradiente hidráulico o fuerza motriz.

La forma de determinar  $\Delta H$  de la ecuación 2.15 es determinando la presión hidráulica tanto en el punto de entrada del agua como en el punto de salida ( $\Delta H = H_i - H_o$ ). El flujo saturado en una columna vertical de suelo es influenciado por la gravedad (potencial gravitatorio del agua  $H_g$ ) y por la presión de la columna de agua (potencial de presión  $H_p$ ). El potencial gravitatorio en algún punto es determinado por su altura en relación a un nivel de referencia, y la presión, es estimada por la altura de la columna de agua que reposa sobre dicho punto. Para encontrar  $\Delta H$  (Hillel, 1982):

$$H_i: H_{pi} + H_{gi} ; H_o: H_{po} + H_{go}$$

$$\Delta H = (H_{pi} + H_{gi}) - (H_{po} + H_{go})$$

En una columna vertical de suelo saturado con longitud  $L$ , en la que el nivel de referencia con respecto a la gravedad se elija en su base inferior ( $Z=0$ ), y en cuya base superior se ponga una carga constante de agua  $H_1$ , la diferencia de presión hidráulica será igual a la suma de la altura de la carga constante de agua más la longitud de la columna del suelo ( $H_1 + L$ ). La Figura N° 2 resume de una manera más didáctica lo acabado de exponer:



**Figura N° 2: Flujo vertical descendente en una columna vertical de suelo saturado**

Adaptado de: Hillel (1982)

La presión hidráulica en la base superior de la columna es  $H_1 + L$ ; la presión hidráulica en la base inferior de la columna es cero, lo último es debido a que el nivel de referencia se ha establecido justo en ese punto y a que el agua que drena a partir de ahí tiene una presión igual a la atmosférica (Forsyth, 1975). Por tanto, para la situación de la Figura N° 2, la diferencia de presión hidráulica ( $\Delta H$ ) entre el punto de entrada y de salida de agua es dada por:  $H_1 + L - 0$ . La conductividad hidráulica de cualquier suelo puede calcularse despejando el valor  $K$  de la ecuación de Darcy (2.15). Una clasificación de valores de conductividad hidráulica es dada por Vásquez *et al.* (2017).

**Cuadro N° 4: Valores de conductividad hidráulica (K) asociados al grado de permeabilidad de los suelos**

Permeabilidad	$K_s$ (cm/h)	Observaciones
No permeable	<0.0025	Suelo impermeable, difícil de humedecer.
Muy baja	0.0025-0.025	Suelos que difícilmente drenan. Las sales pueden acumularse en gran magnitud.
Baja	0.025-0.25	Suelos de baja aireación y con bajo desarrollo radicular.
Media	0.25-2.5	Suelos de excelentes condiciones para la retención de humedad y aireación
Alta	2.5-25	Suelos de textura ligeramente gruesa
Muy alta	$\geq 25$	Suelos de textura gruesa: arenas.

Un enfoque de clasificación de permeabilidad basado un poco más en la velocidad del flujo del agua es dado por la FAO:

**Cuadro N° 5: Clasificación de permeabilidades de suelo para la agricultura y la conservación**

Clasificación de permeabilidades de suelos	Rangos de permeabilidad	
	cm.hora <sup>-1</sup>	cm.día <sup>-1</sup>
Muy lento	Menos de 0.13	Menos de 3
Lento	0.13 – 0.3	3 – 12
Moderadamente lento	0.3 – 2.0	12 – 48
Moderado	2.0 – 6.3	48 – 151
Moderadamente rápido	6.3 – 12.7	151 – 305

Continuación...

Rápido	12.7 – 25	305 – 600
Muy rápido	Más de 25	Más de 600

\*Muestras de suelo saturadas con una carga constante de agua de 1.27 cm.

### 2.6.2. Velocidad de infiltración

En los suelos es importante conocer la velocidad o rapidez con que el agua ingresa, este fenómeno es comúnmente medido en términos de una profundidad de lámina de agua que ingresa en el suelo en un determinado tiempo.

En los suelos secos el agua infiltra rápidamente, conforme el aire del suelo va siendo reemplazado, la velocidad de infiltración disminuye hasta que finalmente alcanza un valor constante (velocidad de infiltración básica o final). La infiltración en los suelos dependerá principalmente de su textura y estructura. A continuación se muestra algunos valores de velocidad de infiltración final en los suelos según su clase textural otorgados por la FAO:

**Cuadro N° 6: Velocidad de infiltración final para algunos suelos según su clase textural**

Textura	Velocidad de infiltración final (mm h <sup>-1</sup> )
Arena	Menos de 30
Franco arenoso	20 – 30
Franco	10 – 20
Franco arcilloso	5 – 10
Arcilla	1 – 5

### III. MATERIALES Y METODOS

#### 3.1. UBICACIÓN

El presente trabajo de investigación fue realizado en el Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), el cual se encuentra a 12°4'58" Latitud Sur, 76°57' Longitud Oeste y una altitud de 244 m.s.n.m.

El promedio de temperaturas máximas y mínimas anuales es 24 y 16 °C respectivamente. La precipitación acumulada anual es 23 mm aproximadamente.

#### 3.2. CARACTERÍSTICAS DEL SUELO EXPERIMENTAL

El suelo experimental fue obtenido de un campo cultivado con caña de azúcar perteneciente a la empresa Agroindustrial Paramonga, dicho suelo está ubicado en la provincia de Barranca en localidad de Paramonga, región Lima. Las siguientes características fueron encontradas: conductividad eléctrica (CE)=42.50 dS m<sup>-1</sup>; porcentaje de sodio intercambiable (PSI) =15.76 %; pH en pasta de saturación=8.52; relación de adsorción de sodio (RAS) = 58.45; carbonatos solubles=0 meq L<sup>-1</sup>. El análisis físico-químico y la composición de iones en el extracto de pasta de saturación se muestran en el Cuadro N° 7 y Cuadro N° 8:

**Cuadro N° 7: Características fisicoquímicas del suelo experimental**

Característica	Unidad	Valor	Clasificación
Arena	%	65	--
Limo	%	16	--
Arcilla	%	19	--
Clase textural	--	--	Franco arenoso
Densidad aparente	g cm <sup>-3</sup>	1.3-1.4	Normal

Continuación...

pH <sub>(EPS)</sub>	---	8.59	Alcalino
CE <sub>(EPS)</sub>	dS m <sup>-1</sup>	42.50	Extremadamente salino
CaCO <sub>3</sub>	%	1.1	Bajo
Materia orgánica	%	1.06	Bajo
Fósforo disponible	mg kg <sup>-1</sup>	27.9	Alto
Potasio disponible	mg kg <sup>-1</sup>	1124	Alto
CIC	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	11.20	Baja
Ca <sup>2+</sup>	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	4.18	Bajo
Mg <sup>2+</sup>	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	3.85	Alto
K <sup>+</sup>	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	1.41	Alto
Na <sup>+</sup>	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	1.77	Alto
Al <sup>3+</sup> + H <sup>+</sup>	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	0.00	--
PSB	%	100.0	Elevado

FUENTE: LASPAF-UNALM (2016)

#### Cuadro N° 8: Análisis de Salinidad del suelo experimental

Característica	Unidad	Valor	Clasificación
Cationes solubles			
Ca <sup>2+</sup>	meq L <sup>-1</sup>	52	--
Mg <sup>+2</sup>	meq L <sup>-1</sup>	305	--
Na <sup>+</sup>	meq L <sup>-1</sup>	780.87	--
K <sup>+</sup>	meq L <sup>-1</sup>	56.79	--
Suma		1194.66	--
Aniones solubles			
Cl <sup>-</sup>	meq L <sup>-1</sup>	1110	--
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	meq L <sup>-1</sup>	45	--
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	meq L <sup>-1</sup>	32.69	--
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	meq L <sup>-1</sup>	3.92	--
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	meq L <sup>-1</sup>	0	--
Suma		1191.61	
Boro soluble	mg kg <sup>-1</sup>	15.54	Alto
Yeso soluble	%	0.06	Bajo
PSI	%	15.76	Alto
RAS	---	58.45	Alto

FUENTE: LASPAF-UNALM (2016)

### 3.3. CARACTERÍSTICAS DE LAS ENMIENDAS EMPLEADAS

#### 3.3.1. Suspensión de yeso agrícola

Suspensión concentrada de yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) con concentración de  $750 \text{ g L}^{-1}$ . Sus propiedades físicas y químicas se muestran a continuación:

**Cuadro N° 9: Propiedades físicas y químicas de la suspensión de yeso**

Estado físico:	Líquido
Concentración:	$750 \text{ g L}^{-1}$
Color:	Beige
Formulación:	Suspensión concentrada
Valor de pH directo:	8 – 10
Densidad:	$1.3 - 1.4 \text{ g mL}^{-1}$
Solubilidad en agua:	Dispersable y no soluble en agua

FUENTE: Aris Industrial S.A (2016)

#### 3.3.2. Cachaza de la caña azúcar

Producto orgánico de desecho de la industrialización de la caña de azúcar, material sólido usualmente de color marrón oscuro. Las características fisicoquímicas son dadas a continuación:

**Cuadro N° 10: Características físico-químicas de la cachaza utilizada**

Característica	Unidad	Cachaza
pH	--	7.01
CE	$\text{dS m}^{-1}$	1.45
Materia orgánica	%	58.45
N	%	0.29
$\text{P}_2\text{O}_5$	%	0.52
$\text{K}_2\text{O}$	%	0.39
CaO	%	3.72
MgO	%	1.06
Humedad	%	65.74
Na	%	0.06

FUENTE: LASPAF-UNALM (2016)

### 3.3.3. Vinaza de la caña de azúcar

Producto orgánico de desecho de la industrialización de la caña de azúcar, es un material líquido de color rojo muy oscuro con materia orgánica solubilizada y diluida. Las características fisicoquímicas son dadas a continuación:

**Cuadro N° 11: Características físico-químicas de la vinaza utilizada**

Característica	Unidad	Vinaza
pH	--	3.84
CE	dS m <sup>-1</sup>	35.30
Materia orgánica en solución	g L <sup>-1</sup>	65.42
Sólidos totales	g L <sup>-1</sup>	107.80
N	g L <sup>-1</sup>	1.204
P total	g L <sup>-1</sup>	0.065
K total	g L <sup>-1</sup>	8.9
Ca total	g L <sup>-1</sup>	1.47
Mg total	g L <sup>-1</sup>	0.730
Na total	g L <sup>-1</sup>	0.450

FUENTE: LASPAF-UNALM (2016)

## 3.4. MATERIALES

### 3.4.1. Fase de invernadero

- 35 macetas de plástico
- Papel toalla

### 3.4.2. Fase determinación de pruebas físicas

- Permeámetros de PVC
- Armazón metálico para soporte de permeámetros
- Pizetas
- Cronómetro
- Agua desionizada
- Vasos de plástico de 1L
- Cilindros de densidad aparente

- Vernier
- Martillo de goma
- Bandejas de aluminio
- Balanza de precisión
- Estufa

### **3.4.3. Fase determinación de pruebas químicas**

- Vasos de precipitado de 250 ml
- Espátula
- Bomba de vacío
- Conductivímetro y PH-metro
- Agua desionizada
- Refrigerador
- Varillas de agitación
- Agitador eléctrico
- Probetas de 100 ml
- Dilutor
- Matraces
- Pipeta automática
- Puntas de plástico para pipetas automáticas
- Bureta de 100 ml
- Bombilla para bureta
- Tubos de ensayo
- Gradillas para tubos de ensayo
- Guantes de nitrilo
- Fiolas de 100 ml
- Fiolas de 50 ml
- Fiola de 500 ml
- Fiola de 1 L
- Pipeta manual
- Bombilla para pipeta
- Vasos de precipitación de 250 ml

- Vaso de precipitación de litro
- Papel toalla
- Colorímetro

#### **3.4.4. Equipos eléctricos de laboratorio**

- Equipo de absorción atómica
- Espectrofotómetro

#### **3.4.5. Reactivos para las pruebas químicas**

- Nitrato de plata
- Cloruro de bario
- Anaranjado de metilo
- Cromato de potasio
- Fenolftaleína
- Cloruro de lantano
- Ácido sulfúrico
- Ácido clorhídrico
- Hidróxido de sodio
- Ácido salicílico

### **3.5. DESCRIPCIÓN DE LOS TRATAMIENTOS**

#### **3.5.1. Enmiendas**

Las enmiendas utilizadas en el presente trabajo fueron tres: cachaza y vinaza de la industria azucarera, y una suspensión concentrada de yeso. Las dosis de las enmiendas fueron establecidas para que en teoría se logre desplazar hasta 100 % y 200 % del sodio intercambiable.

#### **3.5.2. Tratamiento sin enmienda**

Adicionalmente fue establecido un tratamiento a manera de testigo sin la aplicación o uso de alguna enmienda.

Todos los tratamientos se resumen a continuación en el Cuadro N° 12:

**Cuadro N° 12: Tratamientos o factores en estudio**

<b>Tratamiento</b>	<b>Enmienda</b>	<b>Dosis aplicada</b>
T0	Testigo (Sin enmienda)	
T1 <sub>1</sub>	Yeso (CaSO <sub>4</sub> .H <sub>2</sub> O)	Desplazar el 100% del sodio intercambiable
T1 <sub>2</sub>	Yeso (CaSO <sub>4</sub> .H <sub>2</sub> O)	Desplazar el 200% del sodio intercambiable
T2 <sub>1</sub>	Cachaza	Desplazar el 100% del sodio intercambiable
T2 <sub>2</sub>	Cachaza	Desplazar el 200% del sodio intercambiable
T3 <sub>1</sub>	Vinaza	Desplazar el 100% del sodio intercambiable
T3 <sub>2</sub>	Vinaza	Desplazar el 200% del sodio intercambiable

### **3.6. METODOLOGÍA Y PROCEDIMIENTO**

#### **3.6.1. Colecta, preparación y muestreo de suelo**

La colecta de suelo fue llevada a cabo en un campo de aproximadamente 40 ha en las inmediaciones al mar, con coordenadas geográficas de: 10° 42' 08'' S 77° 48' 27'' W. Las evidencias típicas de los suelos afectados por salinidad fueron halladas: costras salinas, crecimiento desuniforme, plantas más pequeñas de lo normal, etc. Un muestreo compuesto de los primeros 10 centímetros de suelo del campo fue realizado, la muestra obtenida fue llevada a laboratorio para ser secada, molida y tamizada en malla de 2 mm de diámetro (10 mesh).

#### **3.6.2. Preparación de las macetas**

35 macetas con drenaje y con la base cubierta con papel toalla fueron seleccionadas para depositar en ellas tres kilogramos del suelo colectado.

#### **3.6.3. Aplicación de enmiendas**

El análisis físico-químico del suelo experimental mostrado en el Cuadro N° 7 señala 1.77 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> de sodio intercambiable en el complejo de cambio. Todos los cálculos para la determinación de dosis de enmiendas fueron hechos con la intención de desplazar el 100% y el 200% del sodio del complejo de cambio. Los resultados de los análisis físico-químicos

de las enmiendas involucradas han sido expuestos en los Cuadros 9,10 y 11. La suspensión de yeso posee una concentración de  $750\text{g.L}^{-1}$ , el contenido de calcio y magnesio expresados como óxidos en la cachaza es de 3.72% y 1.06%, y la vinaza posee  $2.2\text{ g L}^{-1}$  de calcio más magnesio; dichas cifras fueron utilizadas para los cálculos correspondientes. Las cantidades de enmiendas a utilizar para desplazar el 100% y el 200% del sodio intercambiable por kilogramo de suelo experimental se muestran a continuación el Cuadro N° 13:

**Cuadro N° 13: Dosis de enmiendas para desplazar el 100% y el 200% del sodio del complejo de cambio por kilogramo de suelo**

Enmienda	Dosis de 100 %	Dosis de 200 %
Suspensión concentrada de yeso	2.03 ml	4.06 ml
Cachaza	9.52 g	19.05 g
Vinaza	131.76 ml	263.52 ml

Todas las enmiendas fueron incorporadas juntamente con la instalación de los suelos en las macetas. La cachaza fue mezclada homogéneamente; la suspensión de yeso y la vinaza, por su carácter líquido, fueron vertidas sobre los suelos instalados por maceta.

Cada unidad experimental estuvo constituida por una maceta con tres kilogramos de suelo, a cada tratamiento, incluyendo al testigo, se le fue asignado cinco unidades experimentales o repeticiones. Las cantidades totales de enmienda por unidad experimental y el número de repeticiones por enmienda se muestran en el Cuadro N° 14:

**Cuadro N° 14: Enmiendas incorporadas por maceta con 3 Kg de suelo y número de repeticiones**

Enmienda	Dosis de 100 %	Número de repeticiones	Número de repeticiones	
			Dosis de 200%	repeticiones
Suspensión de yeso	6.09 ml	5	12.18 ml	5
Cachaza	28.56 g	5	57.15 g	5
Vinaza	395.29 ml	5	790.56 ml	5

#### 3.6.4. Incubación en húmedo

Luego de la instalación, con el fin de promover la reacción de las enmiendas en los suelos, las macetas fueron regadas convenientemente con agua desionizada con volúmenes entre trescientos y cuatrocientos mililitros cada dos días. Se buscó mantener el suelo siempre con contenidos de humedad cercanos a la capacidad de campo con aplicaciones de agua que no provocaran algún drenaje; eventualmente, los volúmenes de agua que en algunas ocasiones drenaron, fueron colectados en recipientes de plástico y nuevamente incorporados al suelo en el siguiente riego. La duración de este procedimiento fue de cuatro meses.

#### 3.6.5. Determinación de densidad aparente

Finalizados los cuatro meses de mantención de humedad del suelo, cilindros de 5.3 cm de diámetro y 4.8 cm de altura fueron empleados para la estimación de densidades aparentes de las unidades experimentales. Los resultados fueron utilizados, primero, como parámetro complementario de evaluación de la permeabilidad, segundo, como un parámetro indicador de los cambios en la estructura del suelo tras la aplicación de enmiendas.

#### 3.6.6. Pruebas de conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ )

Permeámetros de policloruro de vinilo (PVC) de área transversal circular interna de 21.24 centímetros cuadrados con mallas de metal ( $> 2\text{mm}$ ) anexados a la parte inferior fueron contruidos, en ellos, utilizando los mismos cilindros de las pruebas de densidad aparente, columnas de suelo fueron depositadas para encontrar los valores de  $K_s$ . El método empleado fue el del flujo vertical descendente de agua en un suelo saturado con carga hidráulica constante. El nivel de referencia fue elegido en la base inferior de los permeámetros, por tanto, fue posible utilizar la versión de la ley de Darcy (2.15) empleada por Gabriels *et al.* (2006), que es de un uso más práctico y rápido:

$$K_s = \frac{V}{A \cdot \Delta t \left[ \frac{h+L}{L} \right]} \quad (3.1)$$

Dónde:  $K_s$ : conductividad hidráulica saturada (cm/h);  $V$ =volumen de agua recogida (cm<sup>3</sup>);  $h$ = carga de agua que se mantiene constante por encima del nivel superior de la columna de suelo (cm);  $L$ =altura de la columna de suelo (cm);  $\Delta t$ =tiempo transcurrido en coleccionar 100 cm<sup>3</sup> (horas);  $A$ =área de la sección circular horizontal de la columna de suelo (cm<sup>2</sup>).

Columnas de veinte centímetros de suelo fueron depositadas dentro de los permeámetros de PVC y luego saturadas por capilaridad durante cuarenta y ocho horas. Sobre las columnas de suelo saturado, cargas constantes de columna de agua de trece centímetros de altura fueron colocadas; la altura de las columnas de agua fue siempre mantenida constante mediante el uso de una pizeta. Con el fin de establecer un valor constante de caudal, durante diez minutos se dejó al agua fluir libremente a través de los permeámetros antes de activar los cronómetros que reportaron el tiempo acumulado que fue necesario para coleccionar cien centímetros cúbicos de agua.

Antes de la ejecución de las pruebas oficiales de conductividad hidráulica ( $K_s$ ), dos pruebas de calibración fueron realizadas en una arena fina y en un suelo franco arenoso tipo *Ustic Torrifuvents* perteneciente a los campos agrícolas del Taller de Conservación del Suelo de la Universidad Nacional Agraria La Molina. Los valores de  $K_s$  encontrados se exponen a continuación, los resultados fueron clasificados conforme al enfoque propuesto por la FAO en el Cuadro N° 5.

**Cuadro N° 15: Determinación de  $K_s$  en una arena fina y en un suelo franco arenoso-*Ustic Torrifuvents***

Tipo de suelo	Valor de $K$ en $\text{cm.h}^{-1}$	Velocidad del flujo del agua
Arena Fina	28.3	Muy rápido
Franco Arenoso- <i>Ustic Torrifuvents</i>	4.63	Moderado

Los resultados del Cuadro N° 15 parecieron ser coherentes con la clase textural, por tanto otorgaron un respaldo a la utilidad del método.

### 3.6.7. Lavado de los suelos

El lavado de los suelos se hizo con agua desionizada. El volumen de agua utilizado fue el equivalente a tres veces el volumen de la porosidad del suelo contenido en los permeámetros. Todo el volumen de agua de drenaje que se obtuvo producto del lavado fue coleccionado e inmediatamente puesto a refrigeración para su posterior análisis.

### 3.6.8. Determinación de conductividad eléctrica y pH en los suelos lavados

El pH fue determinado en condiciones de pasta de saturación. La conductividad eléctrica (CE) fue determinada en el extracto de pasta de saturación (eps).

### 3.6.9. Análisis de iones solubles en el extracto de pasta de saturación de los suelos lavados y agua de drenaje

Todos los procedimientos que aquí se describen fueron tomados del Manual para el Análisis Químico escrito por Bazán (1996).

- **Determinación de cloruros**

Se determinó por titulación con nitrato de plata. El ion cloruro es precipitado con plata en presencia del indicador cromato de potasio.

**Procedimiento:**

Una alícuota de 1 ml del extracto fue depositada en un matraz de 125 ml, se agregaron tres gotas de cromato de potasio al 5 %. Finalmente se procedió a titular con una solución de nitrato de plata 0.01 N. hasta el viraje a un color rojo ladrillo.

El cálculo final de los miliequivalentes de cloruro fue obtenido mediante la siguiente relación:

$$Cl^{-} \text{ en meq. } L^{-1} = \frac{A \times \text{Normalidad del } AgNO_3 \times 1000}{\text{ml. de alicuota}}$$

Dónde: A es igual a los mililitros de nitrato de plata utilizados en la titulación.

- **Determinación de azufre**

Al ser los suelos de naturaleza salino-sódica, se asumió que todo el azufre presente se encontraba en forma de sulfatos. El método empleado fue el de medición de la absorbancia en un medio con presencia de sulfato de bario precipitado.

### **Procedimiento**

Se colocaron 2.5 ml del extracto de pasta en un tubo de ensayo y se agregaron 17.5 ml de agua, luego 5 ml de cloruro de bario y algunos cristales de la misma sal fueron adicionados. La mezcla fue agitada y su absorbancia leída en el espectrofotómetro a 420 nm.

Los extractos de suelos tratados con vinaza fueron sometidos a centrifugación durante 10 minutos con 15 g de carbón activado para eliminar la turbidez, color y materia orgánica propios de dichos extractos.

Para el cálculo de los niveles de sulfato, una ecuación de primer grado que relacione concentraciones conocidas de azufre y niveles de absorbancia en nanómetros fue elaborada. Las concentraciones, relación lineal y la ecuación pueden verse en el Anexo N° 16.

- **Determinación de nitratos**

El método empleado fue el de colorimetría, el principio del método está basado en la reacción que ocurre entre compuestos aromáticos y el nitrato.

### **Procedimiento**

Se colocaron 0.5 ml del extracto de pasta en un tubo de ensayo, luego 1 ml de una mezcla de 5 g de ácido salicílico con 95 ml de ácido sulfúrico fueron agregados. Se agitó y dejó reposar por media hora. Posteriormente, 10 ml de hidróxido de sodio 4 N fueron añadidos y nuevamente se agitó y se dejó reposar por otra media hora. Finalmente la absorbancia de la muestra fue leída en el espectrofotómetro a 410 nm.

Del mismo modo con que se procedió para el azufre, para la determinación de nitratos también se procuró encontrar una relación lineal entre concentraciones conocidas en ppm y absorbancia en nm; las concentraciones, relación lineal y la ecuación pueden verse en el Anexo 17.

- **Determinación de bicarbonatos**

El método utilizado fue el de titulación con ácido clorhídrico, el indicador anaranjado de metilo señala el fin de la neutralización de los bicarbonatos.

**Procedimiento**

Se colocó 2.5 ml de alícuota del extracto de pasta en un matraz y se le añadieron 3 gotas del indicador anaranjado de metilo. Finalmente se tituló la mezcla con ácido clorhídrico 0.01 N hasta el viraje del indicador hasta color amarillo.

El cálculo final de bicarbonatos fue estimado a partir de la siguiente relación:

$$HCO_3^- \text{ en meq. l}^{-1} = \frac{A \times \text{Normalidad del HCl} \times 1000}{\text{ml de alícuota}}$$

Donde A es el gasto de ácido clorhídrico (ml) utilizado en la titulación.

- **Determinación de los carbonatos**

El método empleado para la determinación fue el mismo que el de los bicarbonatos, con la diferencia de que en este caso, el indicador añadido fue fenolftaleína.

**Procedimiento**

Se colocaron 2.5 ml del extracto de pasta en un matraz, luego 3 gotas del indicador fenolftaleína fueron añadidos. Finalmente se procedió a titular con ácido clorhídrico 0.01 N hasta la desaparición del color rojo grosella.

El cálculo final de carbonatos fue estimado a partir de la siguiente relación:

$$HCO_3^- \text{ en meq. l}^{-1} = \frac{A \times \text{Normalidad del HCl} \times 1000}{\text{ml de alícuota}}$$

Donde A el gasto de ácido clorhídrico (ml) utilizado en la titulación.

- **Determinación de cationes solubles**

Para todos los cationes, el método empleado fue el de espectroscopia de absorción atómica utilizando alícuotas de los extractos y diluyéndolas con cloruro de lantano al 1%.

### **3.7. ANÁLISIS ESTADÍSTICO**

#### **3.7.1. Factores del diseño experimental**

Enmiendas químicas y orgánicas remediadoras de suelos salinos sódicos y dosis de enmiendas.

#### **3.7.2. Tratamientos o niveles de los factores del diseño experimental**

- a. Suspensión de yeso agrícola para desplazar el 100% del sodio del complejo de cambio.
- b. Sulfato de yeso agrícola para desplazar el 200% del sodio del complejo de cambio.
- c. Cachaza para desplazar el 100% del sodio del complejo de cambio.
- d. Cachaza para desplazar el 200% del sodio del complejo de cambio.
- e. Vinaza para desplazar el 100% del sodio del complejo de cambio.
- f. Vinaza para desplazar el 200% del sodio del complejo de cambio.
- g. Tratamiento testigo con agua desionizada.

#### **3.7.3. Unidad experimental**

Una maceta con 3 kg de suelo del tipo salino sódico.

#### **3.7.4. Replicas por tratamiento: Cinco**

#### **3.7.5. Variables respuesta**

- a. Conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ )
- b. Densidad aparente
- c. RAS del extracto de pasta de saturación
- d. Conductividad eléctrica del extracto de pasta de saturación y agua de drenaje.

- e. Cloruros en el extracto de pasta de saturación y agua de drenaje.
- f. Sulfatos en el extracto de pasta de saturación y agua de drenaje.
- g. Nitratos en el extracto de pasta de saturación y agua de drenaje.
- h. Bicarbonatos en el extracto de pasta de saturación y agua de drenaje.
- i. Carbonatos en el extracto de pasta de saturación y agua de drenaje.
- j. Calcio en el extracto de pasta de saturación y agua de drenaje.
- k. Magnesio en el extracto de pasta de saturación y agua de drenaje.
- l. Sodio en el extracto de pasta de saturación y agua de drenaje.
- m. Potasio en el extracto de pasta de saturación y agua de drenaje.

### 3.7.6. Tratamiento estadístico

Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis de variancia (ANVA) utilizando un diseño completamente al azar (DCA) con arreglo factorial de tres enmiendas (cachaza, vinaza y yeso agrícola) por dos dosis equivalentes (desplazar 100 y 200 % del sodio intercambiable) más un tratamiento testigo adicional; el nivel de significación fue de 0.05. Las diferencias significativas fueron encontradas a través de la prueba de comparación de medias HSD Tukey. El cumplimiento de los supuestos de distribución normal de errores y de homogeneidad de varianzas fue respectivamente verificado a través de los p-valores de las pruebas de Anderson Darling y de Levene. Las variables respuesta que originalmente no cumplieron los requisitos para el ANVA, fueron transformadas mediante el empleo de algunas de las ecuaciones de la familia de transformaciones BOX-COX.

El modelo aditivo lineal fue el siguiente:

$$Y(ijk) = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk}$$

$Y(ijk)$  = Valor k-ésimo observado de la unidad experimental j-ésima a lo cual se aplicó el i-ésimo tratamiento (respuesta).

$\mu$  = Efecto de la media general.

$\tau_i$  = Efecto del i-ésimo nivel del factor enmienda.

$\beta_j$  = Efecto del j-ésimo nivel del factor dosis.

$(\tau\beta)_{ij}$  = Efecto de la interacción entre el factor enmienda y el factor dosis.

$\epsilon_{ijk}$  = Efecto del error experimental.

La distribución de grados de libertad, suma de cuadrados y cuadrado medio para cada fuente de variación se muestra a continuación:

**Cuadro N° 16: Distribución de grados de libertad, suma de cuadrados y cuadrado medio por fuente de variación (ANVA)**

<b>Fuente de variación</b>	<b>Grados de libertad (G.L)</b>	<b>Suma de cuadrados (S.C)</b>	<b>Cuadrado medio (C.M)</b>
Enmienda (E)	$E-1 = 3$	S.C. A	C.M A
Dosis (D)	$D-1 = 1$	S.C.B	C.M B
Interacción	$(E-1)(D-1) = 3$	S.C.A.B	C.M. A.B
Error	$ED(R - 1) = 32$	S.C. error	C.M error
Totales	$EDR - 1 = 39$	S.C. total	-----

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. RESULTADOS

#### 4.1.1. Distribución normal de errores y homogeneidad de varianzas

El Cuadro N° 17 resume los p-valores de las pruebas de Anderson-Darling y de Levene para algunas de las variables respuesta:

El nivel de significancia elegido fue de 0.05; por tanto, p-valores mayores a dicha a cifra significaron el cumplimiento de los requisitos para el ANVA.

**Cuadro N° 17: P-valores de las pruebas de Anderson-Darling y de Levene para algunas de las variables respuesta**

Variable respuesta	Prueba de normalidad de errores	Prueba de homogeneidad de varianzas
	p-valor (Anderson Darling)	p-valor (Levene)
Densidad aparente	0.857	0.784
Conductividad hidráulica	0.082	0.517
Conductividad eléctrica (extracto de pasta de saturación)	0.059	0.728
RAS (extracto de pasta de saturación)	0.875	0.501
Cloruros en el extracto de pasta de saturación	0.276	0.082
Sulfatos en el extracto de pasta de saturación	0.118	0.099
Calcio en el extracto de pasta de saturación	0.349	0.640
Magnesio en el extracto de pasta de saturación	0.056	0.417
Sodio en el extracto de pasta de saturación	0.585	0.568
Potasio en el extracto de pasta de saturación	0.057	0.661
Conductividad eléctrica (agua de drenaje)	0.494	0.078
RAS (agua de drenaje)	0.370	0.159
Cloruros en el agua de drenaje	0.554	0.529
Sulfatos en el agua de drenaje	0.299	0.509
Potasio en el agua de drenaje	0.212	0.952

#### 4.1.2. Densidad aparente

El análisis de varianza encontró que solamente el efecto principal tipo de enmienda resultó ser altamente significativo (p-valor de 0.003). Con excepción de la vinaza, todos los tratamientos presentaron valores muy similares entre sí. La vinaza reportó el menor valor de la media ( $1.27 \text{ g.cm}^{-3}$ ).

El efecto de la aplicación de las enmiendas ensayadas y de las dos dosis, se resume en el Cuadro N° 18:

**Cuadro N° 18: Efecto del tipo de enmienda y de las dos dosis sobre la densidad aparente**

Tratamiento	Densidad aparente ( $\text{g cm}^{-3}$ )
<b>Enmienda</b>	
Cachaza	1.37 a
Yeso	1.37 a
Testigo	1.35 a
Vinaza	1.27 b
<b>Dosis</b>	
100%	1.34 a
200%	1.35 a
<b>ANVA</b>	<b>p-valor</b>
<b>Enmienda</b>	0.003
<b>Dosis</b>	0.703
<b>Enmienda x Dosis</b>	0.931
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	4.6

Valores dentro de una columna seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes ( $P > 0.05$ ) de acuerdo a la prueba de comparación de medias de Tukey.

#### 4.1.3. Conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ )

El análisis de varianza encontró que el efecto principal tipo de enmienda (p-valor  $< 0.001$ ) y la interacción enmienda-dosis (p-valor de 0.007) resultaron ser altamente significativos. El tratamiento cachaza reportó el valor de  $K_s$  más elevado ( $2.46 \text{ cm hora}^{-1}$ ) seguido por el testigo ( $1.92 \text{ cm hora}^{-1}$ ). La media de la interacción cachaza-dosis 200% superó significativamente a las demás ( $3.12 \text{ cm.hora}^{-1}$ ).

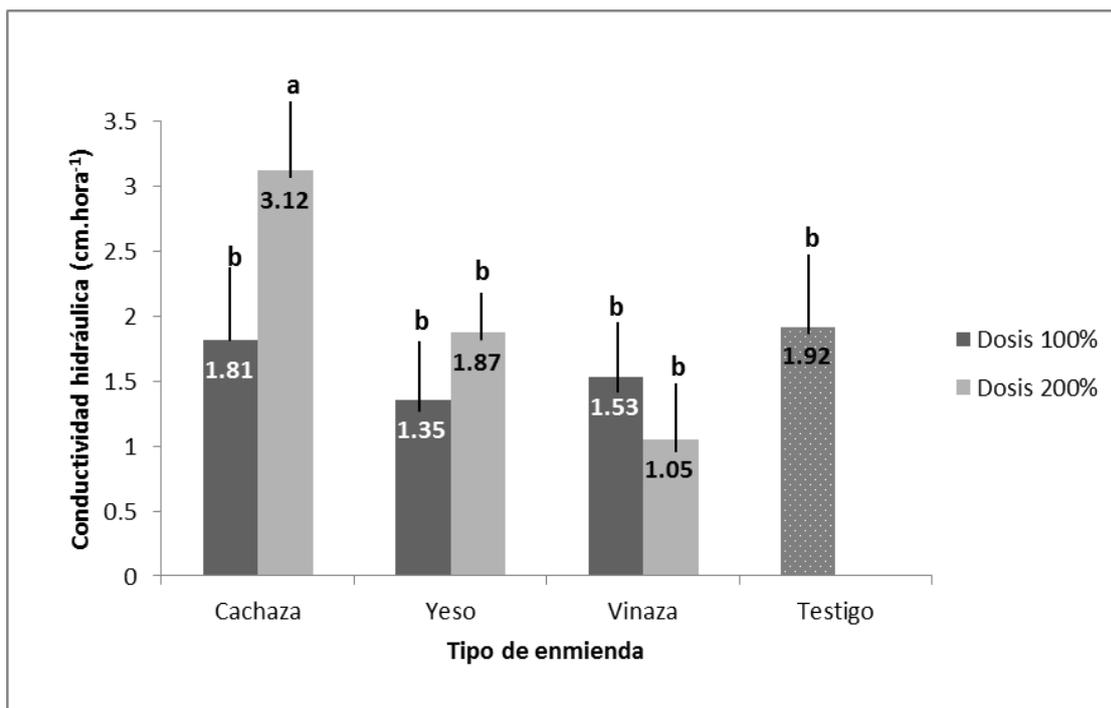
El efecto de la aplicación de las enmiendas ensayadas y de las dos dosis, se resume en el Cuadro N° 19:

**Cuadro N° 19: Efecto del tipo de enmienda y de las dos dosis sobre la conductividad hidráulica**

<b>Tratamiento</b>	<b>Conductividad hidráulica (cm hora<sup>-1</sup>)</b>
<b>Enmienda</b>	
Cachaza	2.46 a
Testigo	1.92 ab
Yeso	1.61 b
Vinaza	1.29 b
<b>Dosis</b>	
100%	1.65 a
200%	1.99 a
<b>ANVA</b>	<b>p-valor</b>
<b>Enmienda</b>	< 0.001
<b>Dosis</b>	0.064
<b>Enmienda × Dosis</b>	0.007
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	30.26

Valores dentro de una columna seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes ( $P > 0.05$ ) de acuerdo a la prueba de comparación de medias de Tukey.

El efecto de la aplicación de las enmiendas ensayadas y de sus dosis respectivas, se muestra en la Figura N° 3:



**Figura N° 3: Efecto de tres enmiendas (cachaza, vinaza, yeso) aplicadas a dos dosis sobre la conductividad hidráulica del suelo experimental.**

#### **4.1.4. Conductividad eléctrica en el extracto de saturación ( $CE_{(eps)}$ )**

El análisis de varianza encontró que el factor principal tipo de enmienda tuvo un efecto altamente significativo ( $p$ -valor  $<0.001$ ). Los factores principales dosis e interacción resultaron no significativos. La enmienda tipo cachaza reportó el valor de la media más elevado ( $16.45 \text{ dS m}^{-1}$ ).

#### **4.1.5. Relación de adsorción de sodio en el extracto de saturación ( $RAS_{(eps)}$ )**

El análisis de varianza encontró que solamente el efecto principal tipo de enmienda fue altamente significativo sobre  $RAS_{(eps)}$  ( $p$ -valor  $<0.001$ ), siendo la enmienda tipo cachaza la que se asoció al valor más alto (30.28).

El efecto de la aplicación de las enmiendas ensayadas y de las dos dosis sobre los valores finales de  $CE_{(es)}$  y  $RAS_{(es)}$ , se resume en el Cuadro N° 20:

**Cuadro N° 20: Efecto del tipo de enmienda y de las dos dosis sobre CE(es) y RAS(es)**

<b>Tratamiento</b>	<b>CEes (dS m<sup>-1</sup>)</b>	<b>RAS<sub>es</sub></b>
<b>Enmienda</b>		
Cachaza	16.45 a	30.28 a
Testigo	9.03 b	9.32 b
Vinaza	9.49 b	7.40 b
Yeso	8.98 b	9.21 b
<b>Dosis</b>		
100%	10.94 a	13.09 a
200%	10.65 a	12.52 a
<b>ANVA</b>	<b>p-valor</b>	<b>p-valor</b>
<b>Enmienda</b>	< 0.001	< 0.001
<b>Dosis</b>	0.640	0.449
<b>Enmienda X Dosis</b>	0.618	0.276
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	8.98	9.16

Valores dentro de una columna seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes ( $P > 0.05$ ) de acuerdo a la prueba de comparación de medias de Tukey.

#### **4.1.6. Cloruro en el extracto de saturación**

El análisis de varianza encontró que solamente el efecto principal tipo de enmienda fue altamente significativo ( $p$ -valor  $< 0.001$ ). En la prueba de comparación de medias de Tukey, el tratamiento con cachaza estuvo asociado a las mayores concentraciones (190.5 meq L<sup>-1</sup>).

#### **4.1.7. Sulfato en el extracto de saturación**

El análisis de varianza encontró que el efecto principal tipo de enmienda tuvo un efecto altamente significativo ( $p$ -valor  $< 0.001$ ). Los factores principales dosis de enmienda e interacción resultaron no significativos. En el análisis de comparación de medias de la prueba Tukey, todos los tratamientos reportaron medias significativamente diferentes entre sí.

El efecto de la aplicación de las enmiendas ensayadas y de las dos dosis sobre las concentraciones finales de cloruro y sulfato, se resume en el Cuadro N° 21:

**Cuadro N° 21: Efecto del tipo de enmienda y de las dos dosis sobre las concentraciones finales de cloruro y sulfato en el extracto de saturación**

Tratamiento	Cloruro	Sulfato
	----- meq L <sup>-1</sup> -----	
<b>Enmienda</b>		
Cachaza	190.50 a	50.82 b
Testigo	48.60 b	55.61 a
Vinaza	40.75 b	32.40 d
Yeso	47.35 b	43.97 c
<b>Dosis</b>		
100%	82.85 a	46.72 a
200%	80.75 a	44.68 a
<b>ANVA</b>		
	<b>p-valor</b>	
<b>Enmienda</b>	<0.001	<0.001
<b>Dosis</b>	0.688	0.101
<b>Enmienda X Dosis</b>	0.985	0.163
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	20.03	8.35

Valores dentro de una columna seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes ( $P > 0.05$ ) de acuerdo a la prueba de comparación de medias de Tukey.

#### **4.1.8. Nitrate, bicarbonate and carbonate in the saturation extract**

The concentration of nitrate for all treatments was lower than 1 meq L<sup>-1</sup>; on the other hand, the concentrations of bicarbonate were very similar and the carbonates were not present.

The concentrations of nitrate and bicarbonate according to the type of amendment, is presented in the Cuadro N° 22:

**Cuadro N° 22: Concentración de nitrato y bicarbonato según el tipo de enmienda en el extracto de saturación**

Tratamiento	Nitrato	Bicarbonato
	----- (meq L <sup>-1</sup> ) -----	
Enmienda		
Cachaza	0.55	5.50
Testigo	0.64	4.18
Vinaza	0.97	4.42
Yeso	0.77	4.35

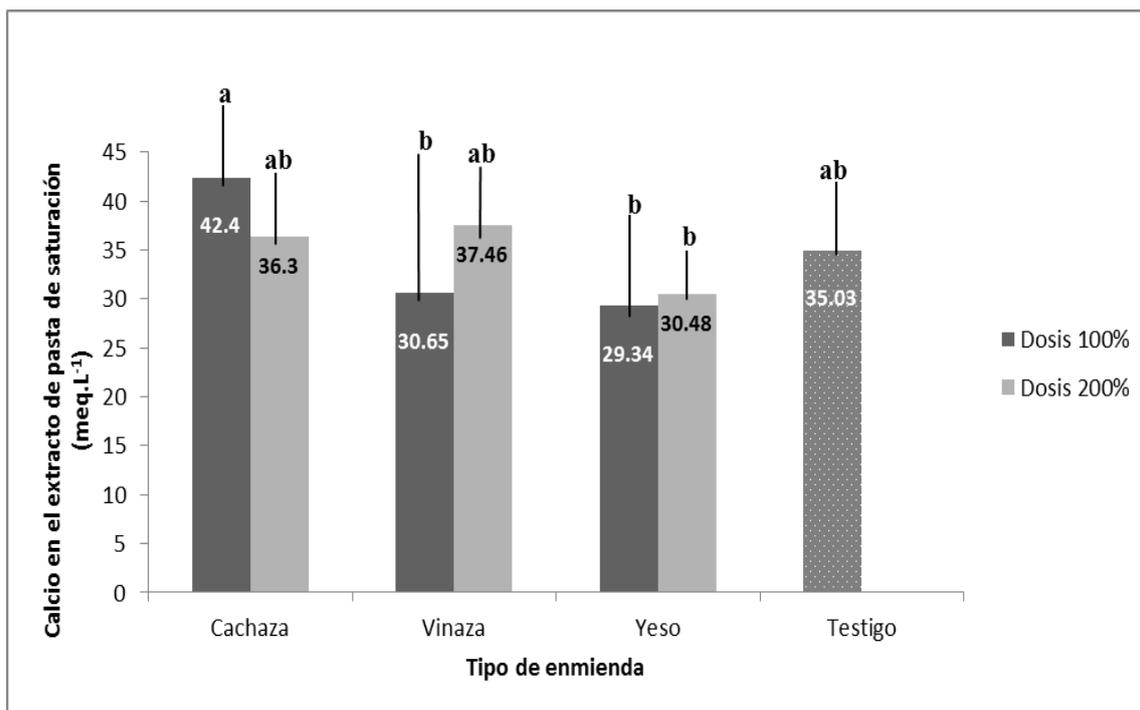
**4.1.9. Potasio en el extracto de saturación**

El análisis de varianza encontró que el efecto principal tipo enmienda fue altamente significativo (p-valor <0.001); según la prueba de comparación de medias de Tukey que se muestra en el Cuadro N° 23, el tratamiento con vinaza estuvo asociado a la concentración final más alta (11.77 meq L<sup>-1</sup>), seguido del tratamiento con cachaza (7.26 meq L<sup>-1</sup>); ambas medias resultaron significativamente diferentes a los demás.

**4.1.10. Calcio en el extracto de saturación**

El análisis de varianza encontró efectos altamente significativos para el factor principal tipo de enmienda (p-valor <0.001); también la interacción enmienda-dosis resultó significativa (p-valor de 0.013). Las mayores concentraciones fueron reportadas para la enmienda tipo cachaza (39.35 meq L<sup>-1</sup>) seguido del testigo (35.03 meq L<sup>-1</sup>). La interacción cachaza 100% y vinaza 200% reportaron las mayores concentraciones con 42.40 y 37.46 meq L<sup>-1</sup> respectivamente.

El efecto de la aplicación de las enmiendas ensayadas y de sus dosis respectivas sobre las concentraciones finales de calcio, se resumen en la Figura N° 4 :



**Figura N° 4: Efecto de tres enmiendas (cachaza, vinaza y yeso) aplicadas a dos dosis sobre la concentración final de calcio en el extracto de saturación**

#### 4.1.11. Magnesio en el extracto de saturación

El análisis de varianza encontró efectos altamente significativos para el factor principal tipo de enmienda ( $p$ -valor  $<0.001$ ). La interacción y el factor principal dosis resultaron ser no significativos. La prueba Tukey de comparación de medias señaló a la cachaza como el tratamiento asociado a las mayores concentraciones ( $36.2 \text{ meq L}^{-1}$ ), seguido por la vinaza ( $25.55 \text{ meq L}^{-1}$ ).

#### 4.1.12. Sodio en el extracto de pasta de saturación

El análisis de varianza encontró que solamente el efecto principal tipo de enmienda fue altamente significativo ( $p$ -valor  $<0.001$ ). La prueba de comparación de medias de Tukey señaló a la cachaza como el tratamiento con la mayor concentración ( $186.01 \text{ meq L}^{-1}$ ), siendo este significativamente diferente a todos los demás.

El efecto de la aplicación de las enmiendas ensayadas y de las dos dosis sobre las concentraciones finales de potasio, calcio, magnesio y sodio, se resumen en el Cuadro N° 23:

**Cuadro N° 23: Efecto del tipo de enmienda y de las dos dosis sobre las concentraciones finales de potasio, calcio, magnesio y sodio en el extracto de saturación**

<b>Tratamiento</b>	<b>Potasio</b>	<b>Calcio</b>	<b>Magnesio</b>	<b>Sodio</b>
	----- (meq L <sup>-1</sup> ) -----			
<b>Enmienda</b>				
Cachaza	7.26 b	39.35 a	36.2 a	186.01 a
Testigo	5.32 c	35.03 ab	18.21 c	48.03 b
Vinaza	11.77 a	34.06 bc	25.55 b	40.24 b
Yeso	5.49 c	29.91 c	23.83 b	47.84 b
<b>Dosis</b>				
100%	7.25 a	34.36 a	25.78 a	73.05 a
200%	7.26 a	34.82 a	26.11 a	70.02 a
<b>ANVA</b>				
	<b>p-valor</b>			
<b>Enmienda</b>	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
<b>Dosis</b>	0.981	0.723	0.769	0.517
<b>Enmienda X Dosis</b>	0.092	0.013	0.95	0.577
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	8.85	11.84	13.47	10.19

Valores dentro de una columna seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes ( $P > 0.05$ ) de acuerdo a la prueba de comparación de medias de Tukey.

#### **4.1.13. Conductividad eléctrica del agua de drenaje ( $CE_{ad}$ )**

El análisis de varianza encontró que solo el factor principal tipo de enmienda resultó ser altamente significativo ( $p$ -valor  $< 0.001$ ). La prueba de Tukey de comparación de medias asignó al tratamiento con vinaza el valor más elevado ( $42.81 \text{ dS m}^{-1}$ ), el valor más bajo estuvo asociado al tratamiento con cachaza ( $37.7 \text{ dS m}^{-1}$ ).

#### **4.1.14. Relación de adsorción de sodio en el agua de drenaje ( $RAS_{ad}$ )**

El análisis de varianza encontró que solo el factor principal tipo de enmienda fue significativo ( $p$ -valor de  $0.045$ ). La prueba de comparación de medias de Tukey asignó un valor ligeramente mayor al tratamiento con yeso ( $50.89$ ).

El efecto de la aplicación de las enmiendas ensayadas y de las dos dosis sobre los valores de  $CE_{ad}$  y  $RAS_{ad}$ , se resume en el Cuadro N° 24:

**Cuadro N° 24: Efecto del tipo de enmienda y de las dos dosis sobre CE<sub>(ad)</sub> y RAS<sub>(ad)</sub>**

Tratamiento	CE <sub>ad</sub> (dS m <sup>-1</sup> )	RAS <sub>ad</sub>
<b>Enmienda</b>		
Cachaza	37.70 b	50.09 ab
Testigo	38.34 b	46.08 b
Vinaza	42.81 a	48.14 ab
Yeso	41.36 a	50.89 a
<b>Dosis</b>		
100%	39.93 a	48.87 a
200%	40.39 a	48.73 a
<b>ANVA</b>	<b>p-valor</b>	<b>p-valor</b>
<b>Enmienda</b>	<0.001	0.045
<b>Dosis</b>	0.534	0.917
<b>Enmienda X Dosis</b>	0.839	0.707
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	17.15	8.05

Valores dentro de una columna seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes ( $P > 0.05$ ) de acuerdo a la prueba de comparación de medias de Tukey.

#### 4.1.15. Potasio en el agua de drenaje

El análisis de varianza encontró efectos altamente significativos para todos los factores principales. Según la prueba de Tukey, la concentración más alta estuvo asociada al tratamiento con vinaza (62.81 meq L<sup>-1</sup>), seguido del yeso (17.78 meq L<sup>-1</sup>); la menor pérdida de potasio fue encontrada en el tratamiento con cachaza (13.56 meq L<sup>-1</sup>). Con respecto al factor principal dosis, conforme fue utilizada una mayor cantidad de enmienda, las pérdidas de potasio también fueron mayores. El análisis de medias para la interacción enmienda-dosis asignó al tratamiento vinaza 200% la mayor concentración (76.08 meq L<sup>-1</sup>), seguido del tratamiento vinaza 100% (50.80 meq L<sup>-1</sup>).

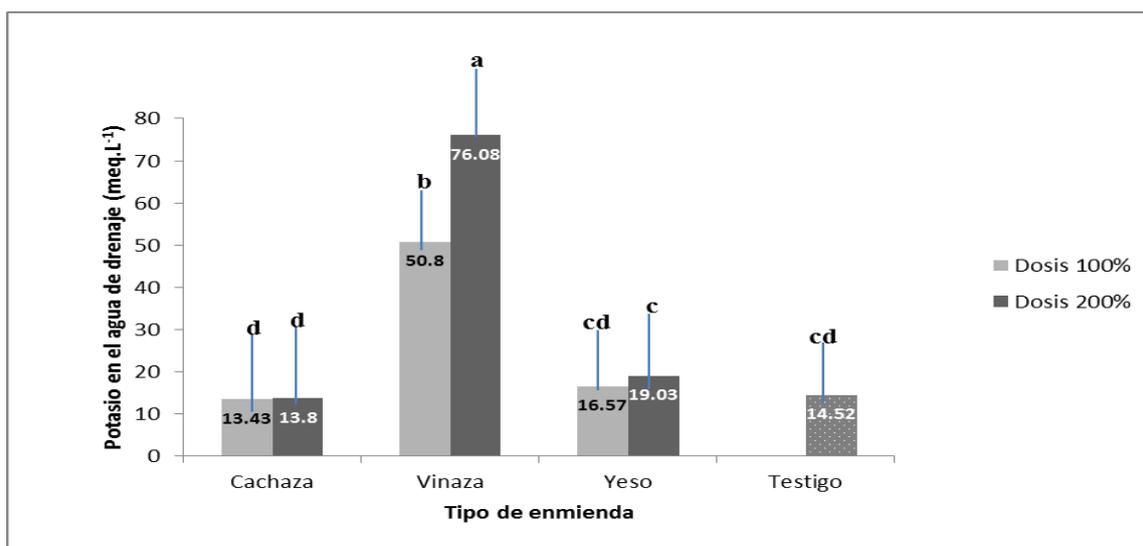
El efecto de la aplicación de las enmiendas ensayadas y de las dos dosis, se resume en el Cuadro N° 25:

**Cuadro N° 25: Efecto del tipo de enmienda y de las dos dosis sobre la concentración de potasio en el agua de drenaje**

Tratamiento	Potasio (meq L <sup>-1</sup> )
<b>Enmienda</b>	
Vinaza	62.81 a
Yeso	17.78 b
Testigo	14.52 c
Cachaza	13.56 c
<b>Dosis</b>	
100%	21.78 a
200%	26.52 b
<b>ANVA</b>	
<b>Enmienda</b>	<b>p-valor</b>
<b>Dosis</b>	<0.001
<b>Enmienda X Dosis</b>	<0.001
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	5.62

Valores dentro de una columna seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes ( $P > 0.05$ ) de acuerdo a la prueba de comparación de medias de Tukey.

El efecto de la aplicación de las enmiendas ensayadas y de sus dosis respectivas sobre la concentración de potasio en el agua de drenaje, se resume en la Figura N° 5:

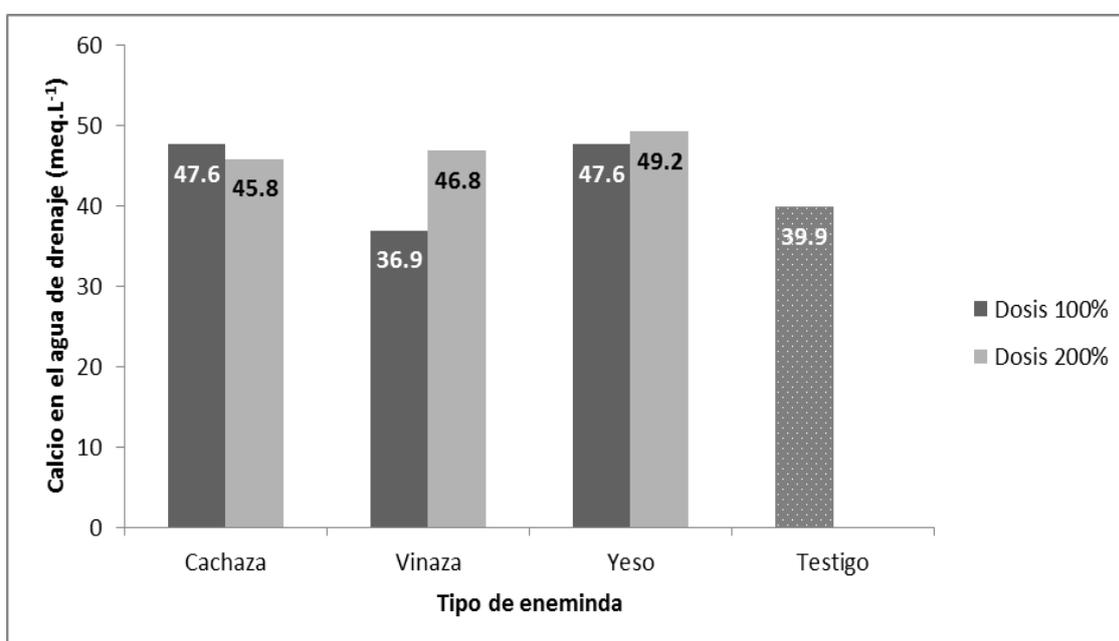


**Figura N° 5: Efecto de tres enmiendas (cachaza, vinaza y yeso) aplicadas a dos dosis sobre la concentración de potasio en el agua de drenaje**

#### 4.1.16. Calcio, magnesio y sodio en el agua de drenaje

Para el catión tipo calcio, la concentración más alta fue encontrada en el tratamiento con yeso (48.40 meq L<sup>-1</sup>), seguido de la cachaza (46.70 meq L<sup>-1</sup>); el testigo reportó la concentración menor (39.90 meq L<sup>-1</sup>). La concentración de todos los tratamientos que involucraron una dosis de 200% (45.43 meq L<sup>-1</sup>) resultó mayor que la de aquellos que involucraron una dosis de 100% (43 meq L<sup>-1</sup>). Los tratamientos de yeso 100% y 200% reportaron las concentraciones más altas (47.6 y 49.2 meq L<sup>-1</sup> respectivamente).

Las concentraciones de calcio en el agua de drenaje según el tipo de enmienda y sus respectivas dosis, se resumen en la Figura N° 6:



**Figura N° 6: Concentración de calcio en al agua de drenaje según tipo de enmienda y dosis empleada**

En el caso del magnesio, la concentración más alta fue encontrada en el tratamiento con vinaza (111.083 meq.L<sup>-1</sup>), el tratamiento con cachaza reportó la concentración menor (78.917 meq.L<sup>-1</sup>).

Para el catión tipo sodio, el valor más alto de concentración fue hallado en el tratamiento con yeso (436.21 meq.L<sup>-1</sup>), seguido de la vinaza (420.001 meq.L<sup>-1</sup>).

La concentración de calcio, magnesio y sodio según el tipo de enmienda, se resume en el Cuadro N° 26:

**Cuadro N° 26: Concentración de calcio, magnesio y sodio según el tipo de enmienda en el agua de drenaje**

Tratamiento	Ca (meq L <sup>-1</sup> )	Mg (meq L <sup>-1</sup> )	Na (meq L <sup>-1</sup> )
<b>Enmienda</b>			
Cachaza	46.70	78.92	392.61
Testigo	39.90	95.5	378.26
Vinaza	41.85	111.08	420.01
Yeso	48.40	98.75	436.21

#### 4.1.17. Cloruro en el agua de drenaje

El análisis de varianza encontró que el factor principal tipo de enmienda tuvo un efecto altamente significativo ( $p$ -valor  $< 0.001$ ), la interacción, así como el factor principal dosis, resultaron ser no significativos. La prueba de comparación de medias de Tukey asignó al tratamiento con yeso la mayor concentración de cloruro (527.5 meq L<sup>-1</sup>), seguido por la vinaza (520 meq L<sup>-1</sup>).

#### 4.1.18. Sulfato en el agua de drenaje

El análisis de varianza encontró que el factor principal tipo de enmienda resultó ser significativo (0.043). El factor principal dosis y la interacción resultaron ser no significativos. La prueba de comparación de medias de Tukey asignó al tratamiento con vinaza la mayor concentración (56.43 meq L<sup>-1</sup>), seguido del yeso (54.03 meq L<sup>-1</sup>).

El efecto de la aplicación de las cuatro enmiendas ensayadas y de las dos dosis sobre la concentración de cloruro y sulfato, se resume en el Cuadro N° 27:

**Cuadro N° 27: Efecto del tipo de enmienda y de las dos dosis sobre la concentración de cloruro y sulfato en el agua de drenaje**

Tratamiento	Aniones solubles (meq.L <sup>-1</sup> )	
	Cloruro	Sulfato
<b>Enmienda</b>		
Yeso	527.5 a	54.03 ab
Vinaza	520.0 a	56.43 a
Cachaza	453.0 b	45.66 b
Testigo	446.0 b	51.36 ab
<b>Dosis</b>		
100%	489.75 a	51.16 a
200%	483.50 a	52.58 a
<b>ANVA</b>	<b>p-valor</b>	<b>p-valor</b>
<b>Enmienda</b>	<0.001	0.043
<b>Dosis</b>	0.657	0.597
<b>Enmienda X dosis</b>	0.671	0.980
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	9.07	16.20

Valores dentro de una columna seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes ( $P > 0.05$ ) de acuerdo a la prueba de comparación de medias HSD de Tukey

#### 4.1.19. Nitrato, bicarbonato y carbonato en el agua de drenaje

La menor concentración de nitrato fue reportada en el tratamiento con vinaza (0.25 meq L<sup>-1</sup>); lo contrario ocurrió para la concentración de bicarbonato (6.84 me L<sup>-1</sup>). Los carbonatos no estuvieron presentes. La concentración de nitrato y bicarbonato según el tipo de enmienda, se resume en el Cuadro N° 28:

**Cuadro N° 28: Concentración de nitrato y bicarbonato según el tipo de enmienda en el agua de drenaje**

Enmienda	Nitratos (meq.L <sup>-1</sup> )	Bicarbonatos (meq.L <sup>-1</sup> )
Cachaza	5.53	4.95
Testigo	6.44	5.43
Yeso	7.19	4.53
Vinaza	0.25	6.84

## 4.2. DISCUSIÓN

### 4.2.1. Densidad aparente (d.a)

La d.a del suelo en el testigo ( $1.35 \text{ g cm}^{-3}$ ) puede considerarse como un valor normal para un suelo franco arenoso; lo que podría sugerir que el suelo utilizado en este trabajo no presenta algún problema de degradación física. En los suelos dispersados por sodio, la translocación de arcillas puede causar paulatinamente un sellado de los poros, por lo que en dichos casos no sería extraño encontrar valores de d.a elevados, como puede verse en el trabajo de Srivastava *et al.*, 2014; sin embargo, conclusiones más sólidas sobre la calidad de las propiedades físicas del suelo en el testigo pueden ser elaboradas si es que junto con la d.a se analizan los resultados obtenidos en la prueba de conductividad hidráulica.

El contenido de materia orgánica en solución de la vinaza ( $65.42 \text{ g L}^{-1}$ ) permite explicar los cambios estructurales que ocurrieron bajo dicho tratamiento y que consecuentemente redujeron la d.a hasta  $1.27 \text{ g.cm}^{-3}$ . Uno de los efectos que se le asigna a la materia orgánica en el suelo es la formación de agregados a través de su rol como agente cementante y como enlace o núcleo de adsorción de las partículas de arcilla. Una interesante compilación de teorías que se desarrollaron a lo largo de los años y que explicarían los mecanismos de agregación en el suelo puede ser encontrado en Lal R. y Shukla M., 2004. A nivel de campo, los efectos en los suelos producidos por aplicaciones de materia orgánica, sobre todo si se emplean grandes cantidades, son rápidamente visibles y se expresan en modificaciones de las propiedades del suelo como pueden ser: estructura, permeabilidad, densidad aparente, retención de humedad, etc., por tanto, atribuir el efecto de disminución de la d.a principalmente al alto contenido de materia orgánica de la vinaza es ampliamente respaldado, sobre todo si se tiene en cuenta que una unidad de tonelada de materia orgánica sería incorporada con tan solo un volumen  $15.29 \text{ m}^3$  de la enmienda.

### 4.2.2. Conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ )

Según la tabla de clasificación de permeabilidad propuesta por la FAO en el Cuadro N° 5, el  $K_s$  ( $1.92 \text{ cm hora}^{-1}$ ) del tratamiento testigo es propio de suelos de permeabilidad moderadamente lenta. La calidad de las propiedades físicas de los suelos estrictamente sódicos es siempre considerada como deteriorada; por otro lado, sobre los suelos salino-sódicos pueden encontrarse clasificaciones en donde el estado de las propiedades físicas se

considera como muy bueno, normal, o variable (O'Geen A., 2015; Davis R.M. *et al.*, 2012). Es posible que el grado de dispersión o floculación de este tipo de suelos este influenciado por la proporción entre los niveles de salinidad presente y las cantidades de sodio saturando el complejo de cambio. La dispersión ocurrirá o no, dependiendo no sólo de la naturaleza de los cationes intercambiables, sino también de la composición iónica del electrolito y concentración de la solución externa (Porta *et al.*, 2011).

El valor de  $K_s$  del tratamiento cachaza fue clasificado como moderado (2.46 cm.hora<sup>-1</sup>), además, el tratamiento cachaza 200% reportó un valor que resultó ser 1.6 veces el valor del testigo (3.12 cm.hora<sup>-1</sup>). El alto valor de  $K_s$  en este tratamiento puede explicarse por el efecto de la cachaza en la creación de macroporos: El flujo rápido del agua y el almacén de aire está asociado principalmente a la presencia de macroporos, por eso estos son también conocidos como los poros de transmisión, el número de macroporos más que el volumen total de la porosidad es determinante en cuanto a la rapidez con que el agua es capaz de atravesar el suelo; así, los suelos arenosos aunque menos porosos que los suelos arcillosos, presentan mayores velocidades de transmisión de agua (Brady *et al.*, 1984). La mínima descomposición de esta enmienda en el suelo y los resultados de  $K_s$  y d.a, sugieren que el efecto de la cachaza fue principalmente sobre la distribución de tamaño de poros del suelo, y no sobre el número total de estos.

#### **4.2.3. Conductividad eléctrica**

Los efectos más notorios fueron producidos por la enmienda tipo cachaza, bajo su influencia, la conductividad eléctrica en el extracto de pasta de saturación fue significativamente alta, no ocurriendo de igual manera en la conductividad del agua de drenaje, donde este tratamiento reportó los menores valores. Esto sugiere que estamos frente a un caso de poca eficacia de lixiviación de sales durante el lavado originado por la cachaza. La presencia de macroporos creados por esta enmienda puede explicar este comportamiento: los macroporos son los responsables del aumento de la conductividad hidráulica del suelo, y provocan por tanto un aumento de la velocidad del flujo de agua que lo atraviesa; el agua que viaja a mayor velocidad a través de los macroporos tiene menos oportunidad que el agua que viaja a menor velocidad de lixiviar las sales del perfil (Öztürk, *et al.*, 2002). Similares hechos fueron encontrados por Terkeltoub *et al.*, 1971.

Dada la naturaleza extremadamente salina de la vinaza ( $35.30 \text{ dS m}^{-1}$ ), la incorporación de esta enmienda en el suelo significó también la adición de una importante cantidad de sales, por tanto es muy probable que la salinidad inicial antes del lavado de las unidades experimentales tratadas con esta enmienda haya sido superior. Partiendo de esta última situación, el hecho de que los valores finales de conductividad eléctrica de los extractos de saturación de los tratamientos con vinaza, yeso y testigo hayan resultado muy similares, invita a pensar a que quizá pudo haber ocurrido una mejor remoción de sales en el tratamiento con vinaza, de ser así, dos situaciones podrían explicar este comportamiento: hubo una mejor remoción de sales debido a que la velocidad del flujo de agua durante el lavado fue menor (conductividad hidráulica de  $1.29 \text{ cm.hora}^{-1}$ ), o que simplemente la ligera cantidad de agua extra que recibió este tratamiento para el lavado (en promedio aproximadamente 50 ml de más) fue suficiente para lixiviar una mayor cantidad de sales (el tratamiento con vinaza originó un incremento de la porosidad y el criterio de volumen de agua para el lavado fue tres veces el volumen poroso). El valor de la salinidad del agua de drenaje de la vinaza ( $42.81 \text{ dS m}^{-1}$ ), al ser el mayor de todos los tratamientos, respalda medianamente la hipótesis de una mejor remoción de sales, sin embargo más trabajo experimental será necesario para comprobarlo.

#### **4.2.4. Ras del extracto de saturación del suelo ( $\text{RAS}_{(\text{eps})}$ )**

En los suelos salinos donde sea el cloruro de sodio la sal que se encuentre en grandes cantidades (como es el caso del suelo experimental utilizado en este trabajo), será muy probable encontrar un  $\text{RAS}_{(\text{eps})}$  muy elevado también. El  $\text{RAS}_{(\text{eps})}$  final del tratamiento con cachaza es casi tres veces que el del tratamiento con yeso y el testigo, y es casi cuatro veces que el del tratamiento con vinaza. La menor remoción de cloruro de sodio durante el lavado en este tratamiento es entonces la principal causa de su valor final  $\text{RAS}_{(\text{eps})}$  notablemente alto.

El valor de  $\text{RAS}_{(\text{eps})}$  del tratamiento vinaza muestra una clara tendencia a ser el menor de todos, esto debido a la concentración final más baja de sodio en el extracto de saturación ( $40.24 \text{ meq L}^{-1}$ ), valor que se complementa con la concentración de sodio encontrado en su agua de drenaje ( $420.01 \text{ meq L}^{-1}$ , el segundo valor más alto después del yeso), esto último puede sugerir que una mayor remoción de dicho catión pudo haber ocurrido bajo la influencia de esta enmienda. El análisis de materia orgánica especial de la vinaza reportó

1.47 g.L<sup>-1</sup> de calcio, 0.73 g.L<sup>-1</sup> de magnesio, y 0.45 g.L<sup>-1</sup> de sodio, es posible que parte del calcio y el magnesio hayan contribuido al desplazamiento del sodio desde el complejo de cambio del suelo, y por consiguiente, esto se haya traducido en un aumento de la concentración de sodio en el agua de drenaje luego del lavado, sin embargo también es probable que mucha de la presencia de este catión en este medio se deba a las cantidades aportadas por la misma enmienda. La concentración de magnesio propia de la vinaza parece también haber contribuido a la disminución del valor del RAS<sub>(eps)</sub>; de hecho, una concentración superior de magnesio fue encontrada en este tratamiento en comparación al yeso y el testigo. En este trabajo no se programó la ejecución de metodologías que permitan evaluar los cambios en la distribución de los cationes del complejo de cambio tras la aplicación de las enmiendas y posterior lavado, esto hubiera ayudado a esclarecer un poco más el panorama sobre la utilidad de cada tipo de enmienda.

#### **4.2.5. Concentración de calcio**

Las concentraciones de calcio en el extracto de saturación para cada enmienda no siguieron alguna tendencia específica. Un resultado lógico que se hubiera podido esperar es que el tratamiento yeso hubiera reportado la mayor concentración de este catión, sin embargo ocurrió todo lo contrario. En el agua de drenaje los resultados siguieron un poco más de orden, el tratamiento yeso reportó la mayor concentración y se observó una mayor presencia de calcio conforme se duplicaron las dosis de todas enmiendas.

#### **4.2.6. Concentración de potasio**

El tratamiento vinaza reportó la concentración más elevada en el extracto de saturación (11.77 meq L<sup>-1</sup>), esto se explica por la también alta concentración de potasio que de forma natural se encuentra en la vinaza (8,9 g.L<sup>-1</sup>); consecuentemente al incorporar la enmienda mucho potasio fue agregado. El resultado en el agua de drenaje complementa el resultado del extracto de saturación y permite hacer otra discusión: el tratamiento que más potasio perdió fue también el tratamiento vinaza, la concentración reportada fue de 62.81 meq L<sup>-1</sup>, valor que es casi 3.5 veces la cantidad correspondiente al tratamiento con yeso (17.78 meq.L<sup>-1</sup>), que es la enmienda que reportó el segundo valor más alto; así, que la vinaza haya reportado la concentración más alta de potasio tanto en el extracto de saturación como en el agua de drenaje, significa que así como mucho potasio fue añadido con la incorporación de la enmienda, también mucho potasio fue lixiviado como producto del lavado.

El tratamiento cachaza reportó la segunda concentración más alta de potasio en el extracto de saturación ( $7.26 \text{ meq L}^{-1}$ ), difiere significativamente del tratamiento yeso y testigo y también se complementa con la concentración de potasio encontrada en su agua de drenaje: el nivel más bajo de potasio lixiviado se encontró en el tratamiento cachaza ( $13.56 \text{ meq L}^{-1}$ ). Que el tratamiento cachaza haya reportado el segundo valor más alto de concentración de potasio luego del lavado, guarda relación con que fue también este tratamiento el que reportó el valor más alto de salinidad, es natural que en suelos más salinos, más cantidades de cationes y aniones estén presentes.

#### **4.2.7. Concentración de magnesio**

La distribución del magnesio y el potasio tanto en el extracto de saturación como en el agua de drenaje, resultó ser bastante similar debido a que los factores que determinaron sus concentraciones finales fueron los mismos: la alta salinidad final de los tratamientos con cachaza y las importantes cantidades de magnesio y potasio propias de la enmienda tipo vinaza.

#### **4.2.8. Concentración de sulfato**

Es de particular importancia el aquél encontrado en el extracto de saturación del tratamiento vinaza, cuyo valor fue el más bajo ( $32.40 \text{ meq.l}^{-1}$ ). La cuantificación de sulfato en este caso parece haber sido afectada por la presencia de materia orgánica en solución y color de la misma enmienda. La interferencia pudo haber ocurrido durante las lecturas de absorbancia de luz en el espectrofotómetro, que son parte del protocolo del método turbidimétrico de determinación de azufre. El color puede causar interferencias y la presencia de grandes cantidades de materia orgánica en las muestras en donde se desea determinar sulfatos puede ocasionar una no satisfactoria precipitación del sulfato de bario (NITTTTR, sf.), la formación de este precipitado es importante porque es el que genera la turbidez que influye en la mayor o menor absorbancia de la luz, suceso a partir del cual los sulfatos son siempre determinados. Así, para todos los casos en los que la vinaza fue utilizada, la suma de cationes resultó ser bastante superior a la suma de aniones.

## V. CONCLUSIONES

- La aplicación de vinaza como enmienda correctiva disminuyó la densidad aparente del suelo.
- La aplicación de cachaza incrementó los valores de conductividad hidráulica del suelo pero disminuyó significativamente la eficacia de remoción de sales durante el lavado, resultando en un mayor contenido de cloruro de sodio y valores elevados de  $RAS_{(eps)}$ .
- La incorporación de vinaza elevó significativamente la concentración de potasio y en cierta medida la concentración de magnesio. También los niveles de sodio más bajos estuvieron asociados al empleo de esta enmienda.
- La cachaza puede ser útil en el manejo de suelos irrigados con aguas salinas, en este caso el aumento del  $K_s$  puede evitar una acumulación excesiva de sales en el perfil. La vinaza por sus efectos sobre el suelo y características químicas posee un buen potencial para la remediación de la sodicidad.

## **VI. RECOMENDACIONES**

- El estado estructural de los suelos salinos-sódicos será mejor entendido con la ejecución de diferentes tipos de pruebas que se complementen entre sí, por ejemplo: densidad aparente, conductividad hidráulica, velocidad de infiltración, estabilidad de agregados, etc.; además también deberá tenerse en cuenta la clase textural.
- Los análisis de cambios en la composición de iones solubles en el extracto de saturación tras la aplicación de enmiendas y lavado deben ser complementados con análisis sobre los cambios en los cationes retenidos en el complejo de cambio.
- En la realización de un análisis de cuantificación de iones solubles, es preferible que el primer elemento en ser analizado sea el azufre. El azufre parece ser el más susceptible de todos los elementos a sufrir cambios en su concentración en las soluciones conforme pasa el tiempo. La tendencia es hacia la disminución de los niveles.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abrol I.P.; Yadav J.S.P.; Massoud F.I. 1988. Salt affected soils and their management. FAO Soils Bulletin 39. 119 p.
- Ayers R.S.; Wescott D.W. 1976. Laboratory studies on salt distribution in furrow irrigated soil with special reference to the pre-emergence period. Soil Sci., 83:249-263.
- Ayers R.S.; Wescott D.W. 1985. Water quality for agricultura. FAO Irrigation and Drainage Paper N° 29. 174 p.
- Bazán R. 1996. Manual Para el Análisis Químico de Suelos Aguas Plantas. Universidad Nacional Agraria La Molina. 54 p.
- Bohn, H.; Mcneal B.; O'Connor, G. 1993. Química del Suelo. Editorial Limusa, S.A. Primera edición. 363 p.
- Brady, N. 1990. The Nature and Properties of Soils. Macmillan Publishing Company. Tenth Edition. 599 p.
- Carter D.L. 1981. Salinity and plant productivity. Chemical Rubber Co. Handbook Series in Nutrition and Food.
- Davis R.M.; Waskom R.M.; Bauder T.A. 2012. Managing Sodic Soils. Colorado State University Extension. Fact Sheet N° 0.504.
- Dotaniya M.; Rajendiran S.; Datta S.; Biswas D.; Dotaniya C.; Meena B.; Regar K.; Lata M. 2016. Use of sugarcane industrial by-products for improving sugarcane and soil health. Int.J.Recycl.Org.Waste Agricult. 5: 185-194.

FAO. Permeabilidad de suelo. Disponible en:

[http://www.fao.org/fishery/static/FAO\\_Training/FAO\\_Training/General/x6706s/x6706s09.htm#top](http://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s09.htm#top).

Fassbender, H. 1975. Química de suelos: con énfasis en los suelos de América latina. Editorial IICA. Primera edición. 385 p.

Forsythe W. 1975. Física de Suelos. Editorial IICA. 211 p.

Gabriels D.; Lobo D.; Mansonia M. 2006. Métodos para determinar la conductividad hidráulica saturada y no saturada de los suelos. Revista de la sociedad venezolana de la ciencia del suelo y del instituto de Edafología de la facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela. 14(1).

Gutiérrez M.; Zuñiga O.; Ospina-Salazar D. 2016. Effect of three biowastes on the productivity potential of a sodic soil. *Agronomía Colombiana* 34(2): 250-259.

Hernández, O. 2000. Uso de métodos químicos-biológicos como mejoradores de la conductividad hidráulica de un suelo salino-sódico. Tesis Doctoral. Universidad de Colima-México.

Hillel D. 1982. *Introduction to Soil Physics*. Academic Press. 353 p.

Khosla B.K.; Gupta R.K.; 1979. Salt Leaching and The Effect of Gypsum Application in A Saline-Sodic Soil. *Agricultural Water Management*. 2: 193-202.

Lal, R.; Shukla, M.; 2004. *Principles of Soil Physics*. Marcel Dekker, INC. New York. Basel. 699 p.

O'Geen A. 2015. *Reclaiming Saline, Sodic, and Saline-Sodic Soils*. University of California. ANR Publication 8519.

Öztürk H. S.; Özkan I. 2002. Solute Movement in Large Soil Columns under different Water Flow Velocities. *Die Bodenkultur.*, 53:4.

Maas E.V.; Hoffman G.J. 1977. Crop salt tolerance - current assessment. *J. Irrigation and Drainage Division, ASCE* 103 (IRI): 115-134.

- Madejón E.; López R.; Murillo JM.; Cabrera F. 2001. Agricultural use of three (sugarbeet) vinasse composts: effect on crops and chemical properties of a Cambisol soil in the Guadalquivir river valley (SW Spain) *Agric Ecosyst Environ.* 84:55–65
- Mavi MS.; Sanderman J.; Chittleborough DJ.; Cox JW.; Marschner P. 2012. Sorption of dissolved organic matter in salt-affected soils: effect of salinity, sodicity and texture. *Sci Total Environ.* 435–436:337–344
- National Institute of Technical Teachers Training and Research (NITTTR). Environmental engineering and public health lab manual. Experiment Number 9: Determination of Sulphates. Disponible en: [//nitttrc.ac.in/](http://nitttrc.ac.in/)
- Paul E.A.; Clark F.E. 1989. *Soil Microbiology and Biochemistry*. Academic Press. 277 pages.
- Porta J.; Lopez-Acevedo M.; Poch R. 2011. Introducción a la edafología: uso y protección de los suelos. Segunda edición. Ediciones Mundi-prensa. 508 p.
- Porta J.; López-Acevedo M.; Roquero C. 2003. *Edafología Para la Agricultura y el Medio Ambiente*. Tercera Edición. Ediciones Mundi-Prensa. 917 p.
- Rhoades J.D.; Merrill S.D.; 1976. Assessing the suitability of water for irrigation: theoretical and empirical approaches. *FAO Soils Bull.* 31:69-110.
- Solaimalai A.; Baskar M.; Ramesh P.; Ravisankar N. 2001. Utilisation of press mud as soil amendment and organic manure-A review. Tamil Nadu Agricultural University, Coimbatore, India. *Agric.Rev.* 22(1):25-32
- Srivastava P.K.; Gupta M.; Pandey V.; Singh N.; Tewari S.K. 2014. Effects of sodicity induces changes in soil physical properties and paddy root growth. *Plant soil Environ.* Vol.60. 4: 165-169.
- Taiz L.; Zeiger E. 2006. *Fisiología Vegetal*. Publicacions de la Universitat Jaume I. 1265 p.
- Terkeltoub, R. W., Babcock K.L. 1971: Calculation on the leaching required to reduced the salinity of a particular soil dept beneath a specified value. *Soil Sci.Soc. Amer. Proc.*, 35: 411–414.

United States Department of Agriculture (USDA). 1954. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. L.A. Richards. 160 p.

Vásquez A.; Vásquez I.; Vásquez C.; Cañamero M. 2017. Fundamentos de la Ingeniería de Riegos. Primera Edición. Universidad Nacional Agraria La Molina. 442 p.

## VIII. ANEXOS

### ANEXO 1: ANVA de la densidad aparente

Fuente de V.	G.L.	S.C.	C.M.	Valor F	Significación
Enmienda	3	0.067541	0.022514	5.91	0.03
Dosis	1	0.000563	0.000563	0.15	0.703
Enmienda:Dosis	3	0.001677	0.000559	0.15	0.931
Error	32	0.121973	0.003812		
Total	39	0.191755			

### ANEXO 2: ANVA de la conductividad hidráulica

Fuente de V.	G.L.	S.C.	C.M.	Valor F	Valor p
Enmienda	3	7.496	2.4986	8.23	0.000
Dosis	1	1.120	1.1199	3.69	0.064
Enmienda:Dosis	3	4.441	1.4803	4.88	0.007
Error	32	9.716	0.3036		
Total	39	22.773			

### ANEXO 3: ANVA de la conductividad eléctrica del extracto de saturación

Fuente de V.	G.L.	S.C.	C.M.	Valor F	Valor p
Enmienda	3	7.9873	2.66245	30.60	0.000
Dosis	1	0.0194	0.01944	0.22	0.640
Enmienda:Dosis	3	0.1575	0.05250	0.60	0.618
Error	32	2.7846	0.08702		
Total	39	10.9489			

**ANEXO 4: ANVA del RAS del extracto de saturación**

<b>Fuente de V.</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.C.</b>	<b>C.M.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Enmienda	3	50.0893	16.6964	155.37	0.000
Dosis	1	0.0631	0.0631	0.59	0.449
Enmienda:Dosis	3	0.4345	0.1448	1.35	0.276
Error	32	3.4388	0.1075		
Total	39	54.0257			

**ANEXO 5: ANVA de la concentración de cloruro en el extracto de saturación**

<b>Fuente de V.</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.C.</b>	<b>C.M.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Enmienda	3	157898	52632.8	196.13	0.000
Dosis	1	44	44.1	0.16	0.688
Enmienda:Dosis	3	40	13.2	0.05	0.985
Error	32	8587	268.4		
Total	39	166569			

**ANEXO 6: ANVA de la concentración de potasio en el extracto de saturación**

<b>Fuente de V.</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.C.</b>	<b>C.M.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Enmienda	3	8.1601	2.72003	47.87	0.000
Dosis	1	0.0000	0.00003	0.00	0.981
Enmienda:Dosis	3	0.3993	0.13311	2.34	0.092
Error	32	1.8181	0.05682		
Total	39	10.3776			

**ANEXO 7: ANVA de la concentración de sulfato en el extracto de saturación**

<b>Fuente de V.</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.C.</b>	<b>C.M.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Enmienda	3	3043.76	1014.59	69.63	0.000
Dosis	1	41.51	41.51	2.85	0.101
Enmienda:Dosis	3	79.70	26.57	1.82	0.163
Error	32	466.30	14.57		
Total	39	3631.26			

**ANEXO 8: ANVA de la concentración de calcio en el extracto de saturación**

<b>Fuente de V.</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.C.</b>	<b>C.M.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Enmienda	3	450.40	150.133	8.95	0.000
Dosis	1	2.14	2.139	0.13	0.723
Enmienda:Dosis	3	210.08	70.025	4.18	0.013
Error	32	536.67	16.771		
Total	39	1199.28			

**ANEXO 9: ANVA de la concentración de magnesio en el extracto de saturación**

<b>Fuente de V.</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.C.</b>	<b>C.M.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Enmienda	3	1696.14	565.381	46.28	0.000
Dosis	1	1.08	1.076	0.09	0.769
Enmienda:Dosis	3	4.23	1.412	0.12	0.950
Error	32	390.93	12.217		
Total	39	2090.38			

**ANEXO 10: ANVA de la concentración de sodio en el extracto de saturación**

<b>Fuente de V.</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.C.</b>	<b>C.M.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Enmienda	3	360.157	120.052	161.59	0.000
Dosis	1	0.320	0.320	0.43	0.517
Enmienda:Dosis	3	1.491	0.497	0.67	0.577
Error	32	23.774	0.743		
Total	39	385.741			

**ANEXO 11: ANVA de la concentración de potasio en el agua de drenaje**

<b>Fuente de V.</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.C.</b>	<b>C.M.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Enmienda	3	122.879	40.9597	537.39	0.000
Dosis	1	2.331	2.3314	30.59	0.000
Enmienda:Dosis	3	4.245	1.4149	18.56	0.000
Error	32	2.439	0.0762		
Total	39	131.894			

**ANEXO 12: ANVA del RAS del agua de drenaje**

<b>Fuente de V.</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.C.</b>	<b>C.M.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Enmienda	3	138.874	46.2912	3.00	0.045
Dosis	1	0.172	0.1718	0.01	0.917
Enmienda:Dosis	3	21.632	7.2106	0.47	0.707
Error	32	494.147	15.4421		
Total	39	654.824			

**ANEXO 13: ANVA de la concentración de cloruro en el agua de drenaje**

<b>Fuente de V.</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.C.</b>	<b>C.M.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Enmienda	3	55657	18552.3	9.54	0.000
Dosis	1	391	390.6	0.20	0.657
Enmienda:Dosis	3	3042	1014.0	0.52	0.671
Error	32	62230	1944.7		
Total	39	121319			

**ANEXO 14: ANVA de la concentración de sulfato en el agua de drenaje**

<b>Fuente de V.</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.C.</b>	<b>C.M.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Enmienda	3	642.58	214.194	3.03	0.043
Dosis	1	20.14	20.141	0.29	0.597
Enmienda:Dosis	3	12.79	4.262	0.06	0.980
Error	32	2260.65	70.645		
Total	39	2936.16			

**ANEXO 15: ANVA de la conductividad eléctrica del agua de drenaje**

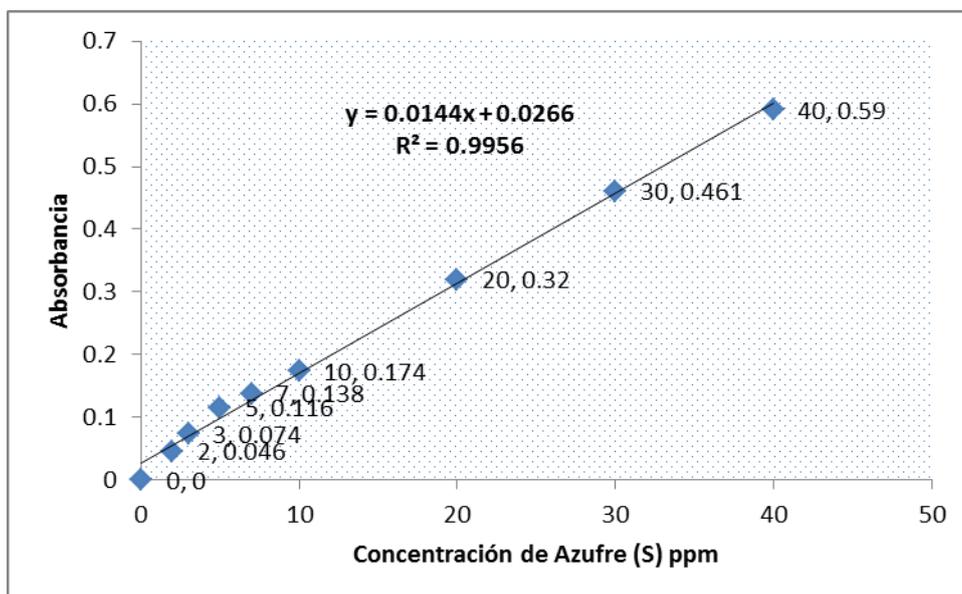
<b>Fuente de V.</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.C.</b>	<b>C.M.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Enmienda	3	4197571599	1399190533	11.33	0.000
Dosis	1	48752450	48752450	0.39	0.534
Enmienda:Dosis	3	103761621	34587207	0.28	0.839
Error	32	3951503423	123484482		
Total	39	8301589094			

**ANEXO 16: Curva patrón, relación lineal, y ecuación para la determinación de azufre.**

- **Relación de concentración de azufre (S) con niveles de absorbancia para la determinación de sulfatos.**

<b>Concentración de S ppm</b>	<b>Onda de absorbancia (nm)</b>
0	0
2	0.046
3	0.074
5	0.116
7	0.138
10	0.174
20	0.32
30	0.461
40	0.59

- **Relación Lineal de primer orden de la absorción de onda (nm) en función de la concentración de azufre (S) en ppm.**



La ecuación obtenida de la relación lineal en la Figura se usó para encontrar concentraciones de azufre asociadas a una determinada onda de absorción, así:

$$X = \frac{Y - 0.0266}{0.0144}$$

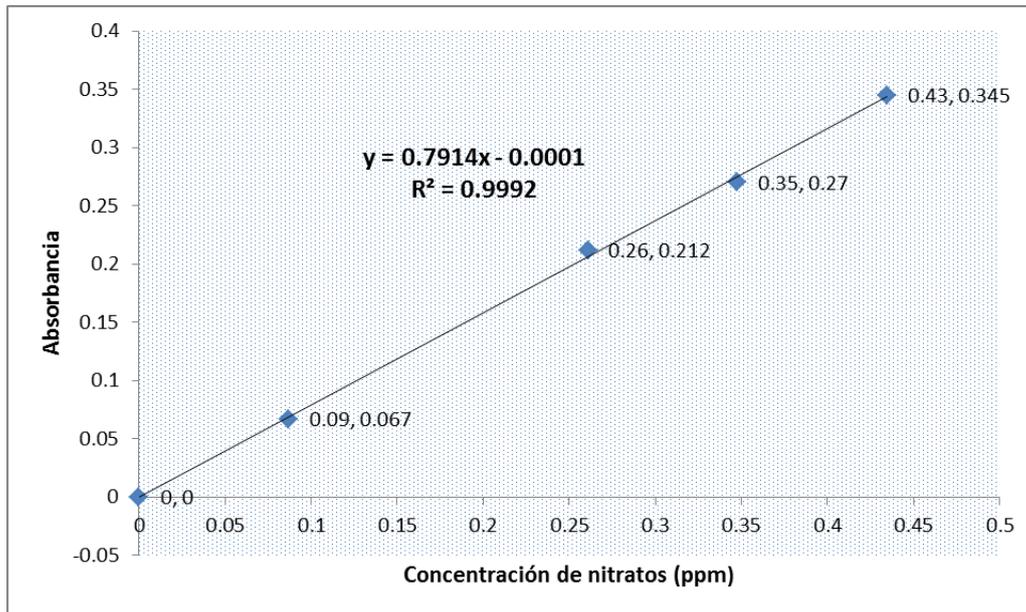
Dónde: Y es igual a la absorción de onda en nm leída en el espectrofotómetro y X es su concentración de azufre (S) asociada (ppm).

#### **ANEXO 17: Curva patrón, relación lineal, y ecuación para la determinación de nitratos.**

- **Relación de concentración de nitratos con niveles de absorbancia para su determinación**

Concentración de nitratos (ppm)	Onda de absorbancia (nm)
0	0
0.09	0.067
0.26	0.212
0.35	0.270
0.43	0.430

- **Relación lineal de primer orden de absorción de onda (nm) en función de la concentración de nitratos en ppm.**



Despejando la variable X de la ecuación de la relación lineal se obtuvo:

$$X = \frac{Y+0.0001}{0.7914}$$

Dónde: Y es igual a algún valor de absorbancia en el espectrofotómetro (nm) y X es la concentración de nitrato respectivo (ppm)