

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

ESCUELA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN SUELOS



**“REHABILITACIÓN DE SUELOS SALINOS-SÓDICOS CON
DOS MEJORADORES QUÍMICOS EN LA PARTE BAJA DEL
VALLE CHANCAY-LAMBAYEQUE, 2018”**

Presentada por:

ROSO PRÓSPERO PASACHE CHAPOÑÁN

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE
MAGISTER SCIENTIAE EN SUELOS**

Lima - Perú

2021

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN SUELOS**

**“REHABILITACIÓN DE SUELOS SALINOS-SÓDICOS CON
DOS MEJORADORES QUÍMICOS EN LA PARTE BAJA DEL
VALLE CHANCAY-LAMBAYEQUE, 2018”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE
MAGISTER SCIENTIAE**

Presentada por:

ROSO PRÓSPERO PASACHE CHAPOÑÁN

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Mg.Sc. Luis Tomassini Vidal
PRESIDENTE

Mg.Sc. Rubén Bazán Tapia
ASESOR

Dr. Oscar Loli Figueroa
MIEMBRO

Mg.Sc. Braulio La Torre Martínez
MIEMBRO

DEDICATORIA

*Dedico este gran esfuerzo a mis hijos
Renato y Renzo, ya que en todo
momento fueron mi fortaleza
para continuar con esta investigación.*

AGRADECIMIENTO

A la escuela de posgrado de la Universidad Nacional Agraria la Molina, por brindarme la oportunidad de ser un estudiante en su especialidad de la ciencia del suelo y poder ampliar un abanico de conocimientos.

A mi patrocinador el Mg.Sc. Rubén Bazán Tapia por su asesoría, consejo y paciencia en el desarrollo de esta investigación.

A mi comité consejero, por las grandes oportunidades que tuve de conversar sobre esta investigación.

Al personal administrativo de la escuela de posgrado de la Universidad Nacional Agraria la Molina por su gran atención de buenísima calidad y gran servicio.

ÍNDICE GENERAL

I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1. Suelos del valle Chancay.....	3
2.2. Origen de la salinidad.....	4
2.3. Suelo salino.....	5
2.4. Conductividad eléctrica.....	8
2.5. Efecto de la salinidad sobre las plantas.....	8
2.6. Efecto de la salinidad sobre el suelo.....	10
2.7. Suelo sódico.....	10
2.8. Suelos salinos y sódicos.....	13
2.9. Efectos de la alcalinidad.....	14
2.10. Capacidad de intercambio catiónico.....	14
2.11. Naturaleza coloidal del suelo.....	16
2.12. Recuperación de suelos salinos-sódicos.....	17
2.13. Drenaje y lavado de suelos salino-sódicos.....	20
2.14. Mejoradores químicos.....	21
2.15. Yeso agrícola.....	22
2.16. Azufre.....	24
2.17. Dosis de mejoradores químicos.....	25
2.18. Calidad de agua de riego.....	25
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	28
3.1. Ubicación del experimento.....	38
3.2. Tratamientos y distribución de los tratamientos.....	29
3.3. Metodología de campo.....	32
3.4. Metodología de laboratorio.....	32
3.5. Análisis estadístico.....	33

IV. RESULTADOS.....	34
4.1. Características del agua de pozo utilizada en el lavado de los suelos.....	34
4.2. Características del yeso agrícola.....	35
4.3. Características del azufre polvo seco.....	37
4.4. Características de los suelos estudiados.....	37
4.5. Efecto de los mejoradores y las dosis sobre el pH de los suelos.....	40
4.6. Efecto de los mejoradores y lavado sobre la conductividad eléctrica de los suelos.....	45
4.7. Efecto de los mejoradores y dosis sobre el calcio intercambiable.....	50
4.8. Efecto de los mejoradores y dosis sobre el magnesio intercambiable.....	55
4.9. Efecto de los mejoradores y dosis sobre el potasio intercambiable.....	60
4.10. Efecto de los mejoradores y dosis sobre el sodio intercambiable.....	65
4.11. Efecto de los mejoradores y dosis sobre el porcentaje de sodio intercambiable (PSI).....	70
4.12. Dinámica del carbonato de calcio (CaCO ₃) como fuente de calcio en la recuperación de suelos salino-sódico.....	75
4.13. Demostración de la recuperación de suelos salino-sódicos utilizando un test biológico.....	88
V. CONCLUSIONES.....	82
VI. RECOMENDACIONES.....	83
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84
VIII. ANEXOS.....	87

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Valores de CEE y su relación con sus efectos sobre los cultivos.....	6
Cuadro 2: Capacidad de intercambio catiónico de diferentes materiales coloidales...15	
Cuadro 3: clasificación del agua de riego según Richards.....	26
Cuadro 4: Tratamientos del ensayo experimental.....	30
Cuadro 5: Análisis químico del agua de pozo	34
Cuadro 6: Clasificación del yeso agrícola por su granulometría.....	35
Cuadro 7: Granulometría del yeso agrícola utilizado	35
Cuadro 8: Composición química del yeso agrícola	36
Cuadro 9: Composición química del azufre polvo seco.....	37
Cuadro 10: Características del perfil del suelo.....	39
Cuadro 11: Análisis de varianza para pH (1:1)	40
Cuadro 12: Test de Duncan para bloques ($\alpha=0.05$)	40
Cuadro 13: Test de Duncan para evaluaciones ($\alpha=0.05$)	41
Cuadro 14: Test de Duncan para tratamientos ($\alpha=0.05$)	42
Cuadro 15: Efecto combinado entre las medias de cada tratamiento por evaluación...	43
Cuadro 16: Análisis de varianza para la conductividad eléctrica (1:1) dS/m.....	45
Cuadro 17: Test de Duncan para bloques ($\alpha=0.05$)	46
Cuadro 18: Test de Duncan para evaluaciones ($\alpha=0.05$)	46
Cuadro 19: Test de Duncan para tratamientos ($\alpha=0.05$).....	47
Cuadro 20: Efecto combinado entre las medias de cada tratamiento por evaluación...	48
Cuadro 21: Análisis de varianza para Ca^{+2} intercambiable (meq/100 g).....	50
Cuadro 22: Test de Duncan para bloques ($\alpha=0.05$).....	51
Cuadro 23: Test de Duncan para evaluaciones ($\alpha=0.05$).....	51
Cuadro 24: Test de Duncan para tratamientos ($\alpha=0.05$).....	52
Cuadro 25: Efecto combinado entre las medias de cada tratamiento por evaluación...	53
Cuadro 26: Análisis de varianza para Mg^{+2} intercambiable (meq/100 g).....	55
Cuadro 27: Test de Duncan para bloques ($\alpha=0.05$).....	56
Cuadro 28: Test de Duncan para evaluaciones ($\alpha=0.05$).....	56

Cuadro 29: Test de Duncan para tratamientos ($\alpha=0.05$).....	57
Cuadro 30: Efecto combinado entre las medias de cada tratamiento por evaluación...	58
Cuadro 31: Análisis de varianza para K^+ intercambiable (meq/100 g).....	60
Cuadro 32: Test de Duncan para bloques ($\alpha=0.05$).....	60
Cuadro 33: Test de Duncan para evaluaciones ($\alpha=0.05$).....	61
Cuadro 34: Test de Duncan para tratamientos ($\alpha=0.05$).....	62
Cuadro 35: Efecto combinado entre las medias de cada tratamiento por evaluación...	63
Cuadro 36: Análisis de varianza para Na^+ intercambiable (meq/100 g).....	65
Cuadro 37: Test de Duncan para bloques ($\alpha=0.05$).....	65
Cuadro 38: Test de Duncan para evaluaciones ($\alpha=0.05$).....	66
Cuadro 39: Test de Duncan para tratamientos ($\alpha=0.05$).....	67
Cuadro 40: Efecto combinado entre las medias de cada tratamiento por evaluación...	68
Cuadro 41: Análisis de varianza para el PSI.....	70
Cuadro 42: Test de Duncan para bloques ($\alpha=0.05$).....	71
Cuadro 43: Test de Duncan para evaluaciones ($\alpha=0.05$).....	71
Cuadro 44: Test de Duncan para tratamientos ($\alpha=0.05$).....	72
Cuadro 45: Efecto combinado entre las medias de cada tratamiento por evaluación...	73
Cuadro 46: Análisis de varianza para carbonato de calcio.....	75
Cuadro 47: Test de Duncan para bloques ($\alpha=0.05$).....	76
Cuadro 48: Test de Duncan para evaluaciones ($\alpha=0.05$).....	76
Cuadro 49: Test de Duncan para tratamientos ($\alpha=0.05$).....	77
Cuadro 50: Efecto combinado entre las medias de cada tratamiento por evaluación...	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Solubilidad del yeso en el suelo por tamaño de partícula.....	23
Figura 2: Ubicación del experimento, foto tomada del google maps.....	29
Figura 3: Croquis de distribución de los bloques y tratamientos.....	31
Figura 4: Vista panorámica de los bloques y tratamientos del experimento.....	31
Figura 5: Granulometría del yeso agrícola	36
Figura 6: Perfil del suelo experimental.....	38
Figura 7: Variación de las medias del pH (1:1) en cada tratamiento según evaluación...	44
Figura 8: Variación de las medias de CE (1:1) (dS/m) en cada tratamiento según evaluación.....	49
Figura 9: Variación de las medias de Ca^{2+} intercambiable (meq/100 g-suelo) en cada tratamiento según evaluación.....	54
Figura 10: Variación de las medias de Mg^{2+} intercambiable (meq/100 g-suelo) en cada tratamiento según evaluación.....	69
Figura 11: Variación de las medias de K^{+} intercambiable (meq/100 g-suelo) en cada tratamiento según evaluación.....	64
Figura 12: Variación de las medias de Na^{+} intercambiable (meq/100 g-suelo) en cada tratamiento según evaluación.....	69
Figura 13: Variación de las medias del PSI en cada tratamiento según evaluación.....	74
Figura 14: Variación de las medias de CaCO_3 (%) en cada tratamiento según evaluación.....	79
Figura 15: Medias del porcentaje de germinación por cada tratamiento.....	81
Figura 16: Test biológico en su fase vegetativa para demostrar la recuperación de suelos salino-sódicos.....	89
Figura 17: Test biológico en fase reproductiva.....	89

RESUMEN

El presente trabajo se ejecutó en el distrito de Mochumí, provincia y región Lambayeque, en la parte baja del valle Chancay, donde hay suelos en procesos de salinización y sodificación. La investigación tuvo como objetivo determinar el efecto de dos mejoradores químicos en la rehabilitación de suelos salinos-sódicos, siendo uno de ellos el yeso agrícola, el cual se aplicó en tres dosis (YAD1=8 t/ha, YAD2= 12 t/ha y YAD3= 22 t/ha), el otro mejorador fue el azufre que se aplicó en dos dosis (AD1=4 t/ha y AD2= 6 t/ha), más un testigo. Adicionalmente a cada tratamiento se aplicó estiércol a razón de 20 t/ha, se realizaron cinco evaluaciones cada dos meses, encontrándose los valores de pH (1:1) más bajos en el tratamiento con azufre a dosis de 6 t/ha, debido a que el azufre es un formador de ácidos, la CE (1:1), bajó considerablemente en todos los tratamientos después del primer riego de lavado, siendo la CE (1:1) más baja en el tratamiento YAD2 con una conductividad de 3.36 dS/m. Los niveles de calcio intercambiable fueron más altos en todos los tratamientos con excepción del testigo, siendo este el que presentó el mayor valor de Na intercambiable con 3.11 meq/100 g de suelo, el PSI presentó los valores más bajos en la última evaluación en todos los tratamientos a excepción del tratamiento testigo que tuvo un alto valor de PSI de 22.44, finalmente terminada la fase de recuperación del suelo, se instaló el cultivo de maíz (*Zea mays* L.) como cultivo indicador de la recuperación del suelo, obteniendo una germinación promedio de 64.92 por ciento, población de plantas aceptables para tal fin.

Palabras Clave: suelos, salinos, sódicos, mejoradores, rehabilitación.

ABSTRACT

This work was carried out in the district of Mochumí, Lambayeque province and region, in the lower part of the Chancay valley, where there are soils in salinization and sodification processes. The objective of the research was to determine the effect of two chemical improvers in the rehabilitation of saline-sodium soils, one of them being agricultural gypsum, which was applied in three doses (YAD1=8 t/ha, YAD2=12 t/ha and YAD3=2 t/ha), the other improver was sulfur that was applied in two doses (AD1=4 t/ha and AD2=6 t/ha), plus a control. In addition to each treatment, manure was applied at a rate of 20 t/ha, five evaluations were carried out every two months, finding the lowest pH values (1:1) in the treatment with sulfur at a dose of 6 t/ha, due to that sulfur is an acid former, the EC (1:1), dropped considerably in all treatments after the first wash irrigation, being the EC (1:1) lower in the YAD2 treatment with a conductivity of 3.36 dS/m. The exchangeable calcium levels were higher in all treatments except the control, being this the one that presented the highest value of exchangeable Na with 3.11 meq/100 g of soil, the PSI presented the lowest values in the last evaluation in all the treatments except for the control treatment that had a high PSI value of 22.44, finally after the soil recovery phase, the corn crop (*Zea mays* L.) was installed as an indicator crop of the soil recovery, obtaining a germination average of 64.92 percent, acceptable plant population for this purpose.

Key words: Soils, saline, sodic, improvers, rehabilitation.

I. INTRODUCCIÓN

La salinidad y sodicidad de los suelos es un problema común en zonas áridas y semiáridas de la costa peruana, donde la evapotranspiración supera a la pluviometría y se ubican importantes áreas improductivas debido a esta causa. Estos suelos pueden presentar una acumulación de sales solubles y un alto contenido de sodio intercambiable. Muchos de ellos se consideran dentro de la categoría de suelos salinos por poseer una conductividad eléctrica mayor de 4 dS/m y otros en categoría de suelos sódicos por presentar un valor mayor a 15 por ciento de sodio intercambiable. La concentración de sales en el perfil del suelo aumenta la presión osmótica y reduce la absorción de agua por la planta, lo que interfiere en el normal crecimiento y desarrollo de muchas especies cultivadas. El exceso de sodio determina la degradación de la estructura del suelo, expandiendo el sistema coloidal y reduciendo y/o eliminando la porosidad, alterando la dinámica del agua y la aireación del suelo. Este problema afecta a los cultivos en diferente grado dependiendo de la especie.

A nivel mundial la FAO (2005), estima que unos 400 millones de hectáreas están afectadas por salinización y otros 400 millones de hectáreas por sodificación. En América latina (Wikipedia 2010), representa 59.4 millones de hectáreas afectadas por salinización y sodificación. Un estudio de suelos efectuado en el valle Chancay-La Leche (Ministerio de agricultura, 1972) se desprende que unas 30,000 hectáreas están afectadas en mayor o menor grado por salinidad y sodificación. DEPOLTI (2004), ha proyectado que para el año 2,025 existirán unas 42,626 hectáreas fuertemente salinas y 24,052 hectáreas ligeramente salinas solo para la cuenca Chancay-Lambayeque.

Los problemas de salinidad y sodicidad de los suelos en el territorio peruano deben ser analizados ampliamente a partir de una cuantificación del recurso suelo afectado, por lo que esta investigación ha desarrollado una tecnología basada en la aplicación de dos mejoradores químicos, que son económicos y disponibles en la región Lambayeque y

pueden ser utilizadas por los productores e instituciones de interés. Para el desarrollo de la investigación se plantearon los siguientes objetivos:

OBJETIVOS

Objetivo general

- Determinar el efecto de dos mejoradores químicos en la rehabilitación de suelos salinos-sódicos en la parte baja del valle Chancay-Lambayeque.

Objetos específicos

- Determinar el tipo de mejorador químico que reduce mayores niveles de sodio intercambiable.
- Determinar la mejor dosis que permite rehabilitar suelos sódicos.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. SUELOS DEL VALLE CHANCA Y

Son suelos sin perfil desarrollado y generalmente estratificado, responden a dos orígenes distintos: los aluviales jóvenes que representan el 96.9 por ciento de la superficie y los eólicos, que cubren el 3.1 por ciento del área total. Los suelos aluviales son de perfil estratificado sin desarrollo edafogénico, se caracterizan por su gran desorden estratigráfico sobre el cual se sobrepone las sedimentaciones o el colmataje efectuado por los aluviones y el riego, a base de materiales moderadamente finos o finos y calcáreos; varían considerablemente en profundidad y textura, ligeros y superficiales hasta profundos y pesados. En algunos casos han sido influenciados por procesos hidromórficos (empantanamiento), que se presentan acompañados de características halomórficas (salinidad), en especial en la parte baja del valle que presenta una topografía plana o depresionada, carente de un adecuado sistema de drenaje. Los suelos eólicos presentan un perfil compuesto de sedimentos marinos no consolidados del cuaternario además de materiales arrastrados por el viento, son suelos esqueléticos (Garcés y Guerra 1999).

El 79 por ciento del área cultivada presenta una conductividad eléctrica por debajo de 4 dS/m, es decir que son suelos normales. Más del 10 por ciento del área es ligeramente salina (menos de 8 dS/m); cerca del 11 por ciento presenta serios problemas de salinidad. Gran parte del área es libre de sodio; sin embargo, cerca del 10 por ciento muestra problemas de sodificación (sodio intercambiable mayor al 15 por ciento de la capacidad total de intercambio). Con referencia a las condiciones salinas sódicas, el 77.3 por ciento de los suelos son normales; los suelos salinos sódicos representan el 7.2 por ciento del área total (Garcés y Guerra 1999).

2.2. ORIGEN DE LA SALINIDAD

Parte de las sales del suelo procede de la meteorización de los minerales que constituyen la corteza terrestre. Por lo general, estas sales procedentes de la meteorización son arrastradas por el agua, que las conduce al mar o se acumulan en las depresiones (Fuentes 1999).

Las sales acumuladas en el suelo producen efectos osmóticos, tóxicos y desbalance nutricional en las plantas. Asimismo, degradan las propiedades físico-químicas y biológicas del suelo. La salinidad de los suelos no es una causa, sino una consecuencia de una serie de factores como:

- Problemas de mal drenaje en diferente grado.
- Mala calidad de agua.
- Escasa disponibilidad de agua de riego.
- Composición química y mineralógica del material madre.
- Tolerancia de las plantas a las sales.
- Aptitud de los suelos para el riego.
- Características hidrodinámicas.
- Problemas de inundación (Zeña 2003)

El origen de la salinización en el valle Chancay se debe al agua de riego, ya que todas las aguas de riego, incluso las de excelente calidad tienen sales solubles, sumados a la baja eficiencia del riego en el valle, las siembras exageradas de los cultivos de arroz y caña de azúcar y al insuficiente sistema de drenaje (García 2003).

Existen suelos salinos con un tipo de salinidad primaria debido a la presencia de sales en el material parental del suelo. Bien porque las rocas de las que proceden tienen sales, o porque estos materiales se han sedimentado en un ambiente salobre. Otros suelos salinos se han formado por un proceso de salinización secundaria, producido al alterarse los balances de agua y de sales del suelo. Frecuentemente por la transformación de tierras de secano en regadío. Una primera causa de la salinización secundaria es la redistribución de sales como consecuencia de la introducción del riego y aumento de la percolación: zonas altas con buen drenaje pierden sales que se acumulan en las áreas más bajas, que frecuentemente tienen drenaje restringido; sin embargo, otras dos son causas principales de la salinización secundaria de los suelos regables: la aportación de sales con el agua de riego y la

acumulación de sales en los horizontes más superficiales del suelo por elevación capilar del agua freática, que en zonas áridas y semiáridas suele tener una salinidad elevada (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación 2006).

Durante la estación de riego y el periodo de lluvias, generalmente el riesgo de salinización del suelo es muy pequeño, porque el agua infiltrada fluye a través de la zona radicular y percola hacia las capas más profundas, si existe drenaje interno del suelo; sin embargo, en climas secos, durante el periodo de barbecho el ascenso capilar causa un flujo ascendente de agua con sales desde el subsuelo o directamente del acuífero freático si se encuentra a poca profundidad. Por ello, en las zonas áridas generalmente se observa una fuerte salinización de suelos baldíos, por ejemplo en las orillas de canales, caminos, etc (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación 2006).

2.3. SUELO SALINO

Contienen en la zona radicular una cantidad de sales disueltas en la solución del suelo suficientemente alta (elevada CE_e) para restringir el desarrollo de los cultivos. La reacción de estos suelos va de neutra a ligeramente alcalina. El pH puede variar entre 7 y menos de 8.5. El PSI se mantiene por debajo de 7, por lo que la estructura del suelo no se ve afectada (Pizarro 1978).

Durante mucho tiempo se ha aceptado como límite de la CE_e para definir si un suelo es salino o no, el valor de CE_e = 4 dS/m. De acuerdo con esto, se considera no salino todo suelo que tenga una CE_e < de 4 dS/m; sin embargo los suelos con 3 dS/m pueden ocasionar pérdidas de producción importantes en varios cultivos como lechuga, pimiento que perderían hasta el 25 por ciento de su producción. Vemos por tanto lo inadecuado de una clasificación que no considera salinos a los suelos cuya salinidad puede ocasionar pérdidas del 25 por ciento. Por esa razón, adoptamos como límite el valor de CE_e = 2 dS/m/cm (Pizarro 1978).

Un estudio riguroso de la tolerancia de las plantas a la salinidad debería considerar no solamente las cantidades totales de sales, sino también su composición, fase de la planta, tipo de suelo, estado de humedad, etc. Aunque se han realizado numerosos experimentos, no se dispone de unos resultados sistemáticos completos. Por tanto se ha seleccionado la

información más útil desde el punto de vista de quien ha de explorar o recuperar suelos salinos (Cuadro 1) (Pizarro 1978).

Cuadro 1: Valores de CEe y su relación con sus efectos sobre los cultivos

CEe (mmhos/cm)	Efectos
0-2	Despreciables
2-4	Rendimiento restringido en cultivos sensibles.
4-8	Rendimientos restringidos en la mayoría de los cultivos.
8-16	Rendimientos satisfactorios solo en cultivos tolerantes.
>16	Muy pocos cultivos dan rendimientos satisfactorios.

FUENTE: Pizarro (1978)

Casi siempre se reconocen por la presencia de costras blancas en su superficie. Con un drenaje adecuado se pueden eliminar las sales solubles por medio de lavados, con lo que el suelo pasa a ser normal. Estos suelos casi siempre se encuentran floculados, debido a la presencia de un exceso de sales en la solución y al reducido PSI. En consecuencia, su permeabilidad es igual o mayor a la de suelos no salinos (Pizarro 1978).

Como concepto fundamental debe quedar claramente entendido, que los suelos salinos afectan a los cultivos, provocando la disminución de la producción, En cambio no tienen efecto perjudicial sobre las propiedades del suelo (Pizarro 1978).

Suelos salinos son aquellos que contienen suficiente sal soluble para reducir su productividad y que no son alcalinos; es decir, suelos cuyo pH no es igual ni superior a 8.5 y cuya cantidad de sodio presente es tal, que no interfiere en el crecimiento de las plantas (se considera que el nivel crítico de sodio en este aspecto es de 15 por ciento de la capacidad de intercambio catiónico). Estos suelos son comunes en regiones áridas y semiáridas, el resultado del proceso de salinización, es la acumulación de sales en los suelos. Este último fenómeno también puede tener lugar en regiones próximas a las costas marinas, debido a la intrusión del agua de mar, la que por evaporación repetida deposita sales en cantidades perjudiciales (Fassbender y Bornemisza 1994).

La cantidad total de sales solubles, expresada como sólidos disueltos totales (STD), se utiliza para medir la salinidad del agua o de un extracto de la solución del suelo, ya que existe una relación directa entre este parámetro y el potencial osmótico de la solución del suelo; sin embargo por la rapidez de su determinación, se utiliza habitualmente la conductividad eléctrica (CE), dada la relación existente entre el contenido salino de una solución y su capacidad para transmitir la corriente eléctrica. La unidad de medida es dS/m, equivalente al mmho/cm anteriormente utilizado (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación 2006).

En la caracterización del agua o de un extracto de suelo es preciso además determinar su composición iónica, ya que, tanto desde el punto de vista de la toxicidad específica de determinados iones, como del efecto del sodio sobre la estabilidad de la estructura del suelo, no es lo mismo que la sal dominante sea cloruro sódico o sulfato cálcico, aunque la cantidad de sólidos disueltos sea la misma. Los principales aniones presentes en la solución del suelo son Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- y si el pH es mayor de 8.3 suele estar presente CO_3^{2-} . Los principales cationes son Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y en menor proporción K^+ (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación 2006).

La salinidad de los suelos puede observarse directamente en períodos de alta evaporación por la presencia de manchas blancas en la superficie del suelo e incluso por la formación de costras de sal. En áreas cultivadas, la irregularidad de los cultivos y la presencia de áreas desprovistas de vegetación denotan la presencia de sales en el suelo. Los tallos y hojas de cereales como la cebada y el trigo, aún siendo tolerante a la salinidad, muestran tonos azulados que no existe en plantas cultivadas sobre suelos normales, la presencia de plantas halófitas tales como especies de los géneros *Salicornia*, *Suaeda* y *Atriplex*, entre otras, denotan la existencia de suelos salinos (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación 2006).

Los suelos afectados por salinidad suelen presentar superficialmente costras salinas e incluso pequeñas protuberancias sobre el terreno. La posición de la acumulación de sales en el perfil depende del tipo de salinización. Si esta se debe a la elevación capilar de agua freática, la parte superior del perfil muestra una alta salinización en periodos de alta demanda evaporativa. Si las sales son aportadas por el agua de riego y no hay suficiente percolación para lavar totalmente las sales incorporadas, estas se acumulan en el subsuelo, ya que el factor de concentración de la salinidad aumenta con la profundidad. Los suelos salinos se

clasifican según distintos intervalos de CEe, según la tolerancia de los cultivos a la salinidad y las posibilidades de recuperación, siendo frecuentemente utilizados los siguientes intervalos: 0-4, 4-8, 8-12, 12-16 y CEe > 16 dS/m (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación 2006).

Se denominan suelos salinos a aquellos cuya solución del suelo contiene sales solubles, en tal cantidad que la absorción de agua por las raíces de las plantas está limitada por el aumento del potencial osmótico debido a la salinidad. Inicialmente se consideraron suelos salinos aquellos que tenían un valor de la CEe superior a 4 dS/m (Richards, 1954). Posteriormente se ha rebajado este umbral hasta el valor de 2 dS/m, ya que muchos cultivos son sensibles a la salinidad en el intervalo entre 2 y 4 dS/m. Las sales dominantes en los suelos salinos son NaCl, Na₂SO₄ y CaSO₄. En los suelos yesosos no salinos, la sal dominante es el CaSO₄·2H₂O, cuya solubilidad causa una CEe de alrededor de 3 dS/m (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación 2006).

2.4. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

La determinación de la salinidad se basa en la creación de un campo eléctrico en el suelo y en la posterior medida de la resistencia al paso de la corriente. El problema radica en que la resistencia medida depende no solamente de la salinidad del suelo sino de su contenido de humedad. Por ello, son útiles especialmente para medir la salinidad y controlar su evolución en el tiempo, si las medidas se hacen con un contenido de humedad más o menos constante (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación 2006).

2.5. EFECTO DE LA SALINIDAD SOBRE LAS PLANTAS

Las sales disueltas en la solución del suelo afectan a las plantas a través de dos mecanismos diferentes: mediante un aumento de la presión osmótica y por su efecto tóxico. A medida que aumenta la concentración salina de la solución del suelo, aumenta la presión osmótica y llega un momento en que las raíces de las plantas no tienen la fuerza de succión necesaria para contrarrestar esa presión osmótica y, en consecuencia, no absorben agua del suelo desarrollando el carácter de halofitismo en las plantas. El otro mecanismo por el que las sales afectan el desarrollo de las plantas es la toxicidad, al parecer la toxicidad de las sales no es

debido al efecto directo de sus iones, sino a que estos inducen alteraciones en el metabolismo, ocasionando acumulación de productos tóxicos (Pizarro 1978).

El efecto principal de las sales solubles en las plantas es osmótico, ya que los altos niveles de sal impiden que las plantas obtengan agua para su crecimiento. Entonces desde el punto de vista de la ósmosis es más difícil de extraer agua de las soluciones cada vez más salinas. Las plantas que crecen en medio salino incrementan, en cierta forma sus concentraciones osmóticas internas mediante la producción de ácidos orgánicos o por absorción de sales (Bohn *et al.* 1993).

Al aumentar la concentración de sales en la solución del suelo se incrementa el potencial osmótico y, como consecuencia de ello, las plantas necesitan hacer mayor esfuerzo de succión para absorber agua. Cuanto mayor sea la concentración salina de la solución del suelo, mayor será el esfuerzo de succión, pudiendo llegar un momento en que la absorción de agua se detiene, aunque todavía haya agua disponible (Fuentes 1999).

La salinidad de la zona radicular afecta la absorción de humedad por los cultivos por lo tanto repercute en el rendimiento de las cosechas. La tolerancia a la salinidad depende de cada cultivo e incluso de las variedades de un mismo cultivo. Cada planta tiene un umbral de tolerancia a la salinidad, que puede expresarse en términos de CE_e. Hasta que la salinidad media de la zona radicular no alcanza este umbral, el rendimiento no se ve afectado por la salinidad del suelo. Una vez rebasado el umbral, el rendimiento disminuye proporcionalmente al incremento de la salinidad, según una relación lineal que también es específica de cada cultivo. La relación lineal obtenida por Mass y Hoffman (1977), quienes “no consideraron el efecto perjudicial de iones específicos”, la ecuación lineal es la siguiente:

$$Y = 100 - b (CE_e - a)$$

Siendo:

Y = Rendimiento relativo del cultivo.

b = Pendiente de la relación entre el porcentaje de pérdida de rendimiento y la CE en dS/m.

CE_e = Conductividad eléctrica de la pasta saturada del suelo (dS/m).

a = Umbral de salinidad expresado en términos de CE (dS/m) (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación 2006).

2.6. EFECTO DE LA SALINIDAD SOBRE EL SUELO

El efecto principal de la salinidad sobre el suelo consiste en su acción sobre la estructura. Esta propiedad depende de la floculación de los coloides y de la cementación de los mismos formando agregados. Por esta razón los efectos son tanto más pronunciados cuanto mayor es el contenido de coloides, es decir, cuanto más arcilloso es el suelo. Las fuerzas de atracción entre las partículas arcillosas dependen mucho de la naturaleza de los cationes adsorbidos. Los cationes divalentes y trivalentes que son atraídos más fuertemente que los monovalentes, dando lugar a agregados mayores y, en consecuencia, a una mejor estructura. En los suelos normales, el calcio es el catión más abundante en el complejo de cambio y los suelos mantienen su estructura (Pizarro 1978).

El efecto de las sales sobre las propiedades físicas de los suelos es positivo, ya que permite la floculación, en lo que refiere a los efectos químicos, estos dependen de los iones presentes. Se sabe que los excesos de iones pueden causar toxicidad (Fassbender y Bornemisza 1994).

Los coloides del suelo están afectados por fuerzas de atracción y otras de repulsión. Cuando predominan las primeras los coloides floculan y se forman agregados, con poros de gran tamaño que facilitan la circulación del aire y el agua. Cuando predominan las fuerzas de repulsión los coloides se dispersan, los agregados se desmoronan y las partículas dispersadas taponan los poros, con lo cual disminuye la porosidad, el aire y el agua circulan con dificultad (Fuentes 1999).

2.7. SUELO SÓDICO

Los suelos sódicos casi siempre tienen una estructura densa, en bloques y de un solo grano; son duros para laborarse cuando están secos y poseen baja conductividad hidráulica cuando están mojados (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América 1962).

Son aquellos cuyo porcentaje de sodio intercambiable es mayor de 15 y la conductividad del extracto de saturación es menor de 4 dS/m a 25 °C. El pH generalmente varía entre 8.5 y 10. Estos suelos corresponden a los llamados álcali negro. Con mucha frecuencia se encuentran en las regiones áridas y semiáridas en áreas pequeñas e irregulares conocidas como manchas de álcali impermeables. Siempre que en los suelos o agua de riego no se encuentre yeso, el

drenaje y lavado de los suelos salinos sódicos conduce a la formación de suelos sódicos no salinos. La eliminación del exceso de sales en este tipo de suelos tiende a aumentar el grado de hidrólisis del sodio intercambiable, lo cual frecuentemente eleva el valor de pH. En los suelos altamente sódicos, la materia orgánica dispersa y disuelve pudiendo depositarse en la superficie debido a la evaporación, causando así un ennegrecimiento y dando origen al término álcali negro (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América 1962).

Después de un largo tiempo, los suelos sódicos no salinos adquieren características morfológicas peculiares. Debido a la gran dispersión de la arcilla parcialmente saturada con sodio, esta puede ser transportada hacia abajo, acumulándose en los niveles inferiores y como resultado, unos cuantos centímetros de suelo superficial pueden presentar textura relativamente gruesa y quebradiza, aunque más abajo, donde se acumula la arcilla, el suelo puede desarrollar una capa densa y de baja permeabilidad, con estructura prismática o columnar (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América 1962).

El sodio intercambiable en un suelo sódico no salino puede tener una marcada influencia en sus propiedades físicas y químicas, al aumentar el sodio intercambiable, el suelo tiende a ser más disperso y el pH aumenta a veces hasta el valor de 10. La solución del suelo en suelos sódicos no salinos, es relativamente baja en sales solubles, tiene una composición que difiere considerablemente de la de los suelos normales y de los salinos. Mientras los aniones presentes consisten en su mayor parte de cloruros, sulfatos y bicarbonatos, también pueden presentar pequeñas cantidades de carbonatos. A pH muy elevado y en presencia del anión carbonato, el calcio y el magnesio precipitan; de manera que la solución del suelo, de los suelos sódicos no salinos, contienen pequeñas cantidades de estos cationes, predominando el sodio (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América 1962).

Los suelos sódicos contienen en la zona radicular suficiente sodio adsorbido en el complejo de cambio para desarrollar propiedades físicas y químicas desfavorables, restringiendo el normal crecimiento de las plantas. La reacción de estos suelos varía según el PSI y la presencia o ausencia de carbonato o bicarbonato. El pH va desde 8 hasta más de 9.5. El contenido de sales de estos suelos es generalmente bajo ($CEe < 2 \text{ dS/m}$) (Pizarro 1978).

Los suelos son sódicos cuando el catión sodio contribuye con un porcentaje igual o superior al 15 por ciento de la CIC. El porcentaje de sodio intercambiable se calcula con la siguiente fórmula:

$$\text{PSI} = \frac{\text{Na}^+ \text{ intercambiable}}{\sum \text{ cationes intercambiables}} \times 100$$

En suelos regados con agua que contienen bastante sodio, estos adsorben este catión gradualmente. Para estimar este problema se usa el valor de la relación de adsorción de sodio (RAS) (Fassbender y Bornemisza 1994).

Las aguas de riego con alto contenido de sodio tienden a producir suelos con altos niveles de sodio intercambiable. Dichos suelos con frecuencia, forman costras inconsistentes y se expanden o se dispersan, lo que disminuye en forma considerable la conductividad hidráulica o la permeabilidad del suelo. Las partículas de arcilla se dispersan y obstruyen los canales de flujo de agua. La disminución de la permeabilidad interfiere con el drenaje que se requiere para reducir la salinidad lo necesario para el crecimiento de los cultivos (Bohn *et al.* 1993).

Más problemáticos que los suelos salinos son los suelos sódicos, que se caracterizan por tener apenas sales solubles en la solución del suelo ($\text{CEe} < 2 \text{ dS/m}$), pero un alto contenido de sodio en el complejo de cambio ($\text{PSI} > 15$), y si predomina el carbonato sódico son también alcalinos, ya que el valor del pH es mayor de 8.2 (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación 2006).

En la superficie de los suelos sódicos suelen observarse síntomas de encharcamiento, dispersión de arcillas y materia orgánica. Si estos suelos presentan un horizonte B claramente diferenciado, la estructura puede ser prismática o columnar (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación 2006).

El inconveniente de los suelos sódicos, además de la toxicidad específica del sodio, es la dispersión de sus partículas y su inestabilidad estructural, que ocasiona disminución en la infiltración, si la sodicidad afecta a la capa laborable o crea inestabilidad de las capas

inferiores, disminuirá de la conductividad hidráulica del suelo (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación 2006).

Por su relación con la tolerancia de los cultivos también puede distinguirse varios intervalos de sodicidad, que se utilizan para caracterizar a los suelos sódicos: $PSI < 15$, 15-20, 20-30 y $PSI > 30$. En zonas con climas húmedos, donde la lluvia produce lavado, también se considera el intervalo de PSI de 5 a 10 debido a los problemas de estructura del suelo que se pueden presentar (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación 2006).

2.8. SUELOS SALINOS Y SÓDICOS

Aquellos suelos cuya conductividad del extracto de saturación es mayor de 4 dS/m a 25 °C y el porcentaje de sodio intercambiable es mayor de 15. Este tipo de suelo se forma como resultado de los procesos combinados de salinización y acumulación de sodio. Siempre que contengan un exceso de sales, su apariencia y propiedades son similares a las de los suelos salinos. Cuando hay exceso de sales el pH raramente es mayor de 8.5, y las partículas permanecen floculadas. Si el exceso de sales solubles es lavado, las propiedades de estos suelos pueden cambiar notablemente, llegando a ser idénticas a las de los suelos sódicos no salinos (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América 1962).

Aquellos suelos que en la zona radicular contienen una cantidad de sales solubles, y un PSI suficiente para restringir el crecimiento de las plantas, y como límite se adopta una $CEe > 2$ dS/m y $PSI > 7$. La reacción de estos suelos varía con su grado de solubilidad, y con la presencia de carbonatos y bicarbonatos (Pizarro 1978).

Contienen suficiente sodio intercambiable para interferir con el crecimiento adecuado de la mayoría de los cultivos; contienen igualmente, cantidades perjudiciales de sales solubles, estos suelos al igual que en los sódicos, el porcentaje de sodio en el complejo de cambio excede frecuentemente al 15 por ciento, su conductividad eléctrica es comúnmente mayor a 4 dS/m (a 25 °C). En general estos suelos tienen niveles de pH inferiores a 8.5 y sus propiedades físicas son menos problemáticas que las de los suelos sódicos, esto se debe al efecto coagulante de las sales presentes. Su apariencia es similar a la de los suelos salinos (Fassbender y Bornemisza 1994).

Generalmente los suelos salinos también tienen un contenido de sodio alto ($PSI > 15$), por lo que se denominan en este caso suelos salino-sódicos; sin embargo son moderadamente neutros o ligeramente alcalinos ($7 < pH < 8.5$) (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación 2006).

2.9. EFECTOS DE LA ALCALINIDAD

Altos porcentajes de sodio adsorbidos al complejo coloidal del suelo, es decir elevados niveles de PSI tienen efectos severos sobre el deterioro de la estructura del suelo y, por lo tanto, en la capacidad del medio poroso de transferir fluidos. En los suelos alcalinos, el sodio tiene una marcada influencia en las propiedades físico-químicas, al incrementarse el sodio intercambiable en la cubierta iónica del complejo coloidal del suelo, los fenómenos de dispersión coloidal determinan la destrucción del estado estructural del suelo. La reacción del suelo por otra parte se incrementa a valores mayores de 10. La solución del suelo en estas condiciones, aunque relativamente bajo en sales solubles, tiene una composición que difiere considerablemente de los suelos no salinos y no alcalinos. Mientras que los aniones presentes consisten en su mayor parte de cloruros, sulfatos y bicarbonatos, presentan también pequeñas cantidades de iones carbonato. A pH muy elevado y en presencia de iones carbonato, el calcio y el magnesio precipitan, de manera que las soluciones de estos suelos contienen solo pequeñas cantidades de estos cationes, predominando el sodio. Grandes cantidades de potasio intercambiable y potasio soluble se pueden presentar en estos suelos (Hurtado 2003).

Con mucha frecuencia los suelos sódicos se encuentran en las regiones áridas y semiáridas. La eliminación del exceso de sales y la ausencia de yeso, aumenta el grado de hidrólisis del sodio intercambiable. La materia orgánica dispersa y disuelta se deposita en la superficie de las fracciones mecánicas arenas y limos, oscureciendo al suelo (Hurtado 2003).

2.10. CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO

En la formación de complejos superficiales los enlaces electrostáticos con iones totalmente hidratados, son los responsables de la adsorción no específica, con formación de complejos de superficie de esfera externa y de la existencia de un enjambre de iones en la interfase sólido-líquido que neutralizan las cargas de superficie, sin tener una localización fija en dicha interfase. Los cationes están sometidos, por un lado a la atracción del campo eléctrico creado por la superficie cargada y, por otro, tienden a difundir desde la superficie hacia la

solución al existir un gradiente de concentración. La superficie de la partícula cargada (carga negativa) y los iones de signo contrario (carga positiva) constituyen una doble capa eléctrica difusa (Porta *et al.* 2003).

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) de una muestra de suelo, o de alguno de sus componentes, expresa el número de moles de carga positiva adsorbida que pueden ser intercambiados por unidad de masa seca, bajo condiciones dadas de temperatura, presión, composición de la fase líquida y una relación de masa solución dada. La CIC de un mineral depende de la cantidad de carga superficial y de superficie específica. La CIC de los principales coloides del suelo evidencian grandes diferencias unos de otros debido al distinto origen de la carga. Los valores propuestos por diferentes autores de forma orientativa son los siguientes (Porta *et al.* 2003).

Cuadro 2: Capacidad de intercambio catiónico de diferentes materiales coloidales

Componente	CIC cmol(+)kg ⁻¹	Componente	CIC cmol(+)kg ⁻¹
Arena	0	Clorita	10-40
Caolinita	1-10	Esmectita	80-150
Halloysita 2H ₂ O	5-10	Vermiculita	120-150
Halloysita 4H ₂ O	40-50	Alofana	10-150
Palygorskita	5-30	Limo	Escasa
Illita	10-40	Mica	0
Glauconita	5-40	Materia orgánica	100-300

FUENTE: Porta *et al.* (2003)

Se han realizado muchos estudios sobre la forma de expresar matemáticamente los procesos de intercambio de cationes. Un enfoque se ha denominado “ecuación de Kerr”, en el cual la forma más general de cambio se representa por una ecuación de acción de masas. Para esto se tiene la reacción de cambio siguiente:



Este equilibrio se puede expresar de la siguiente forma:

$$K = \frac{[Na^+]^2 (Ca^{2+})}{[Ca^{2+}] (Na^+)^2}$$

En esta ecuación, los corchetes indican iones adsorbidos en el complejo, y los paréntesis indican los iones libres en solución (Fassbender y Bornemisza 1994).

La capacidad de intercambio catiónico es la cantidad máxima de cationes que puede adsorber la unidad de masa de un suelo. Por consiguiente, nos interesa medir la capacidad de adsorción en una unidad que exprese, de alguna forma, el número de lugares de adsorción, que sean manejables y comprensibles, por cuyo motivo la capacidad de intercambio se expresa en miliequivalentes por 100 gramos de suelo seco. Actualmente se expresa en centimoles de carga positiva por kg de suelo (Fuentes 1999).

La existencia de superficies cargadas negativamente exige que haya iones de signo contrario, relacionados con tales superficies, para que se cumpla con el principio de electronegatividad del sistema. Los cationes solvatados, al ser adsorbidos en la superficie, forman complejos de superficie de esfera externa que resultan menos estables que los de esfera interna, ya que no pueden establecer fácilmente enlaces iónicos o covalentes entre el grupo central y el ligando, por lo que son intercambiables (Porta *et al.* 2003).

2.11. NATURALEZA COLOIDAL DEL SUELO

Los coloides del suelo están afectados por fuerzas de atracción y otras de repulsión. Cuando predominan las primeras los coloides flocculan y se forman agregados, con poros de gran tamaño que facilitan la circulación del aire y el agua. Cuando predominan las fuerzas de repulsión los coloides se dispersan, los agregados se desmoronan y las partículas dispersadas taponan los poros, con lo cual disminuye la porosidad. El aire y el agua circulan con dificultad (Fuentes 1999).

Básicamente el espesor de la doble capa eléctrica difusa depende de la concentración de electrólitos y de la valencia de los cationes presentes (concentración elevada de electrólitos, disminuye la tendencia de los cationes a difundirse en la solución externa) y la presencia de cationes de alta valencia (mayor fuerza de atracción y retención de la superficie coloidal negativa), llevan a una reducción del espesor de la capa difusa. Bajo estas condiciones dos

partículas coloidales en suspensión acuosa pueden interaccionar sus dobles capas difusas dando lugar a fenómenos de atracción y repulsión coloidal. Cuando predominan fuerzas de repulsión se produce el fenómeno electrocinético de la dispersión coloidal, característica de los suelos alcalinos, afectados por sodio. En cambio si predominan las fuerzas de atracción se produce el fenómeno de floculación coloidal, requisito fundamental para la agregación mecánica de las partículas y por tanto para la formación del estado estructural de los suelos (Pizarro 1978).

2.12. RECUPERACIÓN DE SUELOS SALINOS-SÓDICOS

Allison (1952) hizo estudios sobre la estructura de suelos salinos y alcalinos. Menciona que para mejorar la estructura del suelo, cuando existe un alto contenido de sodio intercambiable, primero es necesario reemplazar el exceso de sodio adsorbido y luego lavarlo de la zona de raíces. A veces el lavado sin enmienda puede ser suficiente, si es que hay calcio y magnesio en estado aprovechable en el agua de riego o si el yeso está presente en el suelo. Generalmente, es necesario agregar calcio soluble para reemplazar al sodio adsorbido. Esto se logra aplicando yeso o, si el suelo es calcáreo, aplicando productos ácidos en solución o formando productos ácidos.

Arrunátegui (1996) trabajó en macetas con suelos salinos, ha los que sometió en algunos casos a lavado y en otros a lavados y tratamientos adicionales con yeso. Encontró que los suelos muy salinos sometidos al lavaje, a partir de una profundidad de 30 cm manifestaban características de un suelo salino-sódico, lo que es necesario tener en cuenta para su mejoramiento. En los suelos tratados con yeso el consumo de agua por las plantas es superior, y los suelos lavados favorecieron la germinación y el desarrollo de la planta.

Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América (1962) recomienda que el mejoramiento de los suelos salinos y sódicos debe evaluarse mediante la respuesta del desarrollo de las plantas, análisis de los suelos y determinaciones de la velocidad de infiltración.

Fassbender y Bornemisza (1994) indicaron que la recuperación de suelos sódicos consiste en el cambio del sodio en el complejo coloidal, por otro catión. Este proceso comúnmente

requiere tiempo. Se pueden escoger diferentes procedimientos, y depende de las características propias del suelo. Las sustancias que se pueden aplicar son de tres tipos.

- a. Sales de calcio (cloruro de calcio y el yeso).
- b. Sales de calcio con baja solubilidad (cal agrícola y residuos industriales).
- c. Ácidos o sustancias que producen ácidos (flor de azufre, ácido sulfúrico, sulfato de hierro o de aluminio).

Ferrer (1995) trabajó sobre suelos salinos en la hacienda San Antonio – Cañete. Aplicó tres riegos de 24 horas cada uno. Después de los riegos, encontró que había eliminado los cristales de las sales y la estructura del suelo era granular (ya no masiva), fácilmente laborable y de color gris claro. También encontró que disminuyó la concentración de sales solubles en el perfil del suelo.

Fuentes (1999) indicó que la única manera efectiva de eliminar las sales del suelo es mediante la lixiviación o lavado de sales, que consiste en hacer pasar una cierta cantidad de agua a través del perfil del suelo. Los lavados tienen por finalidad reducir la elevada salinidad inicial o impedir que el suelo se salinice como consecuencia de aportaciones salinas contenidas en el agua de riego o en napas freáticas salinas próximas a la superficie. El lavado no arrastra el sodio adsorbido en el suelo; pero puede ser contraproducente, ya que al arrastrar otras sales disminuye la concentración salina de la solución del suelo, lo que aumenta el efecto dispersante del sodio; sin embargo la recuperación de suelos sódicos requiere la adición de mejoradores que aporten calcio, o que sean ácidos o generadores de ácidos. El calcio y el hidrógeno desplazan al sodio del complejo de cambio, quedando unos compuestos de sodio muy solubles, que posteriormente se sacan del suelo mediante lavado.

Guevara (1968) trabajó en la recuperación de suelos salinos-sódicos, en parcelas con tratamiento de 29 t/ha y 49 t/ha de yeso y un testigo. Utilizó agua de pozo. Encontró aumento en la infiltración con la aplicación de yeso, desalinización del perfil del suelo en todos los niveles hasta el segundo riego (60 cm de lámina de agua) y luego salinización en otros riegos, pero en la repetición encontró salinización para todos los riegos. No encontró influencia marcada del yeso en el porcentaje de sodio cambiante.

Pizarro (1978) indicó que la recuperación de los suelos salinos tiene por finalidad reducir la concentración de sales solubles y la técnica a aplicar en este caso es el lavado de las sales.

Por otro lado si el problema de contaminación del suelo es por exceso de sodio intercambiable, el fin es reducir el sodio adsorbido a niveles que permitan recuperar las propiedades físico-químicas del suelo, lo cual se consigue mediante la aplicación de mejoradores químicos. Estas dos técnicas se consideran como fundamentales en la recuperación de estos suelos. Existen además, técnicas auxiliares las cuales permiten aumentar la eficiencia de las técnicas básicas. Así la aradura de subsoleo, la aplicación de arena, la inversión del perfil, los abonados orgánicos y la mejora del drenaje natural permiten en muchos casos, seguir explotando agrícolamente los suelos afectados por exceso de sodio intercambiable.

López *et al.* (2003) utilizaron columnas de suelo para disminuir el porcentaje de sodio intercambiable de 49 por ciento a valores inferiores a 15 por ciento, estas fueron llenadas con suelo hasta una altura de 15 cm, que es la profundidad de restauración deseada. El suelo empleado fue caracterizado y tamizado en 4 mm. Se incorporó yeso comercial (CaSO_4) en la superficie del suelo dentro de las columnas. A las columnas denominadas 3 y 4 se les incorporó la mitad de la dosis requerida de yeso (6 g). En cambio, en la columna 5 se incorporó la dosis total de yeso calculada (13 g). El yeso fue calculado en la proporción necesaria para disminuir el PSI a los valores propuestos. En este ensayo se realizó también un control de los lixiviados a fin de observar el cambio en las propiedades del suelo, tanto en su parte física a través de una mejor permeabilidad, como en la parte química a través del intercambio de cationes. En los tres casos se logró disminuir el porcentaje de sodio intercambiable. La eficacia de la enmienda es mayor en la quinta columna, ya que, en ella, el PSI es 8,68 por ciento, teniendo en cuenta que en esta columna se utilizó la totalidad de enmienda calculada. En los lixiviados analizados se encontró que existe una mayor concentración del catión sodio, que es el que se desea reemplazar y que está asociada directamente a los sulfatos incorporados en la enmienda.

Después del lavado inicial es preciso restaurar la fertilidad del suelo y aumentar el contenido de materia orgánica de la capa laborable, para ello es aconsejable el cultivo de plantas forrajeras para ser enterradas en verde, también son recomendables otras prácticas agronómicas, como aumentar la cantidad de semilla para de esta forma lograr una mayor densidad de plantas. La fertilización hay que adaptarla al contenido de sales de la capa laborable, evitando que en las primeras fases del cultivo la concentración de sales aumente

por efecto de la aplicación de nitratos (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación 2006).

Al comienzo de la estación de riego es recomendable regar por aspersión, especialmente en suelos donde se forman costras superficiales y se acumulan sales durante los días secos, para desalinizar los primeros centímetros del suelo y así promover la nascencia de las plantas, ya que en esta fase los cultivos son más sensibles a la salinidad. Si posteriormente se riega por surcos, es necesario colocar las semillas en la pendiente del surco en lugar de colocarlas en la coronación, donde suele existir una mayor concentración de sales (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación 2006).

2.13. DRENAJE Y LAVADO DE SUELOS SALINO-SÓDICOS

Para proyectar un proceso de recuperación de un suelo salino, en primer lugar es necesario predecir la cantidad de agua de lavado que se necesita para reducir el contenido salino de cada una de las capas que constituyen la zona radicular, de forma que pueda iniciarse el cultivo de plantas tolerantes a la salinidad, para progresivamente ir ampliando el número de cultivos con plantas sensibles. El descenso de la salinidad no tiene por qué ser simultáneo en toda la zona radicular, sino ha de ser prioritaria la desalinización de la capa laborable para permitir la germinación y nascencia de los cultivos (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación 2006).

La percolación de agua correspondiente a la FL, que es necesaria para evitar la salinización secundaria de los suelos, como el agua de lavado que se requiere para recuperar suelos que ya son salinos, recargan la capa freática cuyo nivel puede ascender por efecto de esta carga, cuando el drenaje natural no existe o es insuficiente. Asimismo, para evitar la salinización debida al flujo capilar es preciso mantener el nivel freático por debajo de cierta profundidad, que depende de la textura del suelo y de la salinidad del agua freática (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación 2006).

Si los suelos no tienen suficiente drenaje interno, es preciso mejorar la estructura, porosidad y conductividad hidráulica mediante laboreo profundo y subsolado, de forma que el agua pueda percolar hacia el subsuelo evitando así la formación de capas colgadas en la parte superior del perfil del suelo. Si las tierras no tienen drenaje natural es necesario instalar un

sistema de drenaje artificial que permita la evacuación del agua de drenaje con las sales lavadas desde la zona radicular (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación 2006).

Si el drenaje natural es insuficiente para evacuar el agua de percolación con las sales lavadas y las filtraciones, el nivel freático sube hasta alcanzar la denominada profundidad crítica, comenzando el ascenso capilar desde este nivel. En este caso, se observa en la superficie del terreno exceso de agua y salinización. La única solución a este problema, tan común en las zonas áridas, es instalar un sistema de drenaje artificial (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación 2006).

Especialmente el control de las filtraciones laterales y profundas de agua salina es esencial para evitar la salinización del suelo por elevación capilar del agua freática en dichas áreas. Para ello es necesario instalar un sistema de drenaje interceptor, que en ciertos casos debe ser complementado con un sistema de drenaje subterráneo (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación 2006).

Desde el punto de vista de la eficiencia en la sustitución del sodio intercambiable, es ventajoso lavar casi todas las sales solubles antes de aplicar los mejoradores químicos; como consecuencia de los lavados, una mayor proporción del calcio que se agrega con el mejorador es adsorbido por el complejo de cambio, sin embargo el lavado excesivo de las sales disueltas puede provocar la dispersión de las arcillas haciendo al suelo menos permeable. Por esta razón, los lavados previos no deben realizarse en suelos poco permeables (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación 2006).

2.14. MEJORADORES QUÍMICOS

Los mejoradores químicos provocan la sustitución del sodio en el complejo de cambio por el calcio, que puede ser aportado por los propios mejoradores, o movilizado del existente en el suelo. La aplicación de los mejoradores es necesario cuando hay exceso de sodio, es decir para valores altos de PSI (Pizarro 1978).

2.15. YESO AGRÍCOLA

Los mejoradores químicos como yeso, azufre y caliza, se aplican normalmente “al voleo” y luego se incorporan al suelo con discos o arado, una incorporación muy completa, es de especial importancia cuando se aplica azufre para asegurar su rápida oxidación a la forma de sulfato (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América 1962).

Un elevado porcentaje de yeso se encuentra en muchos suelos de regiones áridas. En ciertos suelos, el yeso proviene de los depósitos sedimentarios de los cuales se ha originado el suelo; mientras que en otros suelos el yeso se ha formado por la precipitación de calcio y sulfato durante el proceso de salinización (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América 1962).

El contenido de yeso en suelos sódicos es de importancia, porque determinará la necesidad de aplicar mejoradores químicos a dichos suelos para su recuperación. De igual manera, cuando el yeso es muy abundante en el suelo, se puede usar agua de riego con alto contenido de sodio (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América 1962).

El yeso es el mejorador químico más utilizado, debido a su bajo precio. La sustitución del sodio combinado con el suelo se efectúan según la reacción siguiente:



La reacción está limitada únicamente por la reducida solubilidad del yeso, que a temperaturas normales es de aproximadamente 2 g/L, valor que aumenta en presencia de iones sodio y cloro en el agua y disminuye en presencia de calcio y sulfato (Pizarro 1978).

La eficiencia del yeso depende del tamaño de sus partículas. Los mejores resultados se han obtenido con el yeso que pasa por el tamiz de malla 100, equivalente a partículas de 2 mm de tamaño. Algunas experiencias muestran que la aplicación de 90 a 120 cm de agua de riego son suficientes para disolver 10 a 12 t/ha de yeso agrícola, del que un 85 por ciento pasa por el tamiz de malla 100 (Pizarro 1978).

En cuanto a la aplicación, puede extenderse directamente sobre el suelo o añadirlo al agua de riego, en el primer caso se distribuye “al voleo” y después se incorpora al suelo con discos o arado. A veces el yeso se añade en dos partes, una antes de pasar los discos y otra después,

con lo que se distribuye más homogéneamente entre la superficie y la capa superior del suelo (Pizarro 1978).

Las enmiendas de yeso suelen aplicarse fraccionadamente para mejorar inicialmente la capa laborable y proseguir paulatinamente con capas más profundas de la zona radicular, las cantidades totales varían de 5 a 20 t/ha. Si el suelo contiene carbonatos puede aplicarse también ácido sulfúrico o azufre elemental, de forma que se movilice el calcio en la solución del suelo, pero esta enmienda es generalmente más costosa y el ácido sulfúrico es difícil de manejar (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación 2006).

El sulfato de calcio por su granulometría diversa, permite una liberación gradual de sulfatos impidiendo la pérdida de estos a través de la infiltración de agua, las partículas de menor tamaño se disuelven rápidamente quedando las más grandes para una liberación posterior. Por lo tanto, existe una liberación constante de iones sulfato y calcio durante el ciclo de los cultivos. Esta característica permite usar altas dosis de azufre sin exponerse a pérdidas de nutrientes, especialmente en suelos arenosos, es muy importante saber que la eficiente acción del yeso, es porque está categorizado como un mineral blando cuyos componentes sulfato y calcio son muy solubles en contacto con el suelo y la acción del agua (www.yesoyam.com.ar 2007).

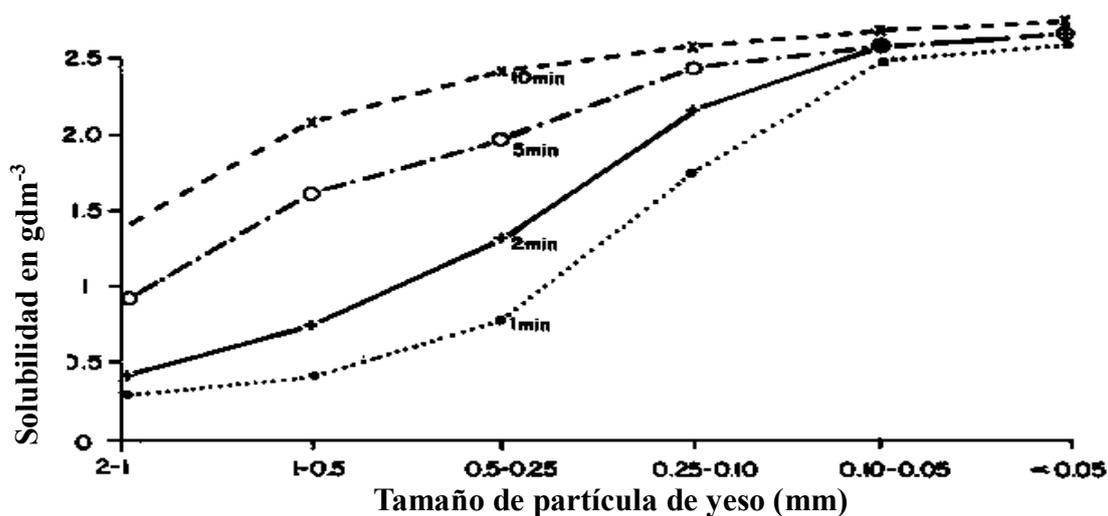


Figura 1: Solubilidad del yeso en el suelo por tamaño de partícula

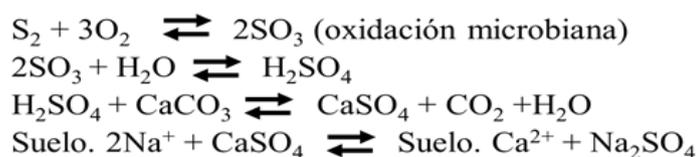
FUENTE: www.yesoyam.com.ar (2007)

Del pardo *et al.* (2015) evaluaron la incorporación de sulfato de calcio sobre las propiedades químicas y físico-químicas de un suelo de invernadero. El diseño de parcelas divididas tuvo como factor principal dosis: 0 - ½ X - X y 2X, siendo X la dosis óptima calculada a partir de la capacidad de intercambio catiónico y del sodio de intercambio, el factor secundario fue granulometría: gruesa 1-5 mm y fina < 1 mm. A los 42, 101 y 219 días desde la aplicación del yeso (DDA) se midieron Ca, K, Mg, Na, pH y CE del suelo. Se sembró el cultivo de lechuga como test biológico. El agregado de sulfato de calcio al suelo mejora las propiedades químicas y físico-químicas del suelo. El nivel de Na intercambiable disminuyó al aplicar la enmienda, la cantidad de Ca adsorbido en las micelas del suelo aumentó. El K y el Mg tienden a ser reemplazados por Ca a medida que aumentan las cantidades yeso, pero en menor proporción que el Na. El pH disminuyó por el agregado de la enmienda, llevándolo a valores que no son perjudiciales para el cultivo. La CE se incrementó, pero solo fue estadísticamente significativa a los 42 DDA y los valores alcanzados no provocaron estrés al cultivo. El rendimiento de lechuga aumentó al aplicar sulfato de calcio, bastó con la mitad de la dosis óptima para un alto rendimiento (3,5 kg.m⁻²).

El yeso agrícola es un mineral muy suave compuesto por sulfato de calcio di-hidratado (CaSO₄.2H₂O) que ha sido utilizado por los agricultores desde hace mucho tiempo. Se aplicó ampliamente como fertilizante en Europa en el siglo XVIII, incluso los griegos y los romanos lo utilizaron. Más recientemente, el yeso se ha convertido en una enmienda del suelo que ha demostrado ser capaz de recuperar suelos sódicos degradados y mejorar varias propiedades físicas del suelo (<https://www.intagri.com>).

2.16. AZUFRE

El azufre es también un mejorador químico muy utilizado, debido a su bajo precio. Antes de actuar debe experimentar algunas transformaciones como se indica a continuación:



En la primera fase de su transformación, el azufre es oxidado por acción microbiana, hasta formar H₂SO₄. Esta reacción requiere algún tiempo, que depende de varios factores, entre ellos el grado de finura del azufre (cuanto más fino, más rápidamente se transforma), la cantidad aplicada, la mezcla con el suelo y todos los factores que favorecen la actividad

microbiana. Aunque en algunas experiencias de campo en que se utilizaban dosis reducidas (2.4 t/ha), el azufre se oxidó totalmente en tres semanas, en otros casos un año después de la aplicación la oxidación era incompleta. El azufre es por lo tanto un mejorador lento. Los suelos que han recibido azufre no deben ser lavados hasta después de cierto tiempo, para permitir que ese elemento se oxide; sin embargo el suelo debe mantenerse húmedo, lo que es esencial para la acidez del suelo (Pizarro 1978).

El azufre es un mejorador que aumenta la acidez del suelo. Es especialmente indicado para suelos que contengan carbonatos alcalinostéreos, en los demás casos su aplicación hace descender el pH y puede dar lugar a una acidificación excesiva (Pizarro 1978).

La aplicación del azufre sobre el terreno es igual a la del yeso. No debe aplicarse con el agua de riego, pues podría ser lavado antes de reaccionar (Pizarro 1978).

2.17. DOSIS DE LOS MEJORADORES QUÍMICOS

El valor final a que se debe reducir el PSI es del orden de 7 – 12; aunque existen suelos con PSI más elevados sin que aparezca efectos perjudiciales. Con el objeto de establecer un criterio general, se fija en 10 el valor que debe alcanzar el PSI después de la mejora.

La dosis teórica del mejorador viene dada por la siguiente fórmula:

$$D_t = \frac{(PSI_i - PSI_f) \cdot T \cdot Pe \cdot h \cdot da}{100}$$

D_t : Dosis teórica del mejorador, en kg/ha.

PSI_i : PSI inicial en porcentaje.

PSI_f : PSI final en porcentaje.

T : Capacidad de intercambio de cationes, en meq/100 g.

Pe : Peso equivalente del mejorador.

h : Profundidad del terreno a mejorar, en cm.

da : Densidad aparente del suelo (Pizarro 1978).

2.18. CALIDAD DE AGUA DE RIEGO

No basta conocer el contenido de sales, es necesario analizar la naturaleza de estas, ya que no todas las soluciones salinas producen los mismos efectos, que dependen de su proporción

de sodio, solubilidad de sales, contenido de boro. Además de la composición química, hay que tener en cuenta los siguientes factores: el cultivo que se va a regar, el suelo, el clima y las prácticas de riego y drenaje (Pizarro 1978).

Para la evaluación del agua de riego se han propuesto numerosos índices que están agrupados a su vez en fundamentales y de menor aplicación, siendo los fundamentales la conductividad eléctrica (CE), que es una forma de expresar las sales totales, la RAS y RSC, que indican el riesgo de sodificación del suelo y el contenido de boro. Los índices de menor aplicación como CIP, que indica proporciones nocivas de cloro; el índice de Mg y la proporción de carbonatos y sulfatos (Pizarro 1978).

Un alto contenido de sales disueltas en el suelo disminuye el potencial osmótico (valor negativo del PO) y exige a las raíces un esfuerzo adicional para absorber agua, lo que ocasiona una reducción en el rendimiento de los cultivos, los cuales disminuyen casi linealmente con la concentración de sales. Por tanto, los criterios que analizan el riesgo de salinidad se basan en índices que expresan la concentración de sales del agua de riego, y de ellos el más frecuentemente utilizado es la CE del agua (Pizarro 1996).

En 1954, Richards, del U.S. Salinity Laboratory (Riverside, California) estableció la siguiente clasificación del agua de riego en función de su CE (Cuadro 3). Esta clasificación ha sido tal vez la más divulgada y extendidas de todas donde además en un gráfico se integra la CE del agua con el criterio de sodicidad (Pizarro 1996).

Cuadro 3: Clasificación del agua de riego según Richards

Clasificación.	CE (uS/cm)	Riesgo de salinización
C1	100 - 250	Bajo
C2	250 - 750	Medio
C3	750 – 2,250	Alto
C4	>2,250	Muy alto

FUENTE: Pizarro (1996)

Un alto contenido de sodio en el agua de riego puede inducir elevados valores de PSI en el suelo, con sus efectos consiguientes de pérdida de estructura por dispersión. La posibilidad de que un agua ocasione estos problemas intentó evaluarse por medio del índice RAS, donde los cationes se expresan en meq/L y cuya expresión es: $RAS = Na^+ / ((Ca^{2+} + Mg^{2+})/2)^{1/2}$ (Pizarro 1996).

La evaluación de la calidad de un agua para riego se basa inicialmente en su composición química. Esta información, que se puede referir como la calidad química del agua, si bien es de utilidad, resulta incompleta para asesorar sobre el uso que se debe dar a un agua en relación con el riego. Dado que los problemas que se pueden presentar en los suelos de regadío, no se deben exclusivamente a la composición química del agua, se hace necesario introducir el concepto de calidad agronómica del agua, que tiene en cuenta las interacciones agua-suelo. Estas deben tomarse en consideración para poder realizar predicciones en el uso de las aguas de riego, y los aspectos a considerar son: calidad química del agua, características físicas y químicas del suelo a regar, cultivo a regar, clima, método de riego, manejo del agua y condiciones de drenaje (Porta *et al.* 2003).

Si en el agua de riego predominan los bicarbonatos sobre el calcio y el magnesio, el control del contenido de bicarbonatos y carbonatos de sodio del suelo es más prioritario que la concentración total de sales solubles. El control del riesgo de sodificación de los suelos regables, mediante el incremento del riego para que exista más lavado, puede ocasionar problemas de encharcamiento, especialmente en suelos con baja infiltración. Por esta razón, en vez de aumentar el lavado, es más práctico disminuir la RAS del agua de riego mediante el incremento de su contenido de calcio, por ejemplo, disolviendo yeso. Otra alternativa es añadir yeso al suelo para aumentar el contenido en su solución (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 2006).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN DEL EXPERIMENTO

El trabajo de investigación se ejecutó en un suelo salino-sódico, ubicado en la parte baja del valle Chancay como se muestra en la Figura 2, pertenece a la comisión de regantes de Muyfinca del distrito de Mochumí, provincia y región Lambayeque, y es irrigada con el sistema de riego regulado Tinajones. El centroide del área experimental tiene las siguientes coordenadas 617440E y 9270887N, medidas en el sistema UTM-WGS-84.

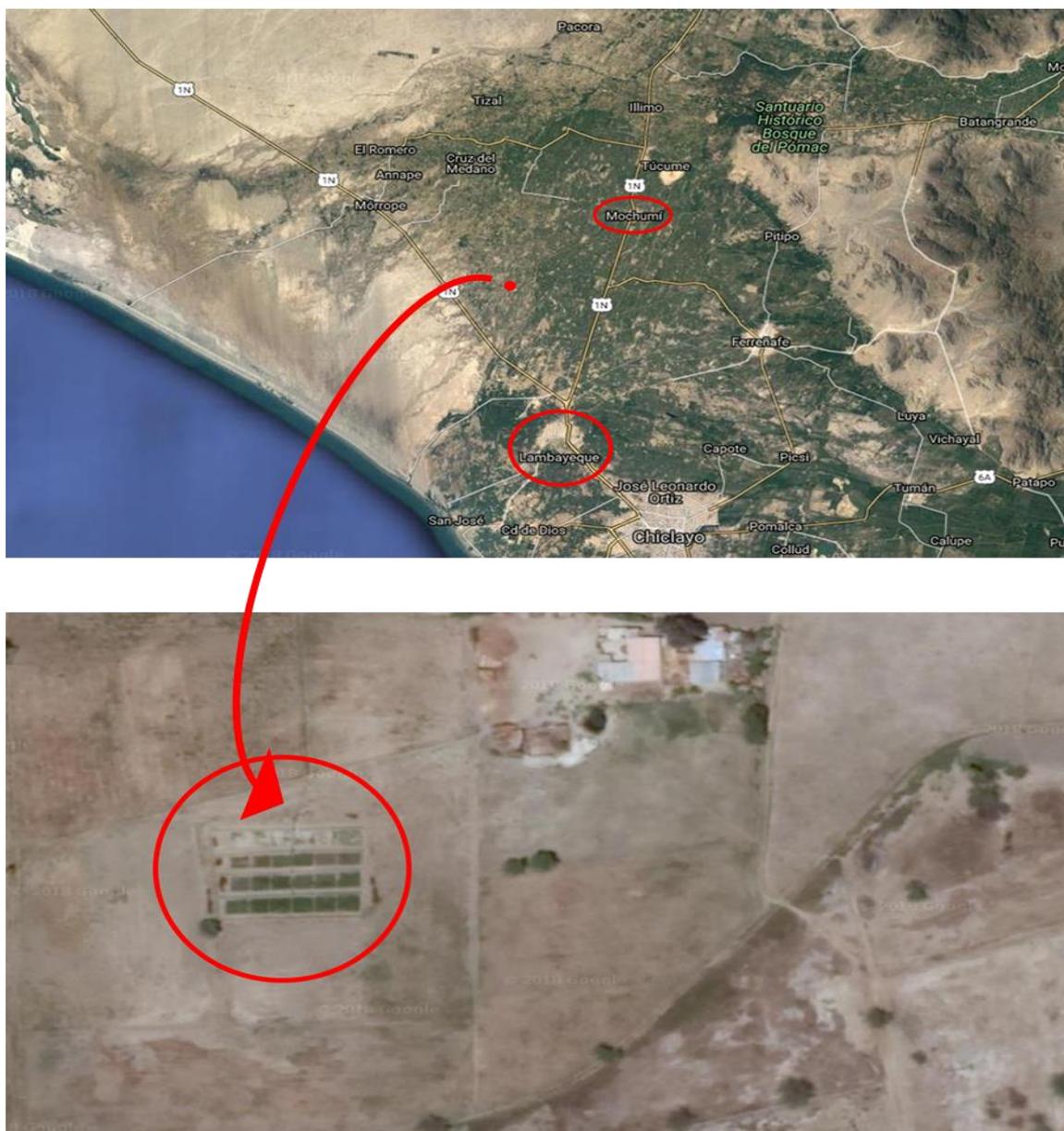


Figura 2: Ubicación del experimento, foto tomada del google maps

3.2. TRATAMIENTOS Y DISTRIBUCIÓN DE LOS TRATAMIENTOS

En la investigación se utilizaron dos mejoradores químicos, yeso agrícola, el cual se aplicaron tres dosis (YAD1=8 t/ha, YAD2= 12 t/ha y YAD3= 22 t/ha, el otro mejorador utilizado fue el azufre polvo seco, se aplicaron dos dosis (AD1= 4 t/ha y AD2= 6 t/ha), más un tratamiento testigo. Fueron un total de seis tratamientos los que se muestran en el Cuadro 4, Adicionalmente a cada tratamiento se aplicó estiércol a razón de 20 t/ha.

Las dosis de yeso agrícola, fueron calculadas en función al mayor PSI de los tratamientos, correspondiendo la dosis más alta al mayor valor de PSI y la dosis más baja corresponde al menor valor de PSI. Las dosis de azufre fueron consideradas de referencias bibliográficas.

El área experimental fue de 1050 m², se dividió en cuatro bloques y cada bloque se dividió en seis tratamientos, siendo un total de 24 parcelas de 25 m² cada una (5 x 5), la distribución de los bloques y tratamientos se muestran en la Figura 3. Las parcelas de los bloques se dividió con bordos construidos con el mismo suelo, y los bloques fueron divididos por un sistema de drenaje artificial de un metro de profundidad y de un ancho de fondo de 0.5 m, tal como se muestra en la Figura 4.

La investigación fue de tipo experimental y para cada evaluación se tomaron muestras de suelo, las muestras fueron extraídas en puntos diferentes del área de los tratamientos, lo cual pudo influenciar en la variabilidad de los resultados.

Cuadro 4: Tratamientos del ensayo experimental

Tratamiento	Descripción
A D1	azufre / 4 t ha ⁻¹
A D2	azufre / 6 t ha ⁻¹
Tg	testigo
YA D1	yeso agrícola / 8 t ha ⁻¹
YA D2	yeso agrícola / 12 t ha ⁻¹
YA D3	yeso agrícola / 22 t ha ⁻¹

FUENTE: Elaboración del autor

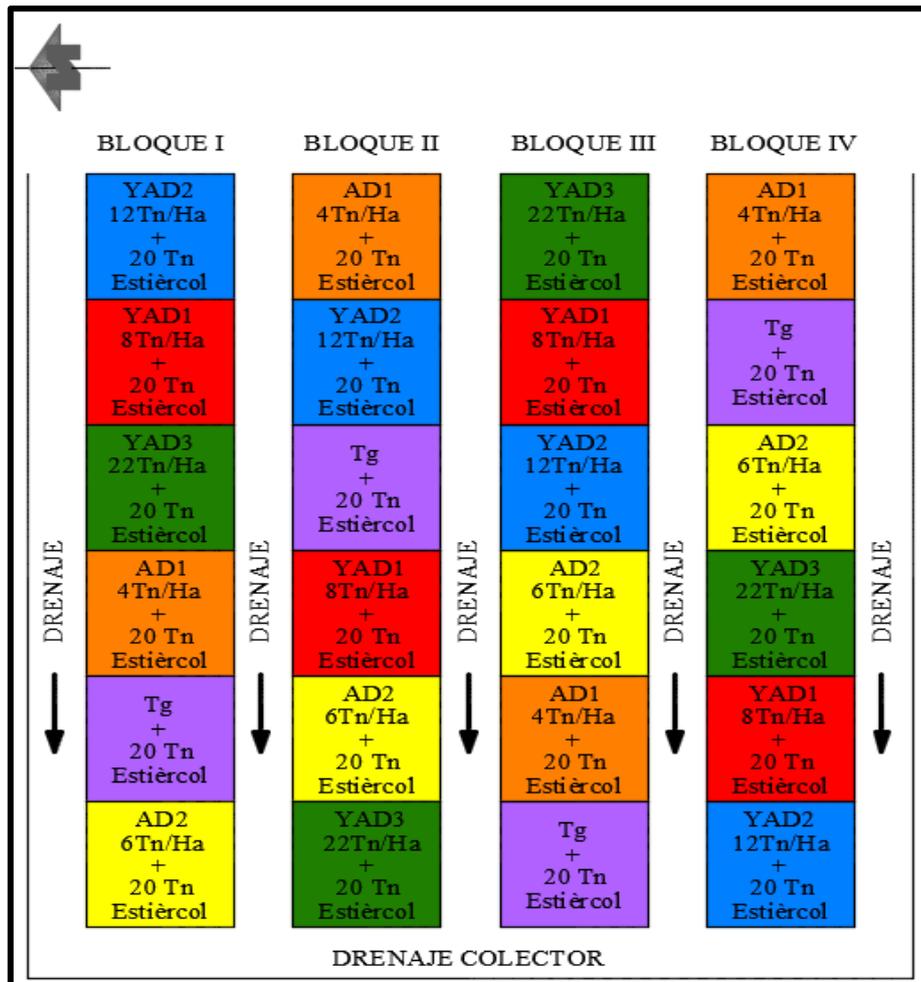


Figura 3: Croquis de distribución de bloques y tratamientos



Figura 4: Vista panorámica de bloques y tratamientos del experimento

3.3. METODOLOGÍA DE CAMPO

Durante el experimento se realizaron cinco evaluaciones, con un intervalo de dos meses entre evaluación; la primera evaluación se realizó el 24 de abril del 2018, antes de aplicar los mejoradores, y desde la segunda hasta la quinta evaluación se realizaron después de haber aplicado los mejoradores químicos; la incorporación de los mejoradores se realizó el 30 de abril del 2018 y el primer lavado se hizo el 9 de mayo del 2018, se aplicó a cada tratamiento un volumen de agua de 1,500 m³/ha en cada lavado, siendo un total de 12 lavados aplicados con intervalos de 22-25 días, lo que hace un volumen de agua total aplicado de 18,000 m³/ha para cada tratamiento; la última evaluación se realizó el 28 de diciembre del 2018 y el último riego fue el 4 de enero del 2019. Con esta programación de lavados se mantuvo húmedo al suelo durante todo tiempo que demandó la rehabilitación.

3.4. METODOLOGÍA DE LABORATORIO

El análisis químico de las muestras de suelo se realizó empleando los siguientes métodos: el pH del suelo fue determinado en suspensión suelo - agua en relación 1:1. La conductividad eléctrica fue determinada en un extracto acuoso en relación suelo- agua 1:1. La textura fue determinada de acuerdo al método de Bouyoucos. El contenido de carbonato de calcio por el método gaso-volumétrico mediante reacción con HCl 6N.

La materia orgánica del suelo fue determinada por digestión vía húmeda o método de Walkley y Black modificado; el fósforo disponible se determinó por extracción, empleando la solución extractante de Olsen (NaHCO₃ 0.5M) y posterior desarrollo de color con una solución sulfomolibdica. El potasio disponible se determinó por la suma de potasio soluble más potasio intercambiable medidos por fotometría, el potasio intercambiable es obtenido mediante solución extractora de acetato de amonio (CH₃COONH₄ 1N a pH 7).

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) fue determinada empleando la saturación de acetato de amonio y posteriormente mediante destilación de Kjeldahl. Los cationes intercambiables fueron obtenidos en la solución extractora de acetato de amonio (CH₃COONH₄ 1N a pH 7) (Bazán 2017).

De esta manera, las muestras de suelo, fueron analizadas en el laboratorio de suelos de la facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo y cuyos resultados obtenidos fueron utilizados para en el análisis estadístico.

3.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se utilizó el diseño de bloques completos al azar (DBCA), con seis tratamientos y cuatro repeticiones; así mismo, los promedios se compararon mediante la prueba de Duncan, con un nivel de significación del 5 por ciento.

El objetivo fue hacer comparaciones precisas entre los tratamientos bajo estudio, utilizar bloques es una forma de reducir y controlar la varianza del error experimental para tener mayor precisión. En el diseño completamente al azar se supone que las unidades experimentales son relativamente homogéneas con respecto a factores que afectan la variable de respuesta; Sin embargo, algunas veces no tenemos disponibles suficiente número de unidades experimentales homogéneas.

Cualquier factor que afecte la variable de respuesta y que varíe entre unidades experimentales aumentará la varianza del error experimental y disminuirá la precisión de las comparaciones.

El modelo estadístico para este diseño es el Modelo aditivo lineal.

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \epsilon_{ij}.$$

Donde:

$i = 1, 2, \dots, t$ (tratamientos)

$j = 1, 2, \dots, r$ (bloques)

Y_{ij} = Unidad experimental donde se encuentra el tratamiento i , en el bloque j .

μ = Promedio de la población de todo el ensayo.

τ_i = Efecto de tratamiento, i - énsimo.

β_j = Efecto de bloque, j - éximo.

ϵ_{ij} = Error experimental, asociado a la observación.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CARACTERÍSTICAS DEL AGUA DE POZO UTILIZADA EN EL LAVADO DE SUELOS

En los meses de mayo a diciembre el circulante del sistema regulado tinajones es reducido, siendo el recurso agua un problema para ejecutar este tipo de investigaciones, por lo cual se utilizó agua de pozo a tajo abierto localizado en el mismo predio cuyas características se muestran en el Cuadro 5.

Cuadro 5: Análisis químico del agua de pozo

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valores
pH	pH	--	7.32
Conductividad eléctrica	CEa	uS/cm	660
Carbonatos	CO ₃ ²⁻	meq/L	0.00
Bicarbonatos	HCO ₃ ⁻	meq/L	3.00
Cloruros	Cl ⁻	meq/L	3.00
Sulfatos	SO ₄ ²⁻	meq/L	0.86
Calcio	Ca ²⁺	meq/L	2.80
Magnesio	Mg ²⁺	meq/L	1.10
Potasio	K ⁺	meq/L	0.02
Sodio	Na ⁺	meq/L	2.70
Relación de adsorción de sodio	RAS	meq/L	1.94
Carbonato de sodio residual	CSR	meq/L	0.90
Dureza	CO ₃ Ca	ppm	181

FUENTE: Laboratorio de suelos de la FAG-UNPRG

El agua utilizada para el lavado de suelos salino sódicos fue analizada por única vez a inicios del experimento y presentó valores de CEa de 660 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, la RAS es de 0.90. Según Pizarro (1978), clasifica como agua de salinidad media (C2) y alcalinidad baja (S1). El agua es de clase C2-S1, de buena calidad aptas para riego debido a su baja salinidad y proporción de sodio, se recomienda para usarse en el riego de la mayoría de los cultivos y suelos, ya que tiene escasa posibilidad de causar efectos salinos y alcanzar niveles peligrosos de Na⁺ intercambiable.

4.2. CARACTERÍSTICAS DEL YESO AGRÍCOLA

El yeso agrícola utilizado como mejorador de suelos salino-sódicos es de color cremoso y fue adquirido de las minas de yeso de la comunidad campesina San Pedro del distrito de Morrope, cuyo proceso de obtención es extracción, deshidratación natural, limpieza, molido y embazado. Por su granulometría diversa, permite una liberación gradual de los iones sulfato y calcio impidiendo la pérdida de estos a través de la infiltración del agua.

Las partículas de menor tamaño se disuelven rápidamente quedando las de mayor tamaño para una liberación posterior. De acuerdo a su clasificación, el yeso agrícola utilizado en la investigación califica como yeso agrícola grueso y yeso agrícola fino (Cuadro 6), los resultados del análisis granulométrico y la composición química se presentan en los Cuadros 7 y 8.

Cuadro 6: Clasificación del yeso agrícola por su granulometría

Partícula (yeso agrícola)	Tamaño (mm)
Grueso	1-5
Fino	< 1

FUENTE: Del pardo *et al.* (2015)

Cuadro 7: Granulometría del yeso agrícola utilizado

N° tamiz	Diámetro (micrones)	Diámetro (mm)	Granulometría (%)
10	2000-1400	2-1.4	0
14	1400-710	1.4-0.71	18.285
25	710-500	0.71-0.50	24.14
35	500-351	0.50-0.351	16.36
42	351-250	0.351-0.250	14.09
60	250-105	0.250-0.105	20.065
140	<105	<0.105	6.69

FUENTE: Elaborado por el autor

El tamaño de partícula del yeso agrícola fue separado utilizando tamices de los diámetros especificados en el cuadro 7, se analizaron cuatro muestras de manera individual y luego se promediaron los resultados obtenidos y se expresaron en porcentajes.

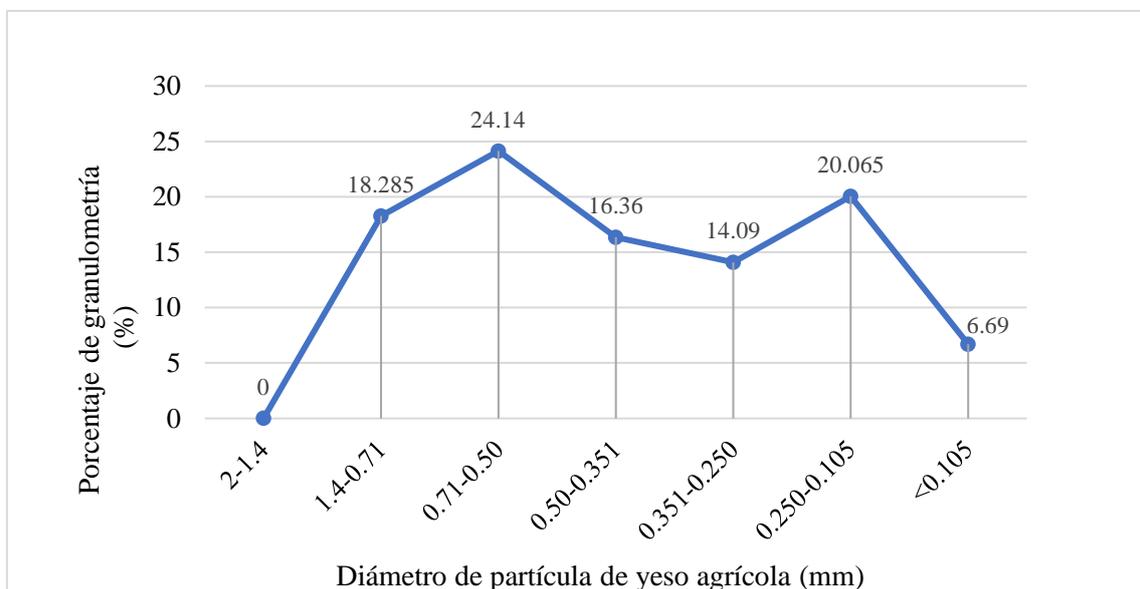


Figura 5 : Granulometría del yeso agrícola

FUENTE: Elaborado por el autor

En la Figura 5, se puede apreciar el porcentaje de granulometría del yeso agrícola, los diámetros de las partículas son menores a 2 mm y la distribución porcentual es casi homogénea para los tamaños medidos, lo cual da posibilidad que la disolución sea gradual.

Cuadro 8: Composición química del yeso agrícola

Fórmula química	CaSO ₄ .2H ₂ O
Ca (%)	12.70
CaO (%)	17.78
CE _(1:1) dS/m	2.50

FUENTE: Elaborado por el autor

Para la caracterización química del yeso agrícola se analizaron 4 muestras, se determinó la CE (1:1), calcio y óxido de calcio, luego se promediaron dichos resultados.

4.3. Características del azufre polvo seco

El azufre polvo seco utilizado en el experimento fue un azufre procesado, de uso agrícola, formulado en polvo seco (DP) y tiene una concentración del 93 por ciento, su efectividad está en relación directa con su finura, pureza y poder de adhesión, las características del azufre polvo seco se detallan en el Cuadro 9.

Cuadro 9: Composición química del azufre polvo seco

Parámetro	Especificación
Azufre	93%
Aditivo	7%
Grupo químico	Inorgánico
Formulación	Polvo seco.
Formulador	Aris industrial
Procedencia	Perú
Pureza (%) (base seca)	91-95
Inerte (%)	5-7
Humedad, H ₂ O, (%)	1 máximo
Malla 325, pasante (%)	90 mínimo

FUENTE: www.aris.com.pe

En el Cuadro 9 se describen las características del azufre polvo seco, este mejorador fue adquirido de la empresa Aris industrial y es recomendado para uso agrícola, donde lo más resaltante es su finura, por esta razón la distribución del azufre en campo es recomendable hacerlo en horas de la mañana con poco viento y su incorporación debe hacerse inmediatamente.

4.4. Características de los suelos estudiados

Los suelos del valle Chancay son de origen aluvial con perfiles estratificados sin desarrollo edafogénico, se caracterizan por su gran desorden estratigráfico sobre el cual se sobreponen las sedimentaciones o el colmataje efectuado por los aluviones y el riego, a base de materiales moderadamente finos o finos y calcáreos, varían considerablemente en

profundidad y textura, desde ligeros y superficiales hasta profundos y pesados. En algunos casos han sido influenciados por procesos hidromórficos (empantanamiento), que se presentan acompañados de características halomórficas (salinidad), en especial en la parte baja del valle, que presenta una topografía plana o depresionada, carente de un adecuado sistema de drenaje natural y artificial (Garcés y Guerra 1999).

En el área experimental se elaboró una calicata (Figura 6), para describir las características del perfil, presentando los horizontes Ap, C1, C2 y C3 descritos en el cuadro 10.

Tomando como base la edición número 12 del Soil Taxonomy (claves para la taxonomía de suelos 2014), el suelo tiene la siguiente clasificación:

Orden : Entisols.

Suborden : Orthens.

Gran grupo : Ustorthents.

Sub grupo : Tipic Ustorthents.



Figura 6: Perfil del suelo experimental

Cuadro 10: Características del perfil del suelo

Horizonte	Profundidad (cm)	Características
Ap	0-26	Franco arcillo arenoso; color marrón pálido (10YR 6/3) en seco y color marrón amarillento oscuro (10YR 4/4) en húmedo; su estructura es blocosa y débil, con pérdida de la misma; su consistencia es muy friable en húmedo; contenido bajo de materia orgánica (1.27 %); con pocas raíces finas y medias; la reacción del suelo es neutra (7.33); tiene 2.24 % de CaCO ₃ , es extremadamente salino y sódico. Límite claro al:
C1	26-70	Franco arenoso; color marrón muy pálido (10YR 7/3) en seco y color marrón oliva claro (2.5Y 5/3) en húmedo; no hay desarrollo de agregados; suelo sin estructura; consistencia muy friable en húmedo: contenido bajo de materia orgánica (0.48 %); la reacción del suelo es neutra (7.38); no calcáreo; es extremadamente salino y sódico, con muy pocas raíces finas. Límite claro al:
C2	70-101	Arena franca; color amarillo pálido (2.5Y 7/4) en seco y de color marrón pálido (10YR 6/3) en húmedo; no hay desarrollo de agregados; suelo sin estructura; consistencia suelta en húmedo; contenido bajo de materia orgánica (0.35 %); la reacción del suelo es neutra (7.37); es no calcáreo; extremadamente salino y sódico; sin raíces. Límite claro al:
C3	101- (+171)	Franco arenoso; color gris claro (5Y 7/2) en seco y color oliva pálido (5Y 6/3) en húmedo; no hay desarrollo de agregados; suelo sin estructura; consistencia suelta en húmedo; contenido bajo de materia orgánica (0.18 %), la reacción del suelo es neutra (7.25); no calcáreo; es extremadamente salino y sódico.

FUENTE: Elaborado por el autor

4.5. EFECTO DE LOS MEJORADORES Y LAS DOSIS SOBRE EL PH DE LOS SUELOS

El pH del suelo fue medido en una suspensión suelo y agua en relación 1:1. En el Cuadro 11 se presenta el análisis de varianza para el pH (1:1) con un coeficiente de variabilidad de 1.64 por ciento, donde se denota alta significación estadística para las variables bloques, evaluaciones y tratamientos, excepto para el efecto combinado entre la media de los tratamientos y las evaluaciones. La interacción permite visualizar el comportamiento de los tratamientos en cada una de las evaluaciones realizadas, ya que el suelo es un sistema dinámico y más aún que estuvo sometido dos mejoradores químicos y a la acción de los microorganismos debido a la aplicación de materia orgánica.

Cuadro 11: Análisis de varianza para pH (1:1)

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor	Significación
Bloque	0.26	3	0.09	6.10	0.0008	**
Evaluación	0.56	4	0.14	9.93	<0.0001	**
Tratamiento	0.26	5	0.05	3.75	0.0040	**
Evaluación*Tratamiento	0.34	20	0.02	1.20	0.2768	N.S
Error	1.22	87	0.01			
Total	2.63	119				

El Cuadro 12 presenta el test de Duncan al 0.05 para la variable bloques, el cual permite comparar las medias de pH entre los bloques, se observan dos grupos de pH estadísticamente diferentes, siendo el bloque II, I y III estadísticamente iguales difiriendo del bloque IV.

Cuadro 12: Test de Duncan para bloques ($\alpha=0.05$)

Bloque	Medias	Agrupación
II	7.27	A
I	7.26	A
III	7.23	A
IV	7.15	B

El test de Duncan al 0.05 para la variable bloques, muestra diferencias estadísticas de pH entre bloques. Se pueden apreciar dos grupos, siendo las medias de los bloques II, I y III estadísticamente iguales, y son diferentes estadísticamente al bloque IV, mostrando que el bloque IV tiene el valor más bajo con un pH de 7.15.

El Cuadro 13 presenta el test de Duncan al 0.05 para la variable evaluaciones, el cual permite comparar las medias de pH entre las evaluaciones, mostrando dos grupos estadísticamente diferentes.

Cuadro 13: Test de Duncan para evaluaciones ($\alpha=0.05$)

Evaluación	Medias	Agrupación
4	7.30	A
1	7.29	A
2	7.25	A
5	7.15	B
3	7.14	B

El test de Duncan al 0.05 para la variable evaluaciones, presenta diferencia estadística, existen dos grupos diferentes. Las evaluaciones 4, 1 y 2 difieren estadísticamente de las evaluaciones 5 y 3; correspondiendo el valor más alto a la evaluación 4 con un pH de 7.30 y el valor más bajo a la evaluación 3 con un pH de 7.14. La aplicación del azufre polvo seco influyó sobre el pH del suelo, al igual que los ácidos orgánicos de los microorganismos, de la materia orgánica y los exudados de las raíces de la vegetación herbácea que pobló la superficie del suelo, pero el suelo también tiene un efecto tampón que influyó en la dinámica del pH.

El Cuadro 14 presenta el test de Duncan al 0.05 para la variable tratamientos, permite comparar las medias de pH entre los tratamientos. Se muestran tres grupos estadísticamente diferentes, siendo los tratamientos testigo, YAD3 (22 toneladas de yeso agrícola por hectárea) y YAD1 (8 toneladas de yeso agrícola por hectárea) los que mostraron mayores valores de pH y el tratamiento AD1 (4 toneladas de azufre polvo seco por hectárea) es el que obtuvo el valor más bajo.

Cuadro 14: Test de Duncan para tratamientos ($\alpha=0.05$)

Tratamiento	Medias	Agrupación
Tg	7.30	A
YA D3	7.27	A B
YA D1	7.23	A B C
A D2	7.21	B C
YA D2	7.19	B C
A D1	7.16	C

El test de Duncan al 0.05 para la variable tratamientos, muestra que las medias de los tratamientos testigo, YAD3 (22 toneladas de yeso agrícola por hectárea) y YAD1 (8 toneladas de yeso agrícola por hectárea), son estadísticamente iguales; pero difieren numéricamente, correspondiendo el valor más alto de pH al tratamiento testigo con un valor de 7.30. El segundo grupo está formado por los tratamientos AD2 (6 toneladas de azufre polvo seco por hectárea) y YAD2 (12 toneladas de yeso agrícola por hectárea), el menor valor le corresponde al tratamiento AD1 (4 toneladas de azufre polvo seco por hectárea) con un valor de pH de 7.16, esto se debe al efecto acidificante del azufre aplicado, ya que, al ser oxidado por los microorganismos, a formas de sulfatos, conduce a una disminución del pH del suelo.

El Cuadro 15 presenta el efecto combinado entre las medias de los tratamientos por cada evaluación, se han identificado cinco grupos diferentes de pH, siendo el mayor valor 7.45, que corresponde al tratamiento AD2 (6 toneladas de azufre polvo seco por hectárea) en la evaluación 1, y el menor valor es 7.01 que pertenece al mismo tratamiento, pero a la evaluación 5.

Cuadro 15: Efecto combinado entre las medias de los tratamientos por evaluación

Evaluación	Tratamientos	Medias	Agrupación
1	A D2	7.45	A
4	Tg	7.45	A
4	YA D1	7.35	A B
1	Tg	7.35	A B
1	YA D3	7.34	A B
2	YA D3	7.30	A B C
2	Tg	7.30	A B C D
4	YA D3	7.27	A B C D E
4	YA D2	7.27	A B C D E
4	A D2	7.24	B C D E
2	YA D2	7.24	B C D E
2	A D2	7.24	B C D E
3	YA D3	7.24	B C D E
2	YA D1	7.24	B C D E
5	Tg	7.23	B C D E
4	A D1	7.23	B C D E
1	YA D1	7.22	B C D E
5	YA D3	7.21	B C D E
1	YA D2	7.21	B C D E
2	A D1	7.20	B C D E F
1	A D1	7.19	B C D E F
5	YA D1	7.18	B C D E F
3	Tg	7.17	B C D E F
5	YA D2	7.16	B C D E F
3	YA D1	7.16	B C D E F
3	A D2	7.13	C D E F
3	YA D2	7.10	C D E F
5	A D1	7.09	D E F
3	A D1	7.08	E F
5	A D2	7.01	F

El efecto combinado entre las medias de los tratamientos por cada evaluación se muestra en el Cuadro 15 donde los valores de las medias de pH están ordenados descendientemente encontrando el valor más alto de pH en el tratamiento AD2 (6 toneladas de azufre polvo seco por hectárea) en la evaluación 1 con un valor de 7.45, y el menor valor es 7.01 habiéndose encontrado en el mismo tratamiento, pero en la evaluación 5. Estos resultados confirman que existió un efecto acidificante del azufre polvo seco, logrando descender el pH del suelo.

La Figura 7 presenta la fluctuación de las medias del pH del suelo en cada uno de los tratamientos según la evaluación realizada, se observa que hubo una disminución del pH al final de la investigación en todos los tratamientos.

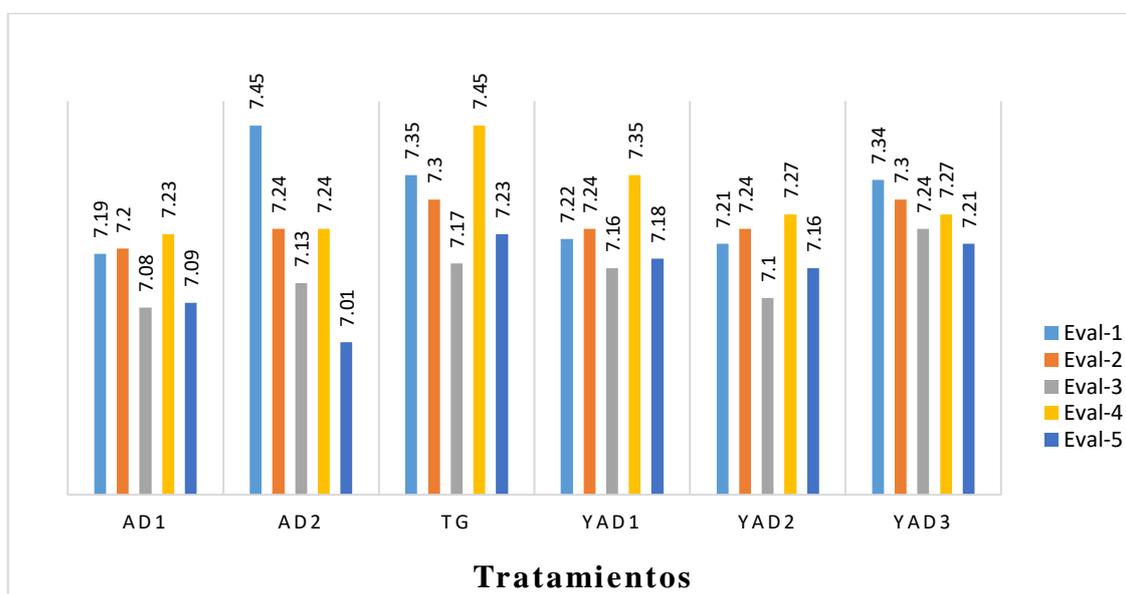


Figura 7: Variación de las medias del pH (1:1) en cada tratamiento según evaluación

La Figura 7 muestra la fluctuación de los valores medios del pH del suelo para cada tratamiento según evaluación realizada, se puede apreciar que en todos los tratamientos disminuyó el pH, pero el tratamiento que más redujo esta característica es el tratamiento AD2 (6 toneladas de azufre polvo seco por hectárea), a pesar de que su valor inicial fue el más alto de todos los tratamientos, con lo cual se infiere que la disminución del pH es por efecto acidificante del azufre, como consecuencia de la transformación a sulfato por oxidación microbiológica principalmente del género *Thiobacillus*.

La variación del pH por aplicación de azufre no fue de manera drástica, debido a que al solubilizar al CaCO_3 , se disocia liberando al anión carbonato, que reacciona con el hidrógeno

de la solución del suelo haciendo un efecto tampón a la variación del pH, que incluso fue responsable que el pH del suelo se incremente en la evaluación 4. Y las razones que redujo el pH del suelo es la formación de ácido sulfúrico, liberación ácidos orgánicos por los microorganismos, de la materia orgánica y de los exudados de las raíces de la vegetación herbácea que pobló la superficie del suelo.

4.6. EFECTO DE LOS MEJORADORES Y LAVADO SOBRE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DE LOS SUELOS

La conductividad eléctrica de los suelos fue determinada en un extracto acuoso en relación suelo-agua 1:1, cuyos resultados iniciales clasifican como suelos fuertemente salinos (USDA-Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo 1999).

El Cuadro 16 presenta el análisis de varianza para la conductividad eléctrica (1:1) con un coeficiente de variabilidad de 14.06 por ciento, mostrando que, si existió alta significación estadística para las variables bloques y evaluaciones, pero no se encontró alta significación estadística para la variable tratamientos, tampoco para el efecto combinado entre la media de los tratamientos y las evaluaciones.

Cuadro 16: Análisis de varianza para conductividad eléctrica (1:1) dS/m

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor	Significación
Bloque	1.26	3	0.42	24.62	<0.0001	**
Evaluación	10.42	4	2.60	152.72	<0.0001	**
Tratamiento	0.13	5	0.03	1.53	0.1890	N.S
Evaluación*Tratamiento	0.19	20	0.01	0.57	0.9260	N.S
Error	1.48	87	0.02			
Total	13.48	119				

En el Cuadro 17 se muestra el test de Duncan al 0.05 para la variable bloques, el cual permite comparar las medias de la conductividad eléctrica entre bloques; mostrando dos grupos diferentes, siendo los bloques I, II y III estadísticamente iguales, pero difieren estadísticamente del bloque IV.

Cuadro 17: Test de Duncan para bloques ($\alpha=0.05$)

Bloque	Media	Agrupación
I	13.16	A
II	12.72	A
III	10.89	A
IV	7.63	B

Como se aprecia en el cuadro 17, hay dos grupos estadísticamente diferentes, uno conformado por los bloques I, II y III con valores medios de 13.16 dS/m, 12.72 dS/m y 10.89 dS/m, y el otro grupo conformado por el bloque IV el cual muestra el valor medio más bajo de 7.63 dS/m. Esta diferencia se debe a la heterogeneidad espacial del área experimental, ya los bloques estuvieron distribuidos secuencialmente, separados únicamente por un drenaje artificial.

El Cuadro 18 presenta el test de Duncan al 0.05 para la variable evaluaciones, el cual permite comparar las medias entre evaluaciones; se aprecian dos grupos estadísticamente diferentes, donde se muestra que la media de la evaluación 1 es superior a las demás evaluaciones.

Cuadro 18: Test de Duncan para evaluaciones ($\alpha=0.05$)

Evaluación	Medias	Agrupación
1	33.29	A
4	6.29	B
3	6.23	B
2	5.23	B
5	4.47	B

En el Cuadro 18 se observan dos grupos diferentes estadísticamente y le corresponde a la evaluación 1, el valor más alto de conductividad eléctrica siendo la media igual a 33.29 dS/m; el otro grupo está conformado por las evaluaciones 4, 3, 2 y 5. De las cuales la evaluación 5 mostro el menor valor con 4.47 dS/m, esto quiere decir que el lavado de los suelos resulto eficiente, ya que a partir de la evaluación 2 disminuyó la conductividad eléctrica de manera drástica. La aplicación de estiércol no influyó sobre este parámetro por

su contenido de sales. Y además el lavado fue constante durante el tiempo de la investigación.

El Cuadro 19 presenta el test de Duncan al 0.05 para la variable tratamientos, el cual permite comparar los valores medios entre tratamientos; indica que no hay diferencias estadísticas, pero si hay diferencias numéricas entre ellos.

Cuadro 19: Test de Duncan para tratamientos ($\alpha=0.05$)

Tratamiento	Medias	Agrupación
YA D2	12.11	A
YA D3	12.02	A
A D1	11.69	A
A D2	11.03	A
YA D1	10.31	A
Tg	9.45	A

El Cuadro 19 muestra los valores medios de los tratamientos, muestra que son estadísticamente iguales presentando el valor más alto el tratamiento YAD2 (12 toneladas de yeso agrícola por hectárea) con una conductividad eléctrica de 12.11 dS/m, y el valor más bajo es 9.45 dS/m que le corresponde al tratamiento testigo. El mejorador químico yeso agrícola es considerado como una sal soluble que en presencia de agua se va a disociar en el catión calcio y el anión sulfato los cuales incrementan la concentración iónica en la solución del suelo, por otro lado el azufre polvo seco en un mejorador que genera acidez en los suelos y disuelve algunos minerales no solubles en agua, eso permite también incrementar la concentración iónica y por ende la conductividad eléctrica de la solución suelo, la materia orgánica no tuvo efecto en el incremento de la conductividad eléctrica de los tratamientos, ya que al evaluar el tratamiento testigo presentó la media de conductividad eléctrica más baja que el resto de tratamientos.

El Cuadro 20 presenta el efecto combinado entre las medias de los tratamientos y las evaluaciones, mostrando una gran diferencia de conductividad eléctrica entre la evaluación 1 y la evaluación 5, los valores se han ordenado de forma descendente.

Cuadro 20: Efecto combinado entre las medias de cada tratamiento por evaluación

Evaluación	Tratamiento	Medias	Agrupación
1	YA D2	41.86	A
1	A D1	33.98	A B
1	YA D3	33.72	A B
1	A D2	32.60	B
1	YA D1	31.35	B
1	Tg	26.22	B
4	YA D3	7.57	C
3	YA D3	6.98	C
3	A D2	6.93	C
4	A D1	6.82	C
3	A D1	6.48	C
2	YA D3	6.40	C
4	YA D1	6.31	C
4	A D2	6.06	C
3	YA D2	6.02	C
4	Tg	5.90	C
3	YA D1	5.86	C
2	A D1	5.67	C
2	A D2	5.65	C
5	A D1	5.51	C
5	YA D3	5.44	C
2	Tg	5.15	C
3	Tg	5.10	C
4	YA D2	5.09	C
5	Tg	4.90	C
2	YA D1	4.31	C
2	YA D2	4.21	C
5	A D2	3.91	C
5	YA D1	3.71	C
5	YA D2	3.36	C

En el Cuadro 20 se muestra de forma descendente los valores medios de la conductividad eléctrica para el efecto combinado entre tratamientos y evaluaciones, se han identificado tres grupos estadísticamente diferentes, encontrando los valores más altos en los tratamientos YAD2 (12 toneladas de yeso agrícola por hectárea), AD1 (4 toneladas de azufre polvo seco por hectárea) y YAD3 (22 toneladas de yeso agrícola por hectárea), con 41.86 dS/m, 33.98 dS/m y 33.72 dS/m en la evaluación 1, y los valores más bajos pertenecen a los tratamientos YAD1 (8 toneladas de yeso agrícola por hectárea) y YAD2 (12 toneladas de yeso agrícola por hectárea) en la evaluación 5 con conductividades eléctricas de 3.71 dS/m y 3.36 dS/m. La conductividad eléctrica inicial medida en suspensión suelo-agua en relación (1:1), fue muy alta clasificándose como suelo fuertemente salino (USDA-Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo 1999); después del primer lavado disminuyó en todos los tratamientos a valores tolerables para algunos cultivos, con lo cual concluimos que hay un efecto rápido de lavado a través del drenaje, al margen de la aplicación o no de los mejoradores químicos. La adición del estiércol tampoco tuvo influencia sobre la conductividad eléctrica por el contenido de sales que tiene este material.

La Figura 8 presenta la dinámica de la conductividad eléctrica durante la investigación, todos los tratamientos muestran la misma tendencia disminuyendo su valor medio después del lavado, dicha tendencia se mantiene hasta el final de la investigación.

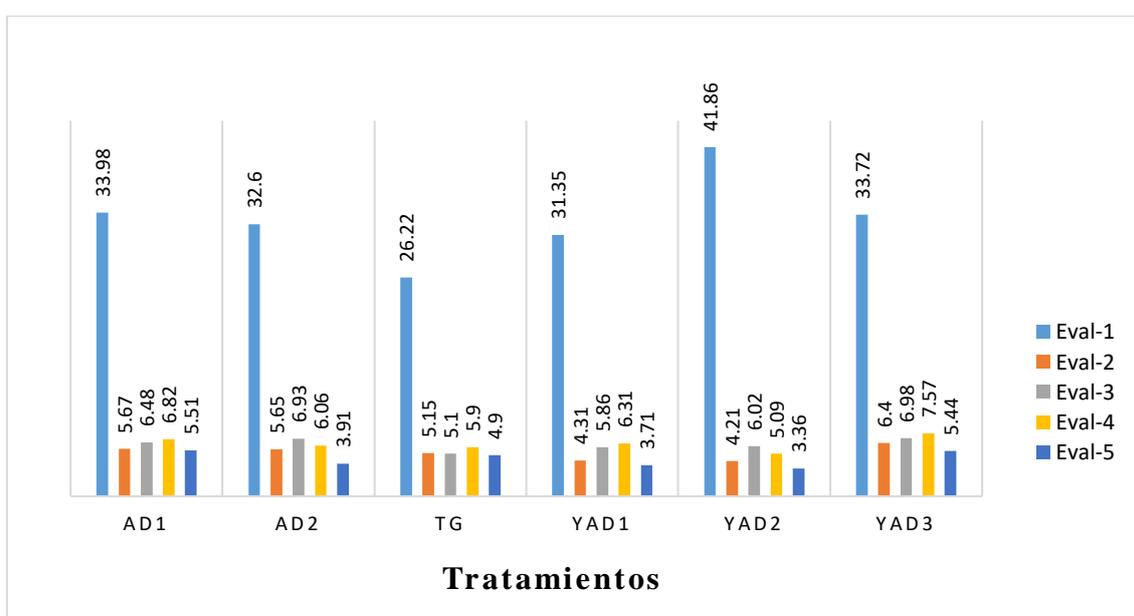


Figura 8: Variación de las medias de CE (1:1) (dS/m) en cada tratamiento según evaluación

En la Figura 8 se muestra el comportamiento de las medias de la CE (1:1), se puede decir que el drenaje permite una recuperación rápida de los suelos salinos, ya que después del primer lavado disminuyó drásticamente, Esta práctica originó un flujo descendente de agua a través del perfil para arrastrar las sales solubles lavando el suelo. El flujo horizontal fue muy rápido, ya que los filtrados aparecían rápidamente en el drenaje lo que permitió una desalinización rápida de los horizontes superficiales de suelo. Finalmente, la CE (1:1) quedo en niveles que lo califican como suelos moderadamente salinos donde solo los cultivos tolerantes rinden satisfactoriamente (USDA-Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo 1999).

4.7. EFECTO DE LOS MEJORADORES Y DOSIS SOBRE EL CALCIO INTERCAMBIABLE

El Cuadro 21 presenta el análisis de varianza para calcio intercambiable con un coeficiente de variabilidad de 11.34 por ciento, muestra que existió alta significación estadística entre los factores bloques, evaluaciones y tratamientos, pero no se encontró significación estadística para el efecto combinado entre las medias de los tratamientos y las evaluaciones.

Cuadro 21: Análisis de varianza para Ca⁺² intercambiable (meq/100g)

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor	Significación
Bloque	0.31	3	0.10	8.97	<0.0001	**
Evaluación	1.48	4	0.37	32.30	<0.0001	**
Tratamiento	0.23	5	0.05	3.97	0.0027	**
Evaluación*Tratamiento	0.32	20	0.02	1.39	0.1497	N.S
Error	1.00	87	0.01			
Total	3.34	119				

El Cuadro 22 presenta la prueba de Duncan al 0.05 para la variable bloques, el cual permite comparar las medias entre bloques; muestra dos grupos diferentes para calcio intercambiable.

Cuadro 22: Test de Duncan para bloques ($\alpha=0.05$)

Bloque	Medias	Agrupación
IV	10.21	A
III	8.32	B
II	7.89	B
I	7.47	B

En el Cuadro 22 se observan dos grupos estadísticamente diferentes, siendo el bloque IV el que mostró el mayor valor medio con 10.21 meq Ca²⁺/100 gramos de suelo, difiriendo estadísticamente de los bloques III, II y I, que mostraron menores valores con 8.32, 7.89 y 7.47 meq Ca²⁺/100 gramos de suelo. Estos valores muestran que existió variabilidad del calcio intercambiable entre bloques, con una diferencia de 2.74 meq Ca²⁺/100 gramos de suelo entre el bloque IV y el bloque I. En el análisis de sodio intercambiable muestra el mayor valor en el bloque I, seguido de los bloques II, III y IV, con lo cual podemos decir que hay bloques que son más afectados por sodio intercambiable donde el reemplazamiento del calcio intercambiable es menor.

El Cuadro 23 presenta el test de Duncan al 0.05 para la variable evaluaciones, donde se pueden comparar los valores medios entre evaluaciones, muestra la dinámica del calcio intercambiable durante el proceso de la investigación.

Cuadro 23: Test de Duncan para evaluaciones ($\alpha=0.05$)

Evaluaciones	Medias	Asignación
5	12.80	A
4	8.92	B
1	8.11	B C
2	7.38	C
3	5.14	D

La variable evaluaciones muestra cuatro grupos diferentes estadísticamente, encontrándose el valor más alto en la evaluación 5 con 12.80 meq Ca²⁺/100 gramos de suelo, en la evaluación 3 se encontró el valor más bajo con 5.14 meq Ca²⁺/100 gramos de suelo, al finalizar la investigación se incrementó el calcio intercambiable respecto al valor de la evaluación 1, también se observa una disminución en las evaluaciones 2 y 3 debido a que existió un desplazamiento del calcio, este fenómeno también se ha observado para el magnesio, potasio y sodio intercambiable, esto es posible debido al lavado constante del suelo, siendo uno de los factores que pudo provocar el arrastre de los cationes intercambiables.

El Cuadro 24 presenta el test de Duncan al 0.05 para la variable tratamientos, el cual permite comparar los valores medios entre tratamientos; se muestran tres grupos estadísticamente diferentes.

Cuadro 24: Test de Duncan para tratamientos ($\alpha=0.05$)

Tratamiento	Medias	Asignación
YA D2	9.91	A
A D2	8.96	A B
A D1	8.76	A B
YA D3	8.30	A B C
YA D1	7.92	B C
Tg	6.96	C

La variable tratamientos muestra alta significación, encontrándose tres grupos diferentes estadísticamente, el valor medio más alto se encontró en el tratamiento YAD2 (12 toneladas de yeso agrícola por hectárea) con 9.91 meq Ca²⁺/100 gramos de suelo y el más bajo corresponde al tratamiento testigo con 6.96 meq Ca²⁺/100 gramos de suelo, al cual no se aplicó ningún mejorador químico.

El Cuadro 25 presenta el efecto combinado para calcio intercambiable entre las medias de los tratamientos y las evaluaciones, se han identificado 12 grupos diferentes estadísticamente, encontrando los valores más altos en la evaluación 5 con excepción del tratamiento testigo.

Cuadro 25: Efecto combinado entre las medias de cada tratamiento por evaluación

Evaluación	Tratamiento	Medias	Agrupación
5	A D2	15.30	A
5	YA D1	14.42	AB
5	A D1	14.00	ABC
5	YA D2	13.00	ABCD
4	YA D2	11.58	ABCDE
5	YA D3	10.94	BCDE F
4	A D1	10.58	CDE F G
1	YA D2	10.52	CDE F G H
4	YA D3	9.26	DE F G H I
5	Tg	9.16	DE F G H I J
4	A D2	9.14	DE F G H I J
2	YA D3	8.90	E F G H I J
1	A D2	8.50	E F G H I J K
2	A D2	7.75	E F G H I J K L
1	A D1	7.50	F G H I J K L
1	YA D1	7.45	F G H I J K L
1	Tg	7.40	F G H I J K L
1	YA D3	7.30	F G H I J K L
3	YA D2	7.26	F G H I J K L
2	Tg	7.25	F G H I J K L
2	YA D2	7.20	F G H I J K L
2	YA D1	6.75	G H I J K L
4	Tg	6.56	G H I J K L
2	A D1	6.40	H I J K L
4	YA D1	6.00	I J K L
3	A D1	5.32	I J K L
3	YA D3	5.10	J K L
3	YA D1	4.62	K L
3	Tg	4.44	K L
3	A D2	4.12	L

En el Cuadro 25 se presenta ordenadamente de forma descendente las medias de los tratamientos en cada evaluación realizada, el valor más alto es 15.30 meq Ca²⁺/100 gramos de suelo, que le corresponde al tratamiento AD2 (6 toneladas de azufre polvo seco por hectárea), y el valor más bajo es de 4.12 meq Ca²⁺/100 gramos de suelo, que corresponde al mismo tratamiento, pero a la evaluación 3, con lo cual podemos afirmar que hubo un arrastre del calcio intercambiable, ya que la mayoría de los tratamientos tuvieron ese comportamiento en la evaluación 3, recuperándose posteriormente en la evaluación 4 y 5, ya sea por disolución del CaCO₃ por la acidez generada en la oxidación del azufre elemental, o por la aplicación de yeso agrícola, en ambos casos el calcio se liberó a la solución del suelo y posteriormente se posicionó en los sitios de cambio.

La Figura 9 presenta la dinámica del calcio intercambiable, se muestra que todos los tratamientos tienen la misma tendencia, pero al finalizar la investigación los valores finales de calcio intercambiable fueron superiores a los valores iniciales.

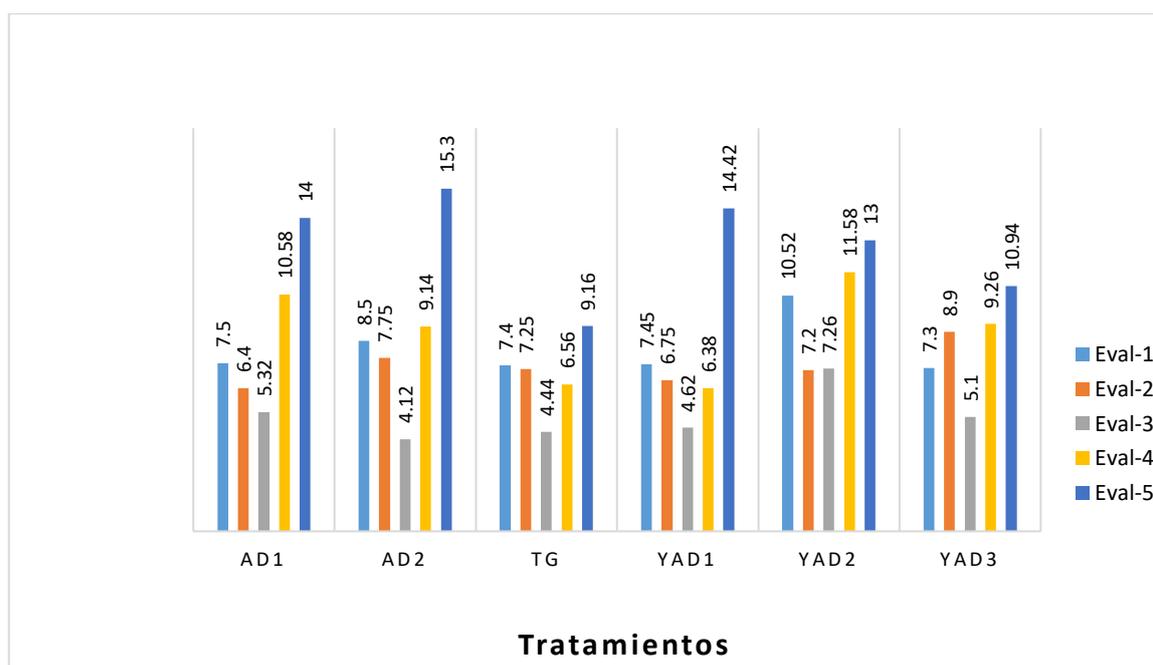


Figura 9: Variación de las medias de Ca²⁺ intercambiable (meq/100g-suelo) en cada tratamiento según evaluación

En la Figura 9 se puede apreciar la dinámica del calcio intercambiable en los tratamientos en cada evaluación realizada, mostrando que disminuyó en evaluación 2 y 3, producto del lavado del suelo, incrementando su valor en las evaluaciones 4 y 5 en todos los tratamientos. En los tratamientos con azufre el incremento de calcio intercambiable se debe al efecto acidificante del azufre elemental, solubilizando al carbonato de calcio, siendo este la fuente de calcio que terminaría en los sitios de cambio, el tratamiento con mayor calcio intercambiable fue AD2 (6 toneladas de azufre polvo seco por hectárea). Los tratamientos con yeso agrícola su incremento se debe al aporte de calcio de este mejorador cuyo incremento de calcio intercambiable es contrariamente al incremento de las dosis de yeso agrícola, por lo que el calcio del yeso agrícola puede estar formando precipitados al unirse con otros iones del suelo. En el tratamiento testigo el calcio intercambiable tuvo la misma dinámica, pero con valores más bajos, pudo estar influenciado por el calcio producto de la mineralización de la materia orgánica que se aplicó.

4.8. EFECTO DE LOS MEJORADORES Y DOSIS SOBRE EL MAGNESIO INTERCAMBIABLE

El Cuadro 26 presenta el análisis de varianza con un coeficiente de variabilidad de 10.09 por ciento, se detalla que existió significación estadística entre bloques, alta significación para la variable evaluaciones y no se encontró significación estadística para la variable tratamientos, tampoco para el efecto combinado entre las medias de los tratamientos y las evaluaciones.

Cuadro 26: Análisis de varianza para Mg⁺² intercambiable (meq/100 g)

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor	Significación
Bloque	0.32	3	0.11	3.43	0.0204	*
Evaluación	1.62	4	0.40	13.05	<0.0001	**
Tratamiento	0.16	5	0.03	1.01	0.4177	N.S
Evaluación*Tratamiento	0.33	20	0.02	0.54	0.9413	N.S
Error	2.69	87	0.03			
Total	5.12	119				

El Cuadro 27 presenta la prueba de Duncan al 0.05 para la variable bloques, que permite comparar los valores medios entre bloques, mostrando dos grupos estadísticamente diferentes.

Cuadro 27: Test de Duncan para bloques ($\alpha=0.05$)

Bloque	Medias	Agrupación
II	5.73	A
IV	3.67	B
III	3.41	B
I	2.92	B

El Cuadro 27 muestra que el bloque II es estadísticamente diferente a los bloques IV, III y I, perteneciendo el mayor valor medio al bloque II con 5.73 meq Mg²⁺/100 gramos de suelo, y los bloques IV, III y I mostraron los menores valores medios con 3.67, 3.41 y 2.92 meq Mg²⁺/100 gramos de suelo, esto demuestra la variabilidad de la composición química del suelo.

El Cuadro 28 presenta el test de Duncan al 0.05 para la variable evaluaciones, el cual permite comparar los valores medios de magnesio intercambiable entre evaluaciones durante el proceso de investigación, se observan dos grupos estadísticamente diferentes.

Cuadro 28: Test de Duncan para evaluaciones ($\alpha=0.05$)

Evaluación	Medias	Agrupación
1	8.55	A
2	3.38	B
5	3.02	B
3	2.96	B
4	1.76	B

En el Cuadro 28 se observa que en la evaluación 1 se obtuvo el valor medio más alto de magnesio intercambiable con 8.55 meq Mg²⁺/100 gramos de suelo, disminuyendo drásticamente en las siguientes evaluaciones, encontrándose el valor medio más bajo en la evaluación 4, con 1.76 meq Mg²⁺/100 gramos de suelo, los resultados muestran que existió

desplazamiento del magnesio de sus sitios de intercambio en la etapa inicial, los valores se mantuvieron por debajo del valor inicial hasta el final de la investigación.

El Cuadro 29 presenta el test de Duncan al 0.05 para la variable tratamientos, el cual permite comparar los valores medios entre tratamientos.

Cuadro 29: Test de Duncan para tratamientos ($\alpha=0.05$)

Tratamiento	Medias	Agrupación
A D1	4.63	A
A D2	4.46	A
YA D1	4.29	A
YA D3	3.71	A
YA D2	3.49	A
Tg	3.01	A

En el Cuadro 29 se denota que no hay diferencias y todos los tratamientos son estadísticamente iguales, de los cuales sobresalió el tratamiento AD1 (4 toneladas de azufre polvo seco por hectárea) con 4.63 meq Mg²⁺/100 gramos de suelo y el valor medio más bajo corresponde al tratamiento testigo con 3.01 meq Mg²⁺/100 gramos de suelo.

El Cuadro 30 presenta el efecto combinado entre las medias de los tratamientos con las evaluaciones, se han ordenado de forma descendente y se denota cinco grupos estadísticamente diferentes.

Cuadro 30: Efecto combinado entre las medias de cada tratamiento por evaluación

Evaluación	Tratamiento	Medias	Agrupación
1	YA D1	10.80	A
1	A D2	10.40	A B
1	Tg	9.10	A B C
1	A D1	8.30	A B C D
1	YA D3	6.40	A B C D E
1.	YA D2	6.30	A B C D E
3	YA D3	4.67	B C D E
3	A D1	4.54	B C D E
2	A D1	4.50	B C D E
2	YA D1	4.45	B C D E
5	YA D1	3.52	C D E
5	A D2	3.49	C D E
5	A D1	3.37	C D E
3	A D2	3.34	C D E
2	A D2	3.30	C D E
2	YA D2	3.20	C D E
2	YA D3	3.10	C D E
5	YA D2	3.05	C D E
3	YA D2	2.96	C D E
4	A D1	2.44	D E
5	YA D3	2.40	D E
5	Tg	2.28	D E
4	YA D3	2.00	D E
4	YA D2	1.94	E
4	A D2	1.78	E
2	Tg	1.70	E
4	YA D1	1.40	E
3	YA D1	1.30	E
4	Tg	1.00	E
3	Tg	0.96	E

En el Cuadro 30 se muestra los valores medios del efecto combinado entre las medias de los tratamientos por cada evaluación, encontrando los valores más altos de magnesio intercambiable en la evaluación 1, en todos los tratamientos, destacando el tratamiento YAD1 (8 toneladas de yeso agrícola por hectárea) con 10.80 meq Mg²⁺/100 gramos de suelo, en las siguientes evaluaciones el valor medio del magnesio intercambiable siguió disminuyendo, encontrando el valor medio más bajo en el tratamiento testigo en la evaluación 3 con 0.96 meq Mg²⁺/100 gramos de suelo. Esto quiere decir que el magnesio intercambiable ha sido desplazado, y en las evaluaciones siguientes se mantuvo por debajo del nivel inicial.

La Figura 10 presenta la dinámica del magnesio intercambiable, donde todos los tratamientos muestran la misma tendencia, los valores finales de magnesio intercambiable se mantuvieron por debajo de los valores iniciales durante la investigación.

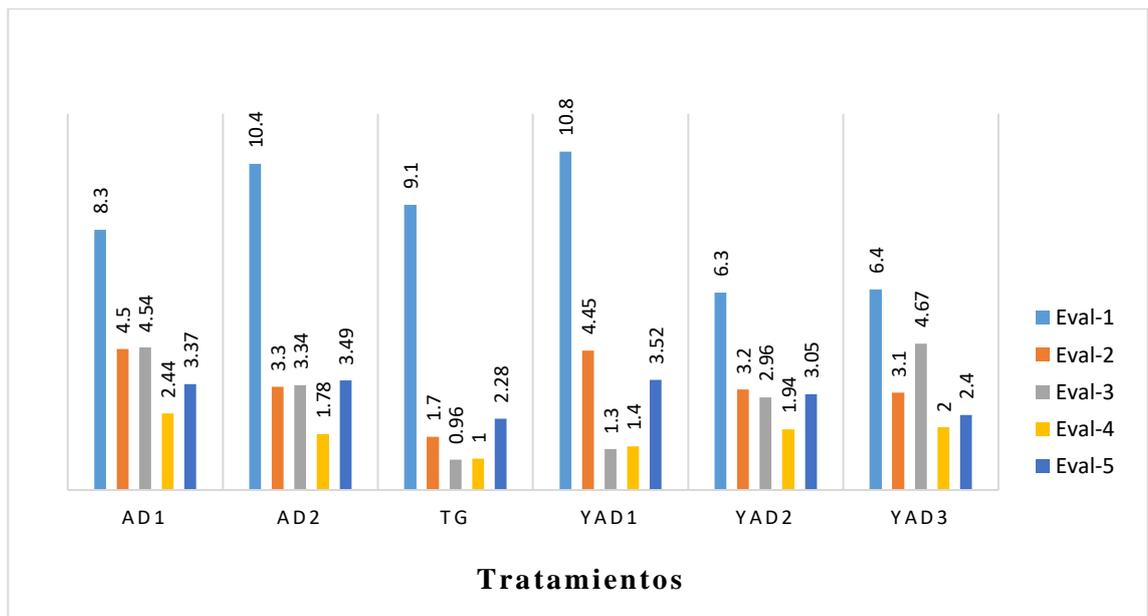


Figura 10: Variación de las medias de Mg²⁺ intercambiable (meq/100 g-suelo) en cada tratamiento según evaluación

En la Figura 10 se puede apreciar que los valores medios de magnesio intercambiable en la evaluación 1, fue superior a las demás evaluaciones, en todos los tratamientos, disminuyendo drásticamente para las siguientes evaluaciones, la dinámica fue muy parecida en todos los tratamientos, disminuyendo aún más en la evaluación 4. Pero se incrementó levemente en la última evaluación. Este catión también fue desplazado y acarreado durante el lavado, pero

luego en la evaluación 5 hay un ligero incremento que puede ser por la mineralización de la materia orgánica. De todos los cationes intercambiables el magnesio es el que ha sido desplazado en mayor concentración, eso quiere decir que el magnesio y sodio son los cationes responsables de la dispersión coloidal y del desmejoramiento de las propiedades físicas y químicas.

4.9. EFECTO DE LOS MEJORADORES Y DOSIS SOBRE EL POTASIO INTERCAMBIABLE

El Cuadro 31 presenta el análisis de varianza para potasio intercambiable con un coeficiente de variabilidad de 3.85 por ciento, se denota alta significación para las variables bloques y evaluaciones, no se encontró significación estadística para la variable tratamientos, tampoco para el efecto combinado entre medias de los tratamientos y las evaluaciones.

Cuadro 31: Análisis de varianza para K⁺ intercambiable (meq/100 g)

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor	Significación
Bloque	0.05	3	0.02	8.80	<0.0001	**
Evaluación	0.09	4	0.02	12.81	<0.0001	**
Tratamiento	0.01	5	2.1E-03	1.15	0.3401	N.S
Evaluación*Tratamiento	0.04	20	1.8E-03	0.99	0.4829	N.S
Error	0.16	87	1.8E-03			
Total	0.34	119				

El Cuadro 32 presenta el test de Duncan al 0.05 para la variable bloques, el cual permite comparar las medias entre bloques; encontrando tres grupos diferentes estadísticamente.

Cuadro 32: Test de Duncan para bloques ($\alpha=0.05$)

Bloque	Media	Agrupación
IV	0.29	A
II	0.23	B
III	0.20	B C
I	0.17	C

El Cuadro 32 muestra que existen tres grupos diferentes estadísticamente, siendo el bloque IV el que tuvo el mayor valor medio con 0.29 meq K⁺/100 gramos de suelo, y el bloque I obtuvo el menor valor con una media de 0.17 meq K⁺/100 gramos de suelo. La dinámica química del suelo se muestra en toda la investigación mostrando una heterogeneidad espacial y temporal del suelo.

El Cuadro 33 presenta el test de Duncan al 0.05 para la variable evaluaciones, que permite comparar las medias de las evaluaciones, encontrando tres grupos diferentes estadísticamente.

Cuadro 33: Test de Duncan para evaluaciones ($\alpha=0.05$)

Evaluación	Medias	Agrupación
5	0.34	A
1	0.23	B
4	0.21	B C
2	0.18	B C
3	0.16	C

La variable evaluaciones muestra tres grupos diferentes, encontrándose el valor más alto de potasio intercambiable en la evaluación 5 con un valor medio de 0.34 meq K⁺/100 gramos de suelo, y la evaluación 3 tiene el valor medio más bajo con 0.16 meq K⁺/100 gramos de suelo, después del primer lavado, se muestra que disminuyeron los valores de potasio intercambiable específicamente en la evaluación 3, por efecto del lavado y acarreo de este catión, ya que los riegos fueron constantes para mantener húmedo al suelo en todo momento de la investigación. La materia orgánica durante la mineralización liberó ciertos iones como el potasio que puede ser causa del incremento respecto a los valores iniciales, por otro lado, la materia orgánica también incrementa la capacidad de intercambio catiónico, cargas que fueron ocupadas por el catión potasio.

El Cuadro 34 presenta el test de Duncan al 0.05 para potasio intercambiable, el cual permite comparar las medias de los tratamientos, encontrando que no hay diferencias estadísticas.

Cuadro 34: Test de Duncan para tratamientos ($\alpha=0.05$)

Tratamiento	Medias	Agrupación
A D2	0.24	A
YA D2	0.23	A
A D1	0.23	A
YA D1	0.23	A
YA D3	0.21	A
Tg	0.18	A

El Cuadro 34 muestra que todos los tratamientos son estadísticamente iguales para potasio intercambiable, pero el test de Duncan permite comparar los tratamientos todos contra todos, a fin de establecer un orden de mérito; encontrado el valor medio más alto en el tratamiento AD2 (6 toneladas de azufre polvo seco por hectárea) con un valor medio de 0.24 meq K⁺/100 gramos de suelo y el más bajo corresponde al tratamiento testigo con valor medio de 0.18 meq K⁺/100 gramos de suelo.

El Cuadro 35 presenta el efecto combinado entre las medias de los tratamientos con las evaluaciones, los valores medios se han ordenado de forma descendente, encontrando los valores más altos de potasio intercambiable en la evaluación 5.

Cuadro 35: Efecto combinado entre las medias de cada tratamiento por evaluación

Evaluación	Tratamiento	Medias	Agrupación
5	YA D1	0.42	A
5	A D2	0.40	A B
5	A D1	0.36	A B C
5	YA D2	0.35	A B C D
1	A D2	0.27	A B C D E
4	YA D2	0.26	B C D E
4	A D1	0.25	B C D E
5	YA D3	0.25	B C D E
2	YA D1	0.24	C D E
1	YA D1	0.24	C D E
5	Tg	0.24	C D E
1	Tg	0.23	C D E
4	A D2	0.23	C D E
1	YA D2	0.22	C D E
1	A D1	0.21	C D E
3	YA D3	0.21	C D E
2	YA D3	0.20	C D E
3	YA D2	0.20	D E
1	YA D3	0.19	D E
4	YA D3	0.19	D E
4	Tg	0.18	E
2	A D2	0.17	E
3	A D1	0.16	E
2	A D1	0.16	E
3	A D2	0.16	E
2	Tg	0.15	E
2	YA D2	0.15	E
4	YA D1	0.14	E
3	YA D1	0.11	E
3.	Tg	0.11	E

En el efecto combinado entre las medias de los tratamientos en cada una de las evaluaciones, se han identificado cinco grupos diferentes estadísticamente, encontrando los valores medios más altos en la evaluación 5, siendo el tratamiento YAD1 (8 toneladas de yeso agrícola por hectárea) el que presentó el valor medio más alto con 0.42 meq K⁺/100 gramos de suelo, y el valor medio más bajo es 0.11 meq K⁺/100 gramos de suelo, que le corresponde al tratamiento testigo en la evaluación 3, lo que podemos decir que hubo un descenso del catión potasio intercambiable después del primer lavado, para incrementarse posteriormente en la evaluación 5, ya sea por mineralización de la materia orgánica o por oportunidad de carga, que pudo ser ocupada por el potasio.

La Figura 11 presenta la dinámica del potasio intercambiable, muestra que la mayoría de los tratamientos tienen la misma tendencia, con excepción del tratamiento YAD3 (22 toneladas de yeso agrícola por hectárea), los valores finales de potasio intercambiable fueron superiores a los valores iniciales.

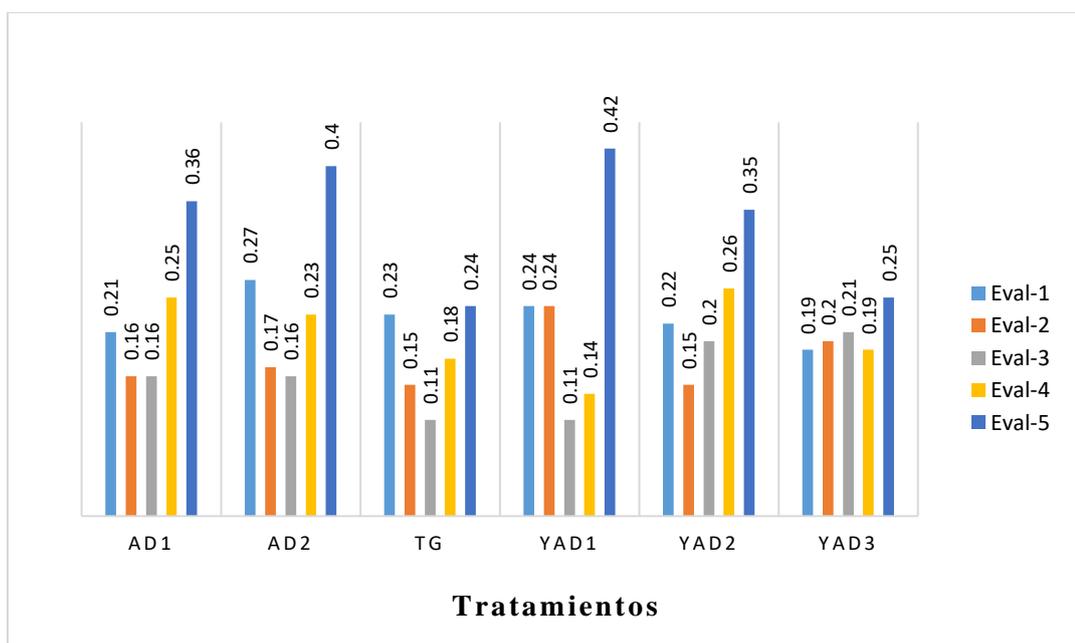


Figura 11: Variación de las medias de K⁺ intercambiable (meq/100g-suelo) en cada tratamiento según evaluación

En la Figura 11 se puede apreciar que los valores medios de potasio intercambiable en la evaluación 5 fueron superiores en todos los tratamientos, comparados con los valores iniciales, lo cual quiere decir que existió intercambio catiónico, donde el potasio tuvo la posibilidad de ocupar en parte las cargas coloidales, disminuyendo la concentración de otros cationes como el magnesio y sodio que fueron los que se redujeron de los sitios de canje.

4.10. EFECTO DE LOS MEJORADORES Y DOSIS SOBRE EL SODIO INTERCAMBIABLE

El Cuadro 36 presenta el análisis de varianza para sodio intercambiable con un coeficiente de variabilidad de 14.83 por ciento, se denota que es altamente significativo para la variable bloques y no es significativo para las variables evaluaciones y tratamientos, tampoco para el efecto combinado entre las medias de los tratamientos y las evaluaciones.

Cuadro 36: Análisis de varianza para Na⁺ intercambiable (meq/100g)

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor	Significación
Bloque	0.44	3	0.15	21.10	<0.0001	**
Evaluación	0.04	4	0.01	1.30	0.2756	N.S
Tratamiento	0.08	5	0.02	2.41	0.0428	N.S
Evaluación*Tratamiento	0.11	20	0.01	0.80	0.7113	N.S
Error	0.61	87	0.01			
Total	1.28	119				

El Cuadro 37 presenta el test de Duncan al 0.05 para la variable bloques, que permite comparar las medias entre bloques, encontrando tres grupos estadísticamente diferentes.

Cuadro 37: Test de Duncan para bloques ($\alpha=0.05$)

Bloque	Medias	Agrupación
I	3.49	A
II	2.96	B
III	2.64	B
IV	1.97	C

La prueba de Duncan al 0.05 para la variable bloques muestra tres grupos diferentes, siendo el bloque I el que presentó el mayor valor medio con 3.49 meq Na⁺/100 gramos de suelo, los bloques II y III presentaron valores medios de 2.96 y 2.64 meq Na⁺/100 gramos de suelo, y el bloque IV presentó el de menor valor medio con 1.97 meq Na⁺/100 gramos de suelo, estos resultados muestran que existió heterogeneidad del suelo del área experimental, siendo una parte el área más afectada por el catión sodio intercambiable y otra menos afectada, tal como lo refleja las medias de los bloques.

El Cuadro 38 presenta el test de Duncan al 0.05 para la variable evaluaciones, que permite comparar la dinámica del sodio intercambiable entre evaluaciones; encontrando dos grupos estadísticamente diferentes.

Cuadro 38: Test de Duncan para evaluaciones ($\alpha=0.05$)

Evaluación	Medias	Agrupación
1	3.03	A
3	2.88	A B
4	2.86	A B
5	2.57	A B
2	2.49	B

En el Cuadro 38 se aprecian los valores medios de la variable evaluaciones, mostrando dos grupos diferentes, le corresponde el valor medio más alto a la evaluación 1 con 3.03 meq Na⁺/100 gramos de suelo, la evaluación 2 presentó el valor medio más bajo igual a 2.49 meq Na⁺/100 gramos de suelo, al comparar la dinámica del sodio intercambiable se observa que disminuyó, respecto a los valores iniciales, pero en menor cantidad que el magnesio, lo que quiere decir que el magnesio intercambiable desmejora la estructura del suelo, ya que es un catión altamente hidratado que dispersa los coloides del suelo.

El Cuadro 39 presenta el test de Duncan al 0.05 para la variable tratamientos, que permite comparar los valores medios de sodio intercambiable entre tratamientos.

Cuadro 39: Test de Duncan para tratamientos ($\alpha=0.05$)

Tratamiento	Medias	Agrupación
YA D3	3.27	A
A D2	2.93	A B
Tg	2.74	A B
A D1	2.69	B
YA D1	2.49	B
YA D2	2.47	B

En el Cuadro 39 se presenta el catión sodio intercambiable en los diferentes tratamientos, mostrando dos grupos con diferencias estadísticas, El valor medio más alto de sodio intercambiable se encontró en el tratamiento YAD3 (22 toneladas de yeso agrícola por hectárea) con un valor medio de 3.27 meq Na⁺/100 gramos de suelo, y el valor medio más bajo le corresponde al tratamiento YAD2 (12 toneladas de yeso agrícola por hectárea) con un valor de 2.47 meq Na⁺/100 gramos de suelo.

El Cuadro 40 presenta el efecto combinado entre las medias de los tratamientos y las evaluaciones, los valores medios de sodio intercambiable se han ordenado de forma descendente.

Cuadro 40: Efecto combinado entre las medias de cada tratamiento por evaluación

Evaluación	Tratamiento	Medias	Agrupación
1	YA D3	4.10	A
1	A D2	3.77	A B
3	YA D3	3.40	A B C
4	YA D3	3.15	A B C
5	Tg	3.11	A B C
1	A D1	3.11	A B C
3	A D2	3.05	A B C
4	Tg	3.00	A B C
4	A D2	2.98	A B C
4	YA D1	2.93	A B C
5	YA D3	2.88	A B C
3	A D1	2.82	A B C
2	YA D3	2.81	A B C
3	YA D1	2.74	A B C
3	Tg	2.69	B C
2	A D2	2.64	B C
3	YA D2	2.56	B C
4	A D1	2.56	B C
5	A D1	2.54	B C
4	YA D2	2.53	B C
2	Tg	2.53	B C
1	YA D2	2.49	B C
2	A D1	2.44	B C
2	YA D2	2.39	B C
1	Tg	2.38	B C
5	YA D2	2.36	B C
1	YA D1	2.32	C
5	YA D1	2.32	C
5	A D2	2.24	C
2	YA D1	2.15	C

En el efecto combinado entre las medias de los tratamientos y las evaluaciones se han identificado tres grupos estadísticamente diferentes, encontrando el valor medio más alto en el tratamiento YAD3 (22 toneladas de yeso agrícola por hectárea) en la evaluación 1, cuyo valor es de 4.10 meq Na⁺/100 gramos de suelo, y el valor medio más bajo es 2.15 meq Na⁺/100 gramos de suelo, que le corresponde al tratamiento YAD1 (8 toneladas de yeso agrícola por hectárea) en la evaluación 2. La dinámica del sodio intercambiable fue muy variable, pues no siguió un patrón como los otros cationes, se observa que las evaluaciones 2 y 5 mostraron los valores más bajos, en la evaluación 2, es posible que la disminución de sodio intercambiable se deba al acarreo por lavado, para el caso de la evaluación 5 la disminución se debe al reemplazamiento de otro catión como calcio y en menor posibilidad el potasio, que son los cationes que subieron sus concentraciones al final de la investigación, mientras que los cationes magnesio y sodio intercambiable fueron los cationes que disminuyeron su concentración respecto al valor inicial.

La Figura 12 presenta la dinámica del sodio intercambiable, se muestra que los tratamientos que recibieron algún mejorador químico muestran la misma tendencia, con excepción del tratamiento testigo.

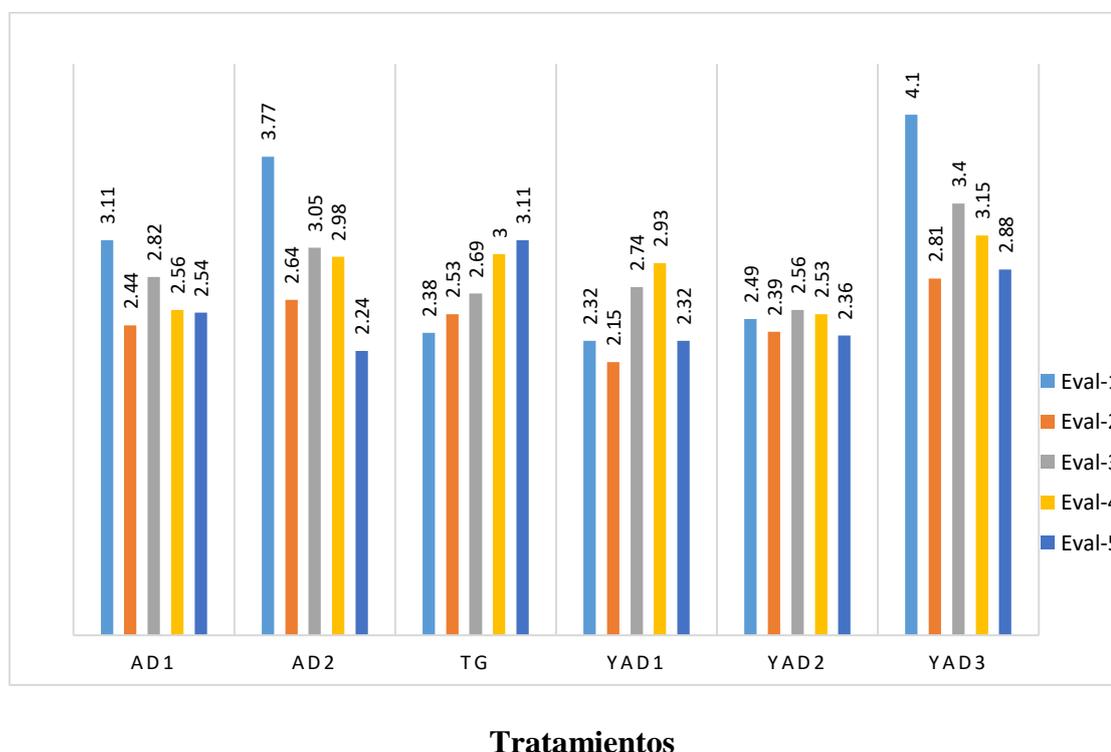


Figura 12: Variación de las medias de Na⁺ intercambiable (meq/100g-suelo) en cada tratamiento según evaluación

En la Figura 12 se puede apreciar que los valores medios iniciales de sodio intercambiable fueron superiores en todos los tratamientos y presentaron el mismo comportamiento, descendiendo en la evaluación 2, luego se incrementó en la evaluación 3 y 4 y finalmente descendió en la evaluación 5, con excepción del tratamiento testigo, que tuvo valores ascendentes en cada evaluación, los tratamientos que recibieron algún mejorador químico terminaron con un valor de sodio intercambiable por debajo del valor inicial, mostrando que si existió reemplazamiento del sodio intercambiable, sin embargo el tratamiento testigo tuvo un incremento en el tiempo tal como se ve en la Figura 12.

4.11. EFECTO DE LOS MEJORADORES Y DOSIS SOBRE EL PORCENTAJE DE SODIO INTERCAMBIABLE (PSI)

El Cuadro 41 presenta el análisis de varianza para el PSI, con un coeficiente de variabilidad de 14.3 por ciento, muestra que existió alta significación estadística para las variables bloques y evaluaciones, siendo no significativo para la variable tratamientos y para el efecto combinado entre las medias de los tratamientos y las evaluaciones.

Cuadro 41: Análisis de varianza para el PSI

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor	Significación
Bloque	1.11	3	0.37	10.90	<0.0001	**
Evaluación	1.29	4	0.32	9.55	<0.0001	**
Tratamiento	0.29	5	0.06	1.70	0.1423	N.S
Evaluación*Tratamiento	0.59	20	0.03	0.88	0.6141	N.S
Error	2.91	86	0.03			
Total	6.20	118				

El Cuadro 42 presenta el test de Duncan al 0.05 para la variable bloques, que permite comparar las medias entre bloques, encontrando tres grupos estadísticamente diferentes.

Cuadro 42: Test de Duncan para bloques ($\alpha=0.05$)

Bloque	Medias	Agrupación
I	28.38	A
II	21.57	B
III	20.78	B
IV	13.58	C

El Cuadro 42 muestra que hay tres grupos estadísticamente diferentes siendo el bloque I el de mayor valor medio, con un PSI de 28.38, y el bloque IV tiene el valor medio más bajo con un PSI de 13.58, los resultados hacen denotar la variabilidad del suelo para esta característica.

El Cuadro 43 presenta el test de Duncan al 0.05 para la variable evaluaciones, que permite comparar los valores medios de PSI entre evaluaciones durante el tiempo de investigación.

Cuadro 43: Test de Duncan para evaluaciones ($\alpha=0.05$)

Evaluación	Medias	Agrupación
3	29.11	A
4	24.21	A B
2	19.38	B C
1	17.78	C
5	14.92	C

La variable evaluaciones muestra tres grupos que se diferencian estadísticamente, el valor medio más alto se encontró en la evaluación 3 con un PSI de 29.11, es posible que el incremento del PSI se debió al descenso del calcio intercambiable que tuvo en esa evaluación por motivos de lavado; sin embargo, el valor medio más bajo es 14.92, el cual pertenece a la evaluación 5, lo que quiere decir que al final de la investigación se redujo el PSI.

El Cuadro 44 presenta el test de Duncan al 0.05 para la variable tratamientos, que permite comparar los valores medios de PSI entre tratamientos.

Cuadro 44: Test de Duncan para tratamientos ($\alpha=0.05$)

Tratamiento	Medias	Agrupación
Tg	25.36	A
YA D3	23.78	A
A D2	21.80	A B
YA D1	19.90	A B
A D1	19.19	A B
YA D2	16.42	B

La variable tratamientos denota dos grupos con diferencias estadísticas, el valor medio más alto del PSI se encontró en el tratamiento testigo con un valor medio de 25.36, ya que este tratamiento no recibió ningún mejorador químico, eso quiere decir que la aplicación de materia orgánica no es suficiente para bajar el PSI, por lo que es necesario de mejoradores químicos; el valor medio más bajo le corresponde al tratamiento YAD2 (12 toneladas de yeso agrícola por hectárea) con un PSI de 16.42.

El Cuadro 45 presenta el efecto combinado entre las medias de los tratamientos en las evaluaciones realizadas, los valores medios de PSI se han ordenado de forma descendente.

Cuadro 45: Efecto combinado entre las medias de cada tratamiento por evaluación

Evaluación	Tratamiento	Medias	Agrupación
3	A D2	35.03	A
3	Tg	33.26	A B
4	Tg	31.78	A B
3	YAD1	31.65	A B
4	YAD1	28.45	A B C
3	YAD3	28.41	A B C
4	A D2	26.13	A B C D
3	A D1	26.11	A B C D
1	YAD3	25.99	A B C D
4	YAD3	24.99	A B C D
5	Tg	22.44	A B C D
2	Tg	22.27	A B C D
1	A D1	21.38	A B C D
3	YAD2	20.17	A B C D
2	YAD3	19.94	A B C D
5	YAD3	19.59	A B C D
2	A D2	19.42	A B C D
2	YAD2	19.14	A B C D
2	A D1	18.47	B C D
1	A D2	17.84	B C D
1	Tg	17.07	B C D
2	YAD1	17.04	B C D
4	A D1	16.96	B C D
4	YAD2	16.93	B C D
1	YAD2	13.22	C D
5	A D1	13.04	C D
5	YAD2	12.67	C D
5	YAD1	11.21	D
1	YAD1	11.16	D
5	A D2	10.57	D

En el efecto combinado entre las medias de los tratamientos y las evaluaciones se encontraron cuatro grupos diferentes estadísticamente, encontrando los valores más altos en la evaluación 3, debido a que el calcio intercambiable disminuyó en ese momento, incrementándose el sodio intercambiable respecto a la evaluación 2, eso permite afirmar que en algún momento de la investigación el sodio también ocupó las cargas libres. El tratamiento AD2 (6 toneladas de azufre polvo seco por hectárea) tuvo el PSI más alto cuyo valor medio es 35.03, en la evaluación 3; ese mismo tratamiento tuvo el valor medio más bajo, pero en la evaluación 5 con un PSI de 10.57. De los mejoradores químicos utilizados, el azufre polvo seco es un mejorador de reacción lenta y generador de ácidos, ya que inicialmente el PSI del tratamiento AD2 fue el más alto y con el transcurrir del proceso de recuperación, el azufre aciduló al suelo tal como se muestra en el análisis del pH y solubilizó al carbonato de calcio liberando calcio a la solución del suelo, permitiendo que el coloide adsorbiera al calcio solubilizado e incremente el porcentaje de calcio intercambiable.

La Figura 13 presenta la dinámica del PSI, se muestra que los tratamientos que recibieron algún mejorador químico muestran la misma tendencia al final de la investigación, con excepción del tratamiento testigo.

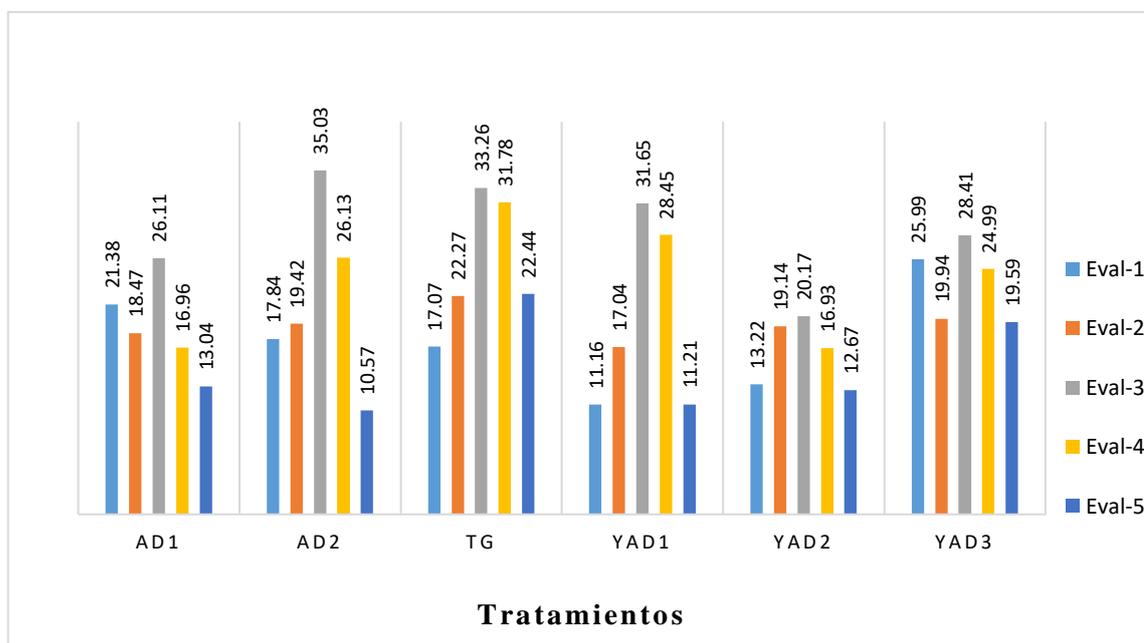


Figura 13: Variación de las medias del PSI en cada tratamiento según evaluación

En la Figura 13 se puede apreciar que los valores finales de PSI fueron en su mayoría inferiores respecto al valor inicial, con excepción del tratamiento testigo, cuyo PSI final fue

22. 44, siendo mayor que al inicio de la investigación en la evaluación 1, por otro lado, en las evaluaciones 3 y 4 hay un incremento significativo debido al incremento de sodio intercambiable y a la disminución de calcio intercambiable, esto es más contundente en la evaluación 3. Los tratamientos con azufre polvo seco disminuyeron el PSI al final de investigación, mientras que los tratamientos con yeso agrícola solo el tratamiento YAD3 (22 toneladas de yeso agrícola por hectárea) logro bajar el PSI, los demás tratamientos mantuvieron su PSI respecto al inicio de la investigación.

4.12. DINÁMICA DEL CARBONATO DE CALCIO (CaCO₃) COMO FUENTE DE CALCIO EN LA RECUPERACIÓN DE SUELOS SALINO-SÓDICO

El Cuadro 46 presenta el análisis de varianza para carbonato de calcio, con un coeficiente de variabilidad de 30.98 por ciento, se denota alta significación estadística para la variable tratamiento y es no significativo para las variables bloques, evaluaciones y para la interacción entre las medias de los tratamientos y evaluaciones.

Cuadro 46: Análisis de varianza para carbonato de calcio

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor	Significación
Bloque	0.38	3	0.13	0.38	0.7695	N.S
Evaluación	1.12	4	0.28	0.84	0.5035	N.S
Tratamiento	7.94	5	1.59	4.78	0.0007	**
Evaluación*Tratamiento	5.21	20	0.26	0.78	0.7263	N.S
Error	28.91	87	0.33			
Total	43.55	119				

El Cuadro 47 presenta el test de Duncan al 0.05 para la variable bloques, donde se comparan las medias entre bloques, se denota que no hay diferencias estadísticas y que todos los bloques son iguales estadísticamente, de los cuales sobresalió el bloque II con un valor medio de 1.94 por ciento de carbonato de calcio y el más bajo corresponde al bloque III con una media de 1,78 por ciento.

Cuadro 47: Test de Duncan para bloques ($\alpha=0.05$)

Bloque	Medias	Agrupación
II	1.94	A
I	1.88	A
IV	1.85	A
III	1.78	A

El Cuadro 48 presenta el test de Duncan para la variable evaluaciones, el cual permite comparar los valores medios entre evaluaciones, se muestra que no hay diferencias estadísticas, pero numéricamente sobresalió la evaluación 4 con 1.98 por ciento de carbonato de calcio y el valor medio más bajo corresponde a la evaluación 3 con una media de 1,72 por ciento.

Cuadro 48: Test de Duncan para evaluaciones ($\alpha=0.05$)

Evaluación	Medias	Agrupación
4	1.98	A
1	1.96	A
5	1.86	A
2	1.81	A
3	1.72	A

El Cuadro 49 presenta el test de Duncan al 0.05 para la variable tratamientos, el cual permite comparar las medias entre tratamientos, muestra que hay diferencias estadísticas, mostrando dos grupos estadísticamente diferentes.

Cuadro 49: Test de Duncan para tratamientos ($\alpha=0.05$)

Tratamiento	Medias	Agrupación
YAD3	2.13	A
Tg	2.12	A
YA D2	1.90	A
YA D1	1.87	A
A D1	1.77	A
A D2	1.37	B

La variable tratamientos muestra dos grupos diferentes estadísticamente obteniendo el valor más alto en el tratamiento YAD3 (22 toneladas de yeso agrícola por hectárea) con 2.13 por ciento de CaCO_3 y el valor medio más bajo lo obtuvo el tratamiento AD2 (6 toneladas de azufre polvo seco por hectárea) con 1.37 por ciento de CaCO_3 . Los tratamientos con azufre son los que mostraron los valores más bajos, esto debido a que este mejorador es un formador de ácidos, los cuales solubilizan al carbonato de calcio del suelo.

El Cuadro 50 presenta el efecto combinado entre las medias de los tratamientos y las evaluaciones, los valores medios de carbonato de calcio se han ordenado de forma descendente.

Cuadro 50: Efecto combinado entre las medias de cada tratamiento por evaluación

Evaluación	Tratamiento	Medias	Agrupación				
5	YAD3	2.54	A				
2	Tg	2.41	A	B			
4	Tg	2.31	A	B			
4	YAD3	2.26	A	B			
1	AD1	2.22	A	B			
5	Tg	2.16	A	B	C		
4	YAD2	2.16	A	B	C		
4	YAD1	2.04	A	B	C		
1	YAD3	2.02	A	B	C		
3	YAD2	1.99	A	B	C	D	
1	YAD1	1.97	A	B	C	D	
5	YAD1	1.96	A	B	C	D	
1	YAD2	1.96	A	B	C	D	
2	YAD3	1.95	A	B	C	D	
4	AD1	1.93	A	B	C	D	
3	Tg	1.92	A	B	C	D	
3	YAD3	1.89	A	B	C	D	
2	YAD2	1.84	A	B	C	D	
1	Tg	1.82	A	B	C	D	
1	AD2	1.79	A	B	C	D	
5	AD1	1.75	A	B	C	D	
2	YAD1	1.70	A	B	C	D	
3	YAD1	1.70	A	B	C	D	
5	YAD2	1.56	A	B	C	D	
2	AD1	1.56	A	B	C	D	
2	AD2	1.44	B			C	D
3	AD2	1.42	B			C	D
3	AD1	1.42	B			C	D
4	AD2	1.18	C			D	
5	AD2	1.00	D				

En el efecto combinado entre las medias de los tratamientos y las evaluaciones se encontraron cuatro grupos diferentes estadísticamente, encontrando los valores más altos en los tratamientos con yeso agrícola, el cual es considerado como una sal soluble. Este mejorador químico aporta calcio que al unirse con el anión carbonato precipita formando carbonato de calcio razón por lo que muestran los valores más altos sobre todo en las últimas evaluaciones. El tratamiento YAD3 (24 toneladas de yeso agrícola por hectárea) mostró los valores medios más altos con 2.54 por ciento de carbonato de calcio, y el valor más bajo de CaCO_3 se encontró en el tratamiento AD2 (6 toneladas de azufre polvo seco por hectárea) en la evaluación 5, debido a que el azufre polvo seco en un formador de ácidos, que bajan el pH del suelo solubilizando al CaCO_3 existente en el suelo, siendo este la fuente de calcio para la rehabilitación de suelos salino-sódicos.

La Figura 14 presenta la dinámica del CaCO_3 , los tratamientos no muestran un mismo patrón, pero si tienen la misma dinámica los tratamientos con azufre polvo seco.

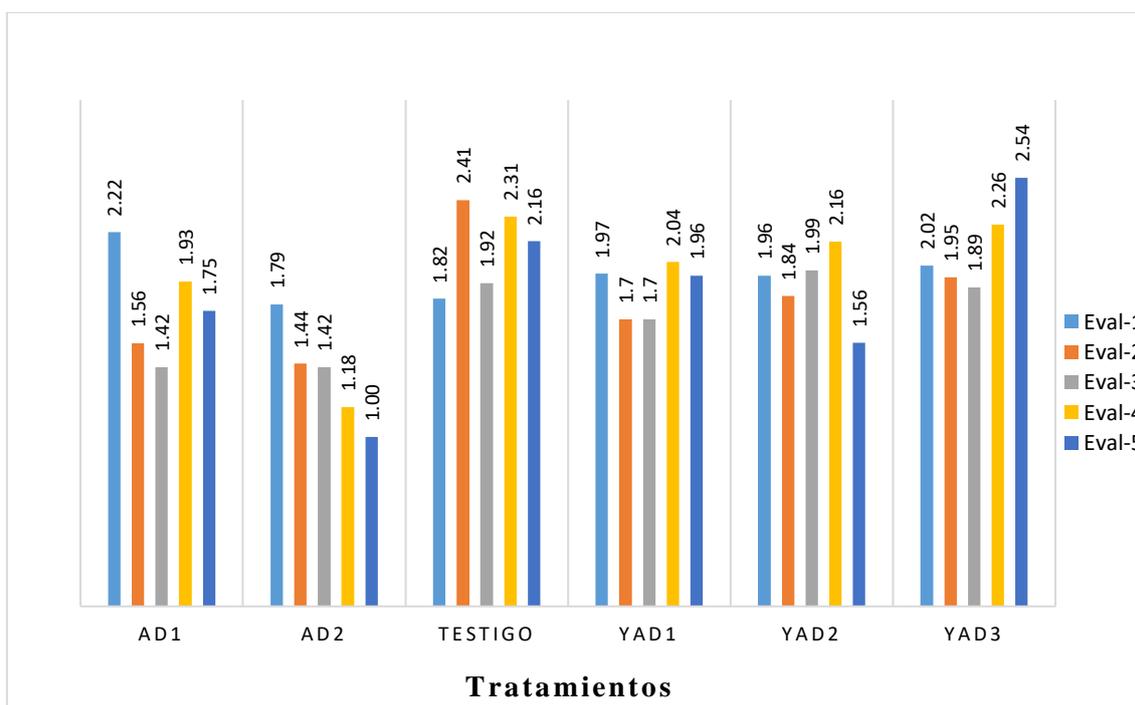


Figura 14: Variación de las medias de CaCO_3 (%) en cada tratamiento según evaluación

La Figura 14 muestra el comportamiento del carbonato de calcio, los tratamientos donde se utilizó el azufre polvo seco muestran valores medios finales por debajo del valor medio inicial; como consecuencia de la transformación del azufre a sulfato por oxidación microbiológica principalmente del género *Thiobacillus*, lo que permite que el CaCO_3 presente en el suelo reaccione con el H_2SO_4 , solubilizando y liberando calcio a la solución que luego ocuparía los sitios de cambio.

En el caso del tratamiento testigo y los tratamientos con yeso agrícola con excepción del tratamiento YAD2 (12 toneladas de yeso agrícola por hectárea), la tendencia final fue a incrementar el CaCO_3 . Los carbonatos que existen en el suelo o los que se encuentran formando parte de la composición química del agua, se unen con el catión calcio producto de la solubilización del yeso agrícola aplicado, formando compuestos insolubles razón por la que se incrementó el CaCO_3 a medida que avanzó la investigación.

4.13. DEMOSTRACIÓN DE LA RECUPERACIÓN DE SUELOS SALINO-SÓDICOS UTILIZANDO UN TEST BIOLÓGICO

Los suelos salinos acumulan sales solubles en el suelo causando una disminución en la absorción del agua y nutrientes en los cultivos, debido al aumento de la presión osmótica de la solución suelo, por otro lado, el exceso de sodio intercambiable desmejora algunas propiedades físicas y químicas del suelo. Por lo tanto, la recuperación no debe concluir con reducir la CE y el PSI a rangos aceptables para los cultivos, más bien debe haber una respuesta en la germinación de las semillas, en la emergencia, en el desarrollo de los cultivos y en el rendimiento de los mismos; considerando los efectos de un suelo salino-sódico sobre los cultivos, se instaló un test biológico para demostrar dicha recuperación, que consistió en sembrar el cultivo de maíz (*Zea mays* L.) como cultivo indicador, en dicho test se evaluó el porcentaje de germinación, siendo uno de los indicadores de la recuperación de dichos suelos.

La Figura 15 presenta el porcentaje de germinación del maíz (*Zea mays* L.) en cada tratamiento con lo cual podemos afirmar que si hay recuperación de los suelos con problemas de salinidad y sodio intercambiable.

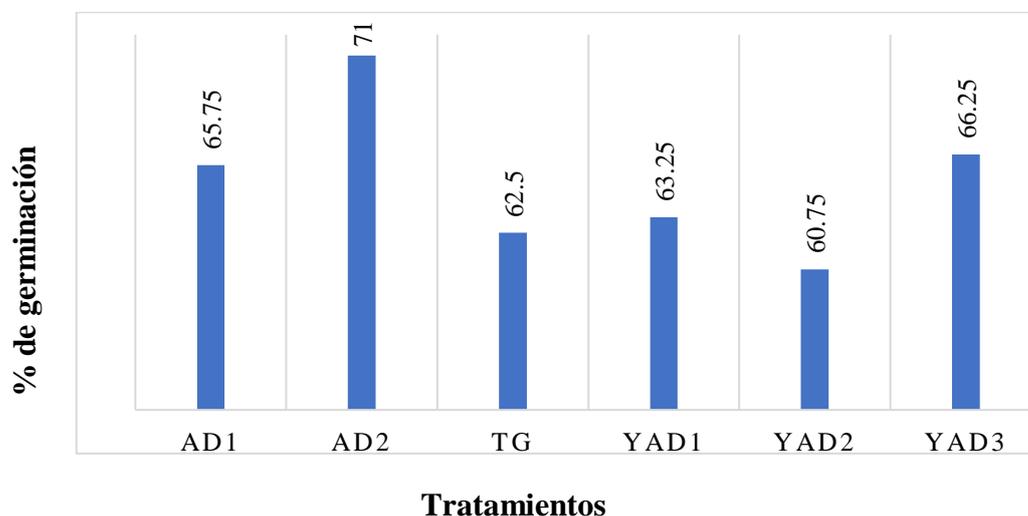


Figura 15: Medias del porcentaje de germinación por cada tratamiento

En la Figura 15 se muestra el porcentaje de germinación del test biológico para cada tratamiento destacando el tratamiento AD2 (6 toneladas de azufre polvo seco por hectárea) con 71 por ciento, seguido del tratamiento YAD3 (22 toneladas de yeso agrícola por hectárea); el tratamiento con menor porcentaje de germinación fue YAD2 (12 toneladas de yeso agrícola por hectárea) con 60.75 por ciento.

V. CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos, se puede concluir:

- El azufre polvo seco es el mejorador químico que demostró mejores efectos en la rehabilitación de suelos salino-sódicos.
- Con el tratamiento AD2, 6 toneladas de azufre polvo seco por hectárea, se logró reducir el sodio intercambiable de 3.77 meq /100 gramos de suelo hasta 2.24 meq /100 gramos de suelo, siendo valor más bajo al término del experimento.
- Con el tratamiento AD2, 6 toneladas de azufre polvo seco por hectárea, se logró reducir el PSI final hasta 10.57, siendo el valor más bajo del experimento.
- El primer riego de lavado redujo drásticamente la conductividad eléctrica en todos los tratamientos, con un volumen de agua total de 18,000 m³ /ha.
- Los tratamientos AD1, 4 toneladas de azufre polvo seco por hectárea y AD2, 6 toneladas de azufre polvo seco por hectárea, redujeron el carbonato de calcio por su característica de formar ácidos.

VI. RECOMENDACIONES

- Para futuros trabajos de investigación, se recomienda ubicar el experimento en suelos problema que sean lo más homogéneos posibles, dado la variabilidad espacial de los suelos.
- Se debe crear las condiciones idóneas para la proliferación de los microorganismos del suelo, principalmente del género *Thiobacillus*, que son los más importantes en la oxidación del azufre.
- El drenaje debe mantenerse después del proceso de recuperación, ya que va a permitir seguir lavando el suelo y evitar el retorno de los iones solubles a la capa superficial.
- El uso agrícola de suelos recuperados deben iniciarse con cultivos tolerantes, ya que el proceso de recuperación es lento y prolongado.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allison, L. 1952. Effect of synthetic polyelectrolytes in the structure of saline and alkali soils. Soil Science June 1952. 73: 443-453.

Arrunategui, M. 1996. Efecto del lavaje, enmienda y fertilización en un suelo salino del bajo Piura. Tesis. Universidad Nacional Agraria la Molina. Lima, Peru.1966. 112p.

Bazán, R. 2017. Manual de procedimientos de los análisis de suelos y agua con fines de riego. Lima- Perú. 2017.

Bohn, H.; McNeal, B. y O'córdor, G. 1993. Química del suelo. Primera edición. México,1993.

Del pardo, C.; Ciaponi, M.; Díaz, J y Velázquez, E. 2015. Efecto de la dosis y tamaño de partícula de yeso sobre las propiedades físicas de un suelo de invernáculo regado con aguas bicarbonatadas sódicas. 2015.

Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América, 1962. Diagnóstico y recuperación de suelos salinos y sódicos. Manual de agricultura N.º 60, segunda edición. Instituto Nacional de investigaciones agrícolas. Méjico. 1962.

Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. 1999. Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. 1999.

Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. 2010. Servicio de conservación de recursos naturales, 2010. Claves para la taxonomía de suelos. Octava edición, 2010.

DEPOLTI (Dirección ejecutiva proyecto especial Olmos-Tinajones), 2004. Estudio de la condición de la cuenca Chancay-Lambayeque.

FAO, 2005. Management of irrigation-induced salt-affected soils. Joint publication of CISEAU, IPTRID and FAO, Rome. p.34-65.

Fassbender, H. W. y Bornemisza, E. 1994. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. Instituto interamericano de cooperación para la agricultura.1994.

Ferrer, A. 1995. Mejoramiento de un suelo salino en la hacienda San Antonio, Cañete. Tesis Universidad Nacional Agraria la Molina. Lima, Peru.1955. 88pp.

Fuentes, J. 1999. El suelo y los fertilizantes. 5ª Edición. Madrid,1999.

Guevara, P. 1968. Recuperación de suelos salinos-sódicos en el valle bajo Piura. Tesis. Universidad Nacional Agraria la Molina. Lima, Peru.1968. 82p.

García, E. 2003. Curso internacional “Manejo de cultivos en suelos salinos” INSTITUTO DE DESARROLLO AGRARIO DE LAMBAYEQUE.

Hurtado, L. 2003. Manejo y conservación del suelo fundamentos y prácticas. Segunda edición. Lima-Perú,2003.

Ministerio de Agricultura, 1972. Estudio agrológico detallado del valle Chancay - La Leche: departamento de Lambayeque. MINAG, 1972-03.

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 2006. Control de la salinización de los suelos y aguas, y recuperación de suelos salinos. XI Máster internacional de ingeniería de riego y drenaje. Madrid.2006.

Pizarro, F. 1978. Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos. Editora agrícola española, S.A. Madrid,1978.

Pizarro, F. 1996. Riego localizado de alta frecuencia (RLAF): goteo, microaspersión, exudación. 2.º edición. Madrid. Ediciones. Mundi-Prensa. 471p. 1996.

Porta, J.; López, M y Roquero, C. 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. 3.º edición. 2003.

Zeña, J. 2003. Curso internacional “Manejo de cultivos en suelos salinos” INSTITUTO DE DESARROLLO AGRARIO DE LAMBAYEQUE.

<http://es.wikipedia.org/wiki/suelo>. Wikipedia, 2010. Suelos salinos UNESCO.

<http://www.yesoyam.com.ar>. Yeso Agrícola Malargüe, 2007.

<https://www.intagri.com>

VIII. ANEXOS

Proyecto. : Tesis de Maestría.
 Solicitante. : Roso Próspero Pasache Chapoñán
 Tipo de análisis. : Análisis de caracterización.
 Procedencia de la muestra. : Parcela experimental-Mochumi-Lambayeque.
 Parcela, Coordenadas, Área. : Centroide 61744QN - 9270887E
 Fecha de recepción de muestras. : 24.04.2018.
 Fecha de reporte de resultados. : 27.04.2018.

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE LABORATORIO.

Codigo de Muestra (suelo)	pH (1:1)	CE (ds/m) (1:1)	CaCO ₃ %	M.O %	P ppm	K ppm	Distribución de Partículas-USDA			Clase textural	D. ap g/cm ³	CIC Mecq/100g	Cationes intercambiables Mecq/100 g				Suma de cationes cambiables		
							Ao %	Lo %	Ar %				Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺		H ⁺ +Al ³⁺	PSB
Horizonte Ap (0-26cm)	7.33	31.60	2.24	1.27	8.62	62	69.52	10.00	20.48	FrArAo	1.54	13.29	5.40	1.60	0.09	6.28	0.00	100	13.29
Horizonte C1 (26-70cm)	7.38	15.96	0.00	0.48	1.83	34	63.52	20.00	16.48	FrAo	1.57	8.46	3.20	1.20	0.03	4.23	0.00	100	8.46
Horizonte C2 (70-101cm)	7.37	12.28	0.00	0.32	2.45	45	79.52	14.00	6.48	AoFr	1.59	6.32	3.00	0.80	0.05	2.47	0.00	100	6.32
Horizonte C3 (101-+171cm)	7.25	20.25	0.00	0.18	1.54	29	71.52	14.00	14.48	FrAo	1.55	7.96	3.36	1.60	0.02	2.98	0.00	100	7.96



Figura 16: Test biológico en su fase vegetativa para demostrar la recuperación de suelos salino - sódicos



Figura 17: Test biológico en fase reproductiva