



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO**

**POSTGRADO DE EDAFOLOGÍA**

**IMPACTO AMBIENTAL DE LOS SEDIMENTOS  
LACUSTRES DEPOSITADOS EN MINAS DE  
TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO:  
CONTAMINACIÓN Y RESTAURACIÓN**

**ERIKA IRAIS MELÉNDEZ GARCÍA**

**T E S I S**  
**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL**  
**PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRA EN CIENCIAS**

**MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO**

2022

La presente tesis titulada: **Impacto ambiental de los sedimentos lacustres depositados en minas de Texcoco, Estado de México: contaminación y restauración** realizada por la alumna: **Erika Irais Meléndez García** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS  
EDAFOLOGÍA

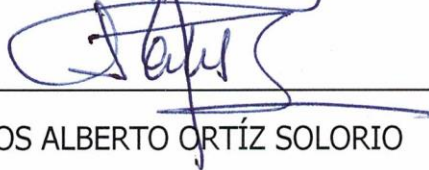
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO (A)



\_\_\_\_\_  
DRA. MA DEL CARMEN GUTIÉRREZ CASTORENA

ASESOR (A)



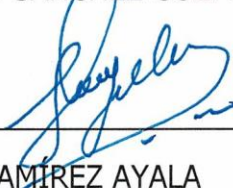
\_\_\_\_\_  
DR. CARLOS ALBERTO ORTÍZ SOLORIO

ASESOR (A)



\_\_\_\_\_  
M.C. PATRICIO SÁNCHEZ GUZMÁN

ASESOR (A)



\_\_\_\_\_  
DR. CARLOS RAMÍREZ AYALA

Montecillo, Texcoco, Estado de México, México, junio de 2022

# **IMPACTO AMBIENTAL DE LOS SEDIMENTOS LACUSTRES DEPOSITADOS EN MINAS DE TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO: CONTAMINACIÓN Y RESTAURACIÓN.**

Erika Irais Meléndez García, M.C.  
Colegio de Postgraduados, 2022.

## **RESUMEN**

El material lacustre que compone el ex Lago de Texcoco, denominado “jaboncillo”, es conocido por su hipersalinidad, contenido de metales pesados y baja estabilidad mecánica. Con la construcción del Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, en 2014, se extrajo el jaboncillo de la zona y parte de ese material fue transportado y depositado en rellenos sueltos o densos en socavones de minas de las comunidades de San Miguel Tlaixpan (forma de montículos) y San Nicolás Tlaminca (forma concoidal), Texcoco, Estado de México donde, con el paso del tiempo, se han estado oxidando y secando. El objetivo de este trabajo fue conocer los rellenos a través de una caracterización física, química y mineralógica, determinar su impacto ambiental y evaluar el efecto del lavado de los rellenos con mejoradores orgánicos e inorgánicos. Lo anterior con el fin de disminuir la salinidad y permitir el desarrollo de plantas halófitas nativas como romero (*Suaeda edulis*), pasto salado (*Distichlis spicata* (L.) *greene*) y rodadora (*Kochia scoparia* (L.)); así como cultivos tolerantes a la salinidad (cebada (*Hordeum vulgare*) y betabel (*Beta vulgaris*)). Los rellenos son hipersódicos con pH >8.5, CE hasta de 117 dS m<sup>-1</sup> y PSI >150, colores negros mezclados con gris atribuidos a la presencia de sulfuros de Fe, Cu y con procesos de oxidación y formación de minerales, por lo que tienen un alto impacto ambiental. Los minerales primarios son amorfos, albita, calcita, anotita, halloysita, calcopirita y glauberita, y los secundarios son halita, trona y en menor cantidad ferrihidrita, covalita, polyhalita, arsenopirita y calcosiderita, cuando disminuye la humedad. La aplicación de riegos y mejoradores de suelo disminuyó la salinidad y sodicidad hasta clasificar los rellenos como no salinos, y con ello el desarrollo de la vegetación establecida. Los tratamientos E<sub>200</sub> y Y<sub>200</sub> mostraron diferencias altamente significativas (p > 0.05) para mejorar la condición de sodicidad de los rellenos. Sin embargo, la aplicación de estiércol, al ser de bajo costo, puede ser útil para la remediación de los rellenos, dado que mejoraron las propiedades físicas, como la estructura, aumento de porosidad, permeabilidad y por lo tanto drenaje, que favorece la lixiviación de las sales.

**Palabras clave:** *caracterización; jaboncillo; mejoradores de suelo; oxido-reducción; plantas halófitas; sales de halita y trona; sedimentos lacustres; sulfuro de hierro.*

# **ENVIRONMENTAL IMPACT OF LAKE SEDIMENTS DEPOSITED IN MINES IN TEXCOCO, STATE OF MEXICO: CONTAMINATION AND RESTORATION.**

Erika Irais Meléndez García, M.C.  
Colegio de Postgraduados, 2022.

## **ABSTRACT**

The lake material that makes up the former Lake Texcoco, known as "jaboncillo", is known for its hypersalinity, heavy metal content and low mechanical stability. With the construction of the New Mexico City International Airport in 2014, the soapstone was extracted from the area. Part of this material was transported and deposited in loose or dense fills in mine shafts in the communities of San Miguel Tlaixpan (mound or loose fills) and San Nicolás Tlaminca (conchoidal shape or dense fills) in Texcoco, State of Mexico, where, over time, it has been oxidising and drying out. The objective of this work was to know the landfills through a physical, chemical and mineralogical characterisation and determine their environmental impact and evaluate the effect of soil washing with organic and inorganic soil improvers on the landfills. The aim is to reduce salinity and allow the development of native halophyte plants such as rosemary (*Suaeda edulis*), saltgrass (*Distichlis spicata* (L.) green) and rockrose (*Kochia scoparia* (L.)); as well as salinity-tolerant crops (barley (*Hordeum vulgare*) and beetroot (*Beta vulgaris*)). The fills are hypersodic with pH >8.5, EC up to 117 dS m<sup>-1</sup>, and PSI >150, black colours mixed with grey attributed to Fe, Cu sulphides and oxidation processes and mineral formation, thus having a high environmental impact. The primary minerals are amorphous, albite, calcite, anorthite, halloysite, chalcopyrite and glauberite. When the humidity decreases, the secondary minerals are halite, trona, and ferrihydrite in smaller quantities of covellite, polyhalite, arsenopyrite, and calcosiderite. The application of irrigation and soil improvers decreased salinity and sodicity to classify the fills as non-saline and the development of established vegetation. Treatments E200 and Y200 showed highly significant differences ( $p > 0.05$ ) in improving the sodicity condition of the sediments. However, the application of manure, being low cost, can be helpful for sediment remediation since it improves physical properties, such as structure, increased porosity, permeability and, therefore, drainage, which favours the leaching of salts.

**Keywords:** *characterisation; soapstone; soil improvers; oxide reduction; halophyte plants; halite and trona salts; lake sediments; iron sulphid*

## **DEDICATORIA**

A Ali, mi hija, quien es y será siempre mi inspiración y motivación para ser mejor y seguir adelante.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por darme la oportunidad de cumplir una meta más y por poner en mi camino gente maravillosa de la que he aprendido cosas extraordinarias.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por la beca otorgada para la realización de mis estudios.

Al Colegio de Postgraduados, en especial Posgrado de Edafología, Campus Montecillo, por la formación académica y por la oportunidad de realizar con éxito este posgrado.

A la Dra. Carmen Gutiérrez, por la confianza, tiempo y dedicación en la elaboración de este trabajo, pero sobre todo por hacer que cumpliera mi meta de restaurar un área.

Al Dr. Carlos Ortíz, por su tiempo, apoyo y consejo para que lograra este proyecto. Le agradezco su pasión por la enseñanza.

Al M.C. Patricio Sánchez, por su amistad y apoyo infinito en cada etapa.

Al Dr. Carlos Ramírez, por la asesoría y consejo en la revisión de este escrito.

A Don Pedro, Paco y Moi, personal del laboratorio de Génesis, Morfología y Clasificación de Suelos, por su paciencia, ayuda y amistad.

A mi esposo, por su amor, tiempo, confianza y por el apoyo en cada momento que pasa desde que estamos juntos. Gracias por estar siempre.

A mi Ali, porque a pesar de ser una bebé, fuiste paciente y comprensiva en los ratos que no pude estar contigo.

A mis padres, por impulsarme a la superación personal y profesional, por estar siempre dando la mano para que pueda salir adelante.

A mis hermanos, por sus ánimos y buenos ratos compartiendo un poco de nosotros.

## CONTENIDO

RESUMEN .....	iii
ABSTRACT.....	iv
LISTA DE CUADROS.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	x
I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	2
2.1. Origen de la salinidad.....	2
2.2. Caracterización y clasificación de los suelos afectados por sales .....	5
2.2.1. Suelos salinos.....	9
2.2.2. Suelos salino-sódicos.....	10
2.2.3. Suelos sódicos .....	11
2.3. Métodos de mejoramiento de suelos afectados por sales.....	14
2.3.1. Métodos físicos .....	14
2.3.2. Métodos químicos .....	15
2.3.3. Métodos agrotécnicos.....	15
2.3.4. Métodos biológicos.....	16
2.4. Suelos del Lago de Texcoco.....	17
2.4.1. Condiciones de salinidad del Lago de Texcoco.....	21
2.4.2. Mejoradores de suelos salinos y salinos sódicos en el Lago de Texcoco .....	22
2.5. Sedimentos lacustres.....	23
III. OBJETIVOS.....	24
3.1. Objetivo general.....	24
3.2. Objetivos particulares.....	24
IV. HIPOTESIS .....	25
V. MATERIALES Y MÉTODOS .....	26
5.1. Área de estudio.....	26
5.2. Trabajo de campo .....	28
5.3. Trabajo de laboratorio .....	30

5.3.1. Análisis físicos y químicos.....	30
5.3.2. Análisis mineralógico .....	32
5.4. Fase experimental .....	32
5.5. Análisis estadístico .....	36
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	37
6.1. Caracterización de los sedimentos de Tlaminca.....	37
6.2. Caracterización de los sedimentos de Tlaixpan.....	43
6.3. Análisis mineralógico.....	47
6.3.1. Análisis mineralógico de los sedimentos de Tlaminca .....	47
6.3.2. Análisis mineralógico de los sedimentos de Tlaixpan .....	49
6.4. Fase experimental .....	59
6.4.1. Efecto de los mejoradores en el lixiviado colectado .....	59
6.4.2. Efecto de los mejoradores en el sedimento.....	65
6.4.3. Indicador biológico.....	72
VII. CONCLUSION GENERAL .....	79
VIII. RECOMENDACIONES.....	82
IX. LITERATURA CITADA .....	83
ANEXOS .....	92
ANEXO 1. ANÁLISIS QUÍMICOS .....	92
ANEXO 2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	103



## LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Clasificación de suelos del laboratorio de salinidad. ....	6
Cuadro 2. Clasificación de suelos de la NOM-021 .....	7
Cuadro 3. Clasificación de suelos salinos y salinos-sódicos. ....	8
Cuadro 4. Tratamientos aplicados.....	34
Cuadro 5. Clasificación de sedimentos según parámetros de salinidad. ....	41
Cuadro 6 . Resultados de laboratorio de los sedimentos de Tlaminca.....	42
Cuadro 7. Resultados de laboratorio de los sedimentos de Tlaixpan.....	45
Cuadro 8. Color del sedimento de Tlaixpan. ....	46
Cuadro 9. Mineralogía del jaboncillo depositado a los 8 meses en San Miguel Tlaixpan.....	52
Cuadro 10. Mineralogía del jaboncillo depositado al mes (1) en San Miguel Tlaixpan.....	53
Cuadro 11. Mineralogía del jaboncillo depositado al mes (2) en San Miguel Tlaixpan.....	54
Cuadro 12. Mineralogía del jaboncillo en seco muestreado en San Miguel Tlaixpan.....	56
Cuadro 13. Resultados de los parámetros analizados del lixiviado inicial y final del sedimento. ....	60
Cuadro 14. Valores de pH, CE y Na <sup>+</sup> soluble inicial del sedimento.....	66
Cuadro 15. Resultado de los mejoradores sobre el sedimento. ....	67
Cuadro 16. Indicadores biológicos .....	77
Cuadro 17. Parámetros de clasificación de salinidad de los sedimentos. ....	92
Cuadro 18. Cationes y aniones solubles para la caracterización de los sedimentos.....	94
Cuadro 19. Cationes intercambiables para la caracterización de los sedimentos.....	96
Cuadro 20. Datos del lixiviado colectado pertenecientes a cada una de las lecturas tomadas a los tratamientos del experimento.....	98
Cuadro 21. Resultados finales del sedimento.....	102

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Hidrólisis del sodio en el complejo de cambio. Fuente: Abrol <i>et al.</i> , 1988. ....	13
Figura 2. Vista panorámica del depósito de los sedimentos en las minas de (a) San Nicolás Tlaminca, Fuente: Reporte índigo y (b) San Miguel Tlaixpan, fuente: propia. En estas imágenes se puede apreciar como el relleno se distribuye en forma creciente o concoidal con la pendiente o bien en montículos. ....	20
Figura 3. Depósito de sedimentos lacustres en mina de arena de la localidad de San Nicolás Tlaminca, Texcoco, (a) forma de abanico, fuente: Google Earth, 2021, (b) mezcla del sedimento con tezontle, geotextiles y vegetación halófitas. ....	27
Figura 4. Sedimentos lacustres depositados en la mina de San Miguel Tlaixpan, Texcoco, a) vista aérea, fuente: Google Earth, 2021, b) y c) sedimentos en forma de montículo, fuente propia. ....	27
Figura 5. Perfiles en la zona de estudio que muestran el grado de oxidación de los sedimentos, fuente: propia. ....	28
Figura 6. Puntos de muestreo. ....	29
Figura 7. (a) Sedimento donde se aprecia el estado de oxidación (gris) y reducción (negro); (b) y (c) sedimentos oxidados. ....	29
Figura 8. Muestra de suelo con pasto salado. ....	29
Figura 9. Análisis de laboratorio. (a) Toma de color por la carta Munsell, (b) Potenciómetro para pH, (c) Conductímetro para CE, (d) Pastas de saturación en tren de vacío, (e) Método de acetato de amonio para CIC y cationes intercambiables, (f) Absorción atómica. ....	31
Figura 10. Costras de sal formadas en las muestras. ....	32
Figura 11. Mejoradores de suelo utilizados. (a) Material orgánico fresco; (b) Estiércol ovino; (c) Yeso agrícola. ....	33
Figura 12. Evidencia fotográfica del cambio de color por oxidación. ....	39

Figura 13. Difractograma de la parte “amarilla” de la primera costra salina. .....	48
Figura 14. Difractograma de la parte "blanca" de la primera costra salina. ....	49
Figura 15. Difractograma de la segunda costra salina. ....	49
Figura 16. Difractograma del jaboncillo de Tlaixpan. ....	50
Figura 17. Difractograma del jaboncillo de Tlaixpan. ....	50
Figura 18. Comportamiento de pH del lixiviado en los tratamientos de la parte baja.....	62
Figura 19. Comportamiento de pH del lixiviado en los tratamientos de la parte media.....	62
Figura 20. Comportamiento de pH del lixiviado en los tratamientos de la parte alta. ....	63
Figura 21. Comportamiento de la CE de lixiviado en los tratamientos de la parte baja.....	63
Figura 22. Comportamiento de la CE de lixiviado en los tratamientos de la parte media.....	64
Figura 23. Comportamiento de la CE de lixiviado en los tratamientos de la parte alta. ....	64
Figura 24. Comportamiento del Na <sup>+</sup> soluble en los lixiviados; la barra azul indica el contenido inicial y la barra naranja el contenido final. ....	65
Figura 25. Cantidad de Na <sup>+</sup> soluble inicial del sedimento de las partes alta, media y baja contra el valor del sedimento con vegetación (línea punteada).....	66
Figura 26. Lombrices en los tratamientos de estiércol con dosis de 200 t ha <sup>-1</sup> .....	70
Figura 27. Tratamientos con yeso.....	74
Figura 28. Tratamientos con estiércol.....	74
Figura 29. Tratamientos con material orgánico.....	75
Figura 30. Tratamientos con material orgánico y yeso. ....	75
Figura 31. Tratamientos testigo.....	76

## I. INTRODUCCIÓN

Desde hace años, se ha reportado que el lago de Texcoco tenía “aguas salobres” (Thomas, 1994) y, al localizarse en el eje Neovolcánico, las sales son de origen volcánico, cuya deposición en el fondo del lago se ve favorecida por el mal drenaje de la cuenca endorreica. El antiguo lago de Texcoco, en México, fue drenado artificialmente a principios del siglo XX, esto provocó el afloramiento de diferentes sedimentos lacustres ricos en sales y cenizas volcánicas (Oliver-Burwitz *et al.*, 2019). Dichos sedimentos reciben localmente el nombre de jaboncillo (por su sensación jabonosa) y tienen propiedades físicas, químicas e hidráulicas que los hacen únicos en el mundo, entre las que destacan su alto contenido de humedad e hipersalinidad (Gutiérrez-Castorena *et al.*, 2005).

En 2014, el proyecto de construcción del Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México consideró que la inestabilidad del material lacustre de la zona se podía resolver extrayéndolo del sitio y rellenando de materiales pétreos de las comunidades aledañas. Miles de toneladas de sedimentos lacustres hipersalinos, que presentaban fuerte reducción, fueron depositados en los socavones de minas de arena sin tratamiento previo.

La deposición de este sedimento ha traído como consecuencia afecciones en el paisaje, así como la imposibilidad de ocupar el espacio para construcción o reforestación debido al alto contenido de sales y al pobre drenaje de las minas. Desde entonces, los rellenos lacustres se han estado oxidando y secando por lo que se llevó a cabo una caracterización química y mineralógica, con el fin de evaluar los cambios principalmente de pH y conductividad eléctrica, y la formación de nuevos minerales durante el proceso de oxidación. Asimismo, se realizó un experimento a través de la aplicación de mejoradores orgánicos e inorgánicos con diferentes relaciones, haciendo mezclas con distintas concentraciones y aplicaciones de riego con el fin de disminuir el contenido de salinidad y sodicidad, para así rehabilitar el área dañada e incorporar al menos vegetación halófila como indicador biológico y, con el tiempo, formar suelo.

## II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Los suelos afectados por salinidad, son suelos con altas cantidades de sales solubles y/o iones de sodio (Omuto, 2021). El contenido excesivo de sales tiene una serie de efectos adversos sobre las propiedades fisicoquímicas del suelo, las actividades microbianas y bioquímicas del suelo y el crecimiento de las plantas (Yu *et al.*, 2011).

### 2.1. Origen de la salinidad

Hasanuzzaman *et al.* (2014) mencionan que la salinidad del suelo es el resultado de procesos naturales (erosión de material parental, la deposición de sal marina realizada por el viento y la lluvia, inundación de tierras costeras por las mareas, etc.) y actividades antrópicas (ascenso del nivel freático debido a un exceso de riego con agua subterránea o salina, drenaje deficiente, etc.). Estos procesos conducen en menor o mayor grado a una acumulación de sales, que afectan la fertilidad del suelo.

La salinidad en forma natural, también llamada salinidad primaria, está dada por factores como el material parental, que durante el intemperismo químico se liberan gradualmente los minerales del suelo y reaccionan con el agua y el aire para producir sales (Omuto, 2021; Yuan *et al.*, 2007); el clima, principalmente en las regiones áridas, semiáridas y estepas, donde las condiciones de evaporación son mayores que las precipitaciones (Ashraf *et al.*, 2008); y el agua subterránea salada, se eleva a través del perfil de suelo por capilaridad y aporta las sales que permanecen en el suelo cuando el agua se evapora (Rengasamy, 2006). Otras causas primarias de problemas de salinidad de suelos son la interacción del agua marina/salobre, los depósitos de sal arrastrada por el viento y escurrimiento de agua (Omuto, 2021). La influencia se puede intensificar hacia otras zonas en la medida en que se susciten: 1) cambios climáticos; 2) procesos geomorfológicos de sedimentación, erosión y redistribución de materiales; así como 3) cambios en la hidrología superficial y subterránea. Los efectos de la salinidad son diversos y la intensidad de éstos en que el suelo se ve afectado por

el aporte de cada fuente de sales dependerá de las condiciones del mismo, la efectividad del drenaje, la calidad del agua de riego, la sobreexplotación del manto y las prácticas de manejo agronómico que se presenten en cada región (García, 2002; Bui, 2013).

La salinización secundaria puede surgir cuando las sales se acumulan cerca de la superficie del suelo como consecuencia del aumento de los niveles de agua debido a las prácticas de manejo del suelo. La práctica más citada es la irrigación, cuando el agua de riego utilizada es agua salina o agua fertilizada (Silburn *et al.*, 2009; Rengasamy, 2006; Yuan *et al.*, 2007). También el uso de aguas residuales, que al contener elementos minerales pueden causar toxicidad específica de los iones y salinidad en el suelo (Abd-Elwahed, 2018). El cambio de uso de suelo también es un factor que puede generar salinidad en los suelos. En ciertos ecosistemas cambian las características de uso del agua por las plantas y la evapotranspiración, con consecuencias como la resequedad del suelo y la acumulación de sal; además, el cambio de los tipos de vegetación también puede alterar el equilibrio del manto freático y eventualmente contribuir a la afectación de suelos por salinidad inducidos por aguas subterráneas (Rengasamy, 2006).

Desde el punto de vista hidrológico, Otero *et al.* (2008) señalan que, la acumulación de sales ocurre en regiones de drenaje restringido, en donde el balance de las aguas freáticas es regulado por la evaporación y transpiración y no por el ingreso de aguas freáticas a la zona de acumulación.

Es importante mencionar que el agua de riego, independientemente de su origen (subterráneo o superficial) lleva una cantidad variable de sales disueltas y otros elementos como calcio, magnesio, sodio, bicarbonato, sulfato y cloruro. Los problemas principales que provocan estas sustancias en el agua de riego están en función de sus propiedades, origen del suelo y condiciones climáticas que favorecen o limitan el lavado. En suelos con textura arenosa se presentan menores peligros en comparación con los suelos arcillosos, en donde el agua lava mejor las sales acumuladas; los suelos yesíferos o con alto contenido de yeso

(sulfato cálcico) aguantan más la salinidad, en donde el yeso hace pasar a formas solubles el sodio y en climas con alta precipitación ayuda a lavar las sales, mientras que uno seco favorece su ascenso a la superficie por capilaridad, creando la típica costra salina e impermeabilidad del suelo (Qadir *et al.*, 2007).

El suelo salino-alcalino resulta de aumentos continuos en el contenido de sal y metales alcalinos en el suelo o los componentes del suelo. Este proceso puede hacer que el suelo no salinizado se transforme en suelo salinizado en condiciones naturales o artificiales (Wang *et al.* 2017).

La salinidad de los suelos es un grave problema agronómico y ambiental, especialmente en regiones áridas y semiáridas (Oliver-Burwitz *et al.*, 2019), donde la evaporación extrema por las altas temperaturas incrementa el ascenso de la solución del suelo (capilaridad) y con ello la deposición y concentración de sales (cloruros, sulfatos, sodio (Na<sup>+</sup>), magnesio (Mg<sup>2+</sup>) y calcio (Ca<sup>2+</sup>)) en la capa superior del suelo o en los horizontes superficiales (Manchanda y Garg, 2008; Cominelli *et al.*, 2013). La escasez y variabilidad de las precipitaciones no son suficientes para lavar el exceso de sales; por ejemplo, en esas zonas áridas se incrementa la salinidad por las altas tasas de evaporación y transpiración (Ashraf *et al.*, 2008).

Los suelos afectados por salinidad tienen un importante impacto sobre el medio, el agua y la agricultura. Influyen negativamente sobre la productividad agrícola y la calidad del suelo y el agua superficial pero también tienen un potencial económico significativo si son manejados correctamente (Wicke *et al.*, 2011).

En México, el proceso de salinización afecta al 3.2% de su territorio, principalmente en los estados de Sonora, Sinaloa, Tamaulipas, San Luis Potosí, Chiapas, Nuevo León, Oaxaca, Veracruz y Zacatecas (SEMARNAT, 2009). La salinización natural en nuestro país, es un fenómeno asociado a condiciones climáticas de aridez y a la presencia de materiales originales ricos en sales. En las regiones áridas, las sales pueden ascender por capilaridad y por erosión eólica que arrastra gran cantidad de partículas en suspensión tales como

carbonatos, sulfatos y cloruros aplicándose en los suelos (Mata-Fernández *et al.*, 2014).

La salinidad también puede ser de origen no natural. Las actividades antropogénicas son la causa principal de la salinidad en nuestro país, y se deben principalmente a la actividad agrícola y pecuaria, donde existe un manejo inadecuado del suelo y agua. En los estados del norte y el sur de México, la distribución y extensión de los suelos con problemas de salinidad es más frecuente en las áreas de riego de las zonas áridas, donde el agua es rica en sales y se agrava debido al manejo no adecuado del suelo incluyendo del escaso drenaje. La salinización trae como consecuencia un deterioro progresivo de los suelos, repercutiendo en una disminución de la productividad y en la calidad de sus cosechas. Por otra parte, el uso de fertilizantes nitrogenados y plaguicidas en los cultivos intensivos provoca la contaminación de los mantos acuíferos; además el manejo inadecuado del agua, como el aumento de descargas de aguas residuales, la sobreexplotación de mantos acuíferos y los cambios hidrológicos provocados por la deforestación aumentan la salinidad de los suelos (Bayuelo-Jiménez *et al.* 2002; Zamudio-González *et al.*, 2004; Barkla *et al.*, 2008; Sandoval y Ochoa, 2010; Silva *et al.*, 2013; Manzano *et al.*, 2014; Mata-Fernández *et al.*, 2014; Reyes *et al.*, 2014).

## **2.2. Caracterización y clasificación de los suelos afectados por sales**

Todos los suelos con presencia de sales son un problema cuando esta se concentra en la zona radical de los cultivos. Esto provoca valores muy altos de la presión osmótica en el agua del suelo, con evidentes repercusiones sobre el desarrollo de las plantas (Sánchez *et al.* 2008).

Los indicadores químicos de salinidad utilizados para la caracterización y el diagnóstico de la afectación por la salinidad son la conductividad eléctrica (CE), el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y el pH (Otero *et al.*, 2008).



El criterio común para el diagnóstico de la salinidad del suelo es la determinación de la conductividad eléctrica medida en el extracto de saturación (CE). La CE se basa en el principio de que la cantidad de corriente eléctrica transmitida por una solución salina bajo condiciones estándar, es directamente proporcional a la concentración de sales de la solución (García, 2002). La CE de un suelo cambia con el contenido en humedad, disminuye en capacidad máxima (se diluye la solución) y aumenta en el punto de marchitamiento (se concentran las sales) (Lastiri, 2018). Con base a la CE, el United States Salinity Laboratory de Riverside establece los siguientes grados de salinidad:

Cuadro 1. Clasificación de suelos del laboratorio de salinidad.

<b>Categoría del suelo</b>	<b>CE</b>
	dS m <sup>-1</sup>
Suelos normales	0 – 2
Suelos ligeramente salinos	2 – 4
Suelos salinos	4 – 8
Suelos fuertemente salinos	8 – 16
Suelos extremadamente salinos	>16

Sin embargo, en México también existen criterios para evaluar la salinidad de un suelo de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000.

Para diferenciar entre suelos salinos y sódicos se utiliza un porcentaje de sodio intercambiable (PSI) igual o mayor a 15%. Este parámetro se refiere a la proporción de sodio adsorbido en el complejo de intercambio en relación con el total de los cationes intercambiables (Bohn *et al.*, 1993).

Cuadro 2. Clasificación de suelos de la NOM-021

<b>Categoría del suelo</b>	<b>CE</b>
	dS m <sup>-1</sup>
No salino	0.0 – 2.0
Poco salino	2.1 – 4.0
Moderadamente salino	4.1 – 8.0
Muy salino	8.1 – 16.0
Extremadamente salino	> 16.0

El PSI se calcula con base en la siguiente ecuación:

$$PSI = \frac{Na^+ \text{ intercambiable}}{\sum \text{Cationes intercambiables}} * 100$$

La relación de adsorción de sodio (RAS) es un indicador de que el sodio incrementa en concentración en la solución del suelo, por lo tanto, la proporción de sodio adsorbido sobre los coloides también se incrementa. Este parámetro se determina en el extracto de pasta de saturación del suelo o en el agua y consiste en determinar la concentración de Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup> (Richards, 1980). Con tales determinaciones se puede estimar la RAS a través de la siguiente expresión:

$$RAS = \frac{[Na^+]}{[(Ca^{2+} + Mg^{2+})/2]^{0.5}}$$

Donde Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup> son las concentraciones en miliequivalentes por litro (meq L<sup>-1</sup>) en el agua de riego.

La RAS tiene alta correlación con el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) del complejo adsorbente, por lo que puede expresar el peligro de sodificación de los suelos (Bohn *et al.*, 1993). Se deben considerar valores de la RAS entre 10 y 20

como potencialmente peligrosos y se deben examinar cuidadosamente para proponer condiciones de manejo adecuadas de los suelos (García, 2002).

Estos parámetros permiten clasificar a los suelos afectados por salinidad en 3 grupos como se muestra en el Cuadro 3:

Cuadro 3. Clasificación de suelos salinos y salinos-sódicos.

<b>Clasificación</b>	<b>pH</b>	<b>CE</b>	<b>PSI</b>	<b>Proceso</b>
Salinos	< 8.5	> 4	< 15	Salinización
Sódicos	> 8.5	< 4	> 15	Sodificación
Salinos - Sódicos	< 8.5	> 4	> 15	Salinización – Sodificación

Fuente: Otero *et al.*, 2008.

De acuerdo con los grupos de suelos de referencia (GSR) de la WRB, la acumulación de sal es un fenómeno que no es exclusivo de ningún suelo en particular; sin embargo, son "los suelos influenciados por el agua" en especial Solonetz y Solonchak, en los cuales la evaporación es superior a la precipitación pluvial (hay un déficit estacional de agua) y la lixiviación es insuficiente para mover las sales fuera del perfil del suelo (Schofield y Kirkby, 2003).

La WRB (2014) clasifica la alta concentración de sales en dos grupos de referencia principales. Los *Solonchak* se distinguen por tener una alta concentración de sales solubles en algún momento del año; y se encuentran en las zonas áridas, semiáridas y regiones costeras. Al tratarse de sales solubles, el manejo adecuado para estos suelos es la aplicación de agua de riego de buena calidad para lavar el exceso de sales de la zona radicular y con ello asegurar el crecimiento adecuado de las plantas. Los *Solonetz* son suelos con un horizonte subsuperficial arcilloso, con alta proporción de Na<sup>+</sup> adsorbido. Estos suelos contienen sodio libre (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) y un pH fuertemente alcalino (> 8.5). El mejoramiento de los Solonetz depende de mejorar la porosidad del suelo superficial o subsuperficial y de la disminución del PSI, logrado a través de la

incorporación de yeso o cloruro de calcio. Otros suelos con presencia de sales son los Gypsisols y Calcisols, que presentan acumulación de yeso y carbonatos secundarios respectivamente.

La salinidad además es considerada en los horizontes de diagnóstico como el sálico que contiene altas cantidades de sales solubles con una  $CE \geq 15 \text{ dS m}^{-1}$ ; el nátrico con un alto contenido de Na intercambiable ( $PSI \geq 15$ ); el cálcico y petrocálcico con carbonato de calcio; el gypsico y petrogypsico con yeso. También los calificadores y subcalificadores consideran en el término “salic”.

La Soil Taxonomy (Sol Survey Staff, 2014), considera la salinidad en la clasificación de horizontes de diagnóstico subsuperficiales, subgrupos y grandes grupos. Entre los horizontes de diagnóstico el más común es el horizonte sálico con importante acumulación de sales más solubles que el yeso en agua fría, y debe cumplir con un valor de CE igual o mayor de  $30 \text{ dS m}^{-1}$  en el extracto de agua de la pasta de saturación y generalmente se presenta en el orden de los Aridisols. El horizonte nátrico muestra evidencias de iluviación de arcilla debido a las propiedades dispersantes del sodio, además de un PSI de 15% o más o una RAS de 13 o más. Horizontes como el cálcico y petrocálcico consideran la acumulación significativa de  $\text{CaCO}_3$  secundario u otros carbonatos; y el gypsico y petrogypsico toman en cuenta la acumulación o transformación del yeso. Los parámetros de PSI (15% o más) y RAS (de 13 o más) se consideran en los grandes grupos y subgrupos de los Alfisols, Aridisols, Entisols, Inceptisols, Mollisols y Vertisols.

### **2.2.1. Suelos salinos**

Son suelos que poseen en el extracto de pasta de saturación una CE mayor a  $4 \text{ dS m}^{-1}$ , el PSI es menor a 15% y por lo general el pH es inferior a 8.5, presentan buena permeabilidad y pueden desarrollar costras blancas en la superficie (Richards, 1954). Se consideran sales solubles a aquellas cuya solubilidad es mayor que la del yeso, equivalente a  $2.41 \text{ g L}^{-1}$  (Laboratorio de Salinidad, 1974).

Los suelos salinos se desarrollan cuando los minerales disueltos en el agua se acumulan y cambian su estado a medida que el agua se desplaza en el suelo. Las sales solubles son depositadas en el suelo cuando el agua se evapora y gradualmente se acumula con el paso del tiempo para formar los suelos salinos. También se desarrollan cuando se acumulan las sales debido a un contacto directo constante del suelo con agua salina (Omuto, 2021).

En un suelo salino, cuando la concentración de sales solubles en las raíces es muy alta, principalmente cloruros y sulfatos (en casos extremos nitratos) de sodio (Na), calcio (Ca) y magnesio (Mg), impiden el crecimiento y producción óptimos de las plantas ya que el contenido de sales solubles controla la presión osmótica de la solución suelo (García, 2002; Mata-Fernández *et al.*, 2014).

El catión sodio raramente constituye más de la mitad de la composición de cationes en solución; por tanto, no es adsorbido al complejo arcillo húmico significativamente. Las cantidades de calcio y magnesio, tanto en solución como en el complejo, varían de manera considerable y el potasio soluble o intercambiable generalmente se encuentra en menor cantidad, aunque ocasionalmente puede ser el catión que se encuentre en mayoría. Pequeñas cantidades de bicarbonato pueden existir, pero los carbonatos solubles siempre estarán ausentes. Debido al exceso de sales neutras solubles y a la no significativa cantidad de sodio en el complejo de cambio, los suelos salinos siempre están floculados y, en consecuencia, tienen una permeabilidad igual o mayor a la de los suelos no salinos. Muchos de los suelos salinos pueden contener apreciables cantidades de yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) en el perfil (Abrol *et al.*, 1988).

### **2.2.2. Suelos salino-sódicos**

Los suelos afectados por salinidad con un alto contenido de iones solubles y una apreciable cantidad de iones de sodio son conocidos como suelos salinos-sódicos (Omuto, 2021).

Son suelos cuya conductividad del extracto de saturación es  $> 4 \text{ dS m}^{-1}$ , el PSI es  $> 15\%$  y un pH variable alrededor de 8.5 o menos debido a la presencia de sales solubles neutras, además de buena permeabilidad. En función del proceso dominante (salinización o sodificación), los cationes presentes pueden variar; en el primer caso, los cationes dominantes son  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , y los aniones son cloruros y sulfatos; mientras que, en el segundo caso, el catión dominante es el  $\text{Na}^+$  y los aniones son carbonatos y bicarbonatos. El grado de floculación de estos suelos está determinado por el proceso dominante, si el proceso dominante es la salinización entonces las partículas se encuentran agregadas de lo contrario las partículas del suelo se dispersan (Richards, 1954; 1980).

Las altas cantidades de sodio intercambiable y los valores altos de pH disminuyen la permeabilidad de agua al suelo, lo que disminuye su capacidad de retención de agua y, en última instancia, conduce a una disminución en los rendimientos de los cultivos. La lesión de la sal y la privación de nutrientes esenciales para las plantas son las dos causas principales de la baja producción de cultivos en condiciones de suelo salino-sódico (Gao *et al.*, 2008).

### **2.2.3. Suelos sódicos**

Los suelos sódicos se desarrollan cuando las sales solubles son lixiviadas y/o cuando los cationes divalentes son precipitados fuera del complejo de intercambio seguido por el correspondiente aumento en los iones de sodio. Si la lixiviación es insuficiente, los suelos afectados por salinidad continúan siendo predominantemente salinos (Omuto, 2021).

Contienen más de 15% de sodio intercambiable, las sales neutras solubles no son abundantes, pero sí contienen importantes cantidades de sales como el carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). La conductividad eléctrica del extracto de pasta de saturación es menor a  $4 \text{ dS m}^{-1}$ , pero el pH es mayor a 8.5. El exceso de sodio deteriora las propiedades físicas y nutricionales, afectando la capacidad de conducir agua y gases, lo que al final se traduce en una total o drástica reducción del crecimiento de las plantas. La aparición de grietas es común cuando estos

suelos se encuentran secos o deshidratados (Richards, 1954; Abrol *et al.*, 1988; García, 2002). El alto contenido de iones de sodio en estos suelos causa la dispersión de arcilla y materia orgánica que se asientan en las superficies de las partículas de suelo para darles un aspecto negro parduzco (Omuto, 2021).

El aumento de la proporción de sodio intercambiable, sin que exista una concentración significativa de sales disueltas en la fase líquida, implica que durante la edafogénesis hay una solución exterior rica en sodio y continuamente renovada. Esto induce a un aumento progresivo del porcentaje de sodio en los sitios de intercambio; posteriormente, tiene lugar una pérdida progresiva de iones de la fase líquida por lavado. Paralelamente, se presenta un proceso de iluviación de arcillas sódicas, que resultan fácilmente traslocables por el efecto dispersante del sodio, incluso en presencia de carbonato de calcio o de yeso y se forma un horizonte nátrico. Los suelos sódicos a veces se forman a partir de materiales no consolidados, sedimentos de textura fina, a veces depósitos marinos o materiales aluviales salinos drenados o secados de forma natural. Es común que se les asocien con llanuras o terrenos suavemente ondulados, en climas con veranos cálidos y secos, en regiones semiáridas, templadas o subtropicales (Porta *et al.*, 2011).

La hidrólisis del sodio intercambiable en suelos sódicos se describe en la Figura 1. En dicha reacción, el hidrógeno ( $H^+$ ) es capaz de desplazar al sodio del complejo arcillo-húmico y este a su vez es incapaz de inactivar los iones hidroxilo ( $OH^-$ ) que se liberan tras la reacción; por tanto, se produce un incremento fuerte en el pH. La medida en que los cationes del complejo de cambio son hidrolizados dependerá de sus habilidades para competir con los iones hidrógeno por los sitios de intercambio. El sodio y el potasio no son buenos competidores frente al hidrógeno como sí lo son el calcio y el magnesio, y es por esta razón que el sodio y el potasio son hidrolizados en mucho mayor medida. Los suelos con apreciables cantidades de carbonato de sodio ( $Na_2CO_3$ ) presentan valores de pH por encima de 8.2. La sal de carbonato de sodio a diferencia del carbonato de calcio y magnesio que también se encuentran presentes a dichos pH, posee una gran

solubilidad y, por tanto, incrementa el potencial de hidrólisis del sodio (Abrol *et al.*, 1988).

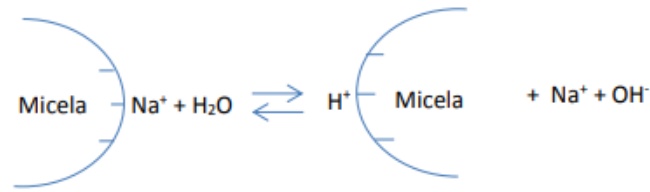


Figura 1. Hidrólisis del sodio en el complejo de cambio. Fuente: Abrol *et al.*, 1988.

Con frecuencia, los suelos sódicos son el resultado de la irrigación con aguas que contienen altos niveles de sodio y con alta proporción de carbonato ácido. La velocidad con que se presenten los problemas depende del RAS del agua, de la precipitación de yeso en esas aguas y de la disolución de minerales en el suelo. No todos los suelos sódicos tienen niveles altos de pH, aunque los valores comunes se encuentren entre 8.5 y 10. Cuando los iones sodio en la solución del suelo se presentan como sales neutras (es decir como cloruros o sulfatos), el pH es cercano a la neutralidad. Las reacciones fuertemente alcalinas de los suelos sódicos se deben a que el anión acompañante es el carbonato ácido o el carbonato, resultando en un pH entre 8.5 y 11 (Porta, 2003).

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



### **2.3. Métodos de mejoramiento de suelos afectados por sales**

En suelos salinos es importante considerar el uso de prácticas económicas que eliminen el problema y permitan recuperar el suelo. Antes de iniciar la recuperación es indispensable caracterizar completamente el problema para entender las causas de la acumulación sales y luego evaluar la calidad del agua para riego para predecir el efecto de su uso como causa de salinidad (García, 2002).

El procedimiento de recuperación es específico para cada suelo y depende de factores tales como su textura y estructura, la naturaleza de la salinidad y/o sodicidad, geología, topografía, agua, rotación de cultivos y limitaciones debidas al tiempo (Jaramillo, 2002).

Las principales prácticas de mejoramiento y manejo de los suelos salinos y salinizados se agrupan en métodos de mejoramiento físicos, químicos, biológicos y agrotécnicos. No obstante, cualquier división de los métodos de mejoramiento de los suelos salinizados, resulta artificial, pues ningún método por separado es capaz de darle solución al problema, sino que, es en la combinación de estos, donde se deben esperar los mejores resultados (González *et al.*, 2002).

#### **2.3.1. Métodos físicos**

Uno de los métodos más utilizados para la recuperación de suelos salinos es el lavado o lixiviación de las sales solubles con agua de baja salinidad. Antes de proceder al lavado del suelo, es necesario conocer la composición y concentración de las sales. Este método consiste básicamente en aplicar una lámina grande de agua para disolver las sales y removerlas de la zona radical del cultivo. Para lavar un suelo salino es indispensable que sea permeable y que exista una salida para el agua de drenaje. Los periodos de lavado deben ser frecuentes. Los suelos salinos solo requieren lavado sin aplicación de mejoradores químicos; sin embargo, los suelos sódicos necesitan agua que

contenga fuertes cantidades de calcio o, dado el caso, se puede aplicar un mejorador químico (Serrato *et al.*, 2002; Mata-Fernández *et al.*, 2014)

### **2.3.2. Métodos químicos**

Se utilizan fundamentalmente para sustituir el  $\text{Na}^+$  y el  $\text{Mg}^{2+}$ , contenido en el complejo de cambio, por el  $\text{Ca}^{2+}$  y el lavado del exceso de  $\text{Na}^+$  en la solución del suelo. Para ello es indispensable un drenaje adecuado. Sobre este aspecto se han informado efectos positivos con el uso de compuestos como la aplicación de azufre, ya sea en forma elemental o como sulfatos ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), para disminuir el pH del suelo. También se recomienda el yeso agrícola o sulfato de calcio dihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), para mejorar la estructura y el drenaje del suelo; cálcicos y de hierro, así como el uso de residuales que contienen ácido sulfúrico y otros elementos. No obstante, el  $\text{Ca}^{2+}$  necesario puede provenir de fuentes como el sulfato y el cloruro de calcio. Sin embargo, estos métodos aplicados en amplias extensiones resultan costosos, tanto por las cantidades de material usado, como por la aplicación de los mismos, en donde es necesario un equipo especializado. (García, 2002; González *et al.*, 2002; Mata-Fernández *et al.*, 2104).

### **2.3.3. Métodos agrotécnicos**

González, *et al.* (2002) mencionan que estos métodos están dirigidos fundamentalmente a mejorar las propiedades físicas y la fertilidad de los suelos afectados por sales. Se destacan, el uso de sustancias orgánicas de diferentes fuentes que favorecen la formación de humus en el suelo mejorando su estructura, al mismo tiempo contiene gran cantidad de elementos nutritivos y microorganismos benéficos para la planta.

Además, es necesaria la existencia de prácticas de manejo de los suelos las cuales contribuyen a minimizar o corregir la acumulación de sales tales como la nivelación, subsoleo, labranza mínima y manejo del agua (García, 2002).

### **2.3.4. Métodos biológicos**

El uso de plantas tolerantes o extractoras de sales, principalmente de interés forrajero, es el método biológico más usado. Además de reducir la salinidad, se pueden aprovechar como cultivos de amplia cobertura en grandes extensiones de suelo para disminuir la erosión y la confección de forraje para el ganado (Ruiz *et al.*, 2012).

#### *Biorremediación*

La biorremediación es un proceso en el que los organismos vivos, normalmente plantas, microorganismos o sus enzimas, se utilizan tecnológicamente para eliminar o reducir (remedio) contaminantes en el medio ambiente (Gaylarde *et al.*, 2005). Los organismos adecuados para la biorremediación pueden ser bacterias, hongos o plantas, los cuales tienen capacidades fisiológicas para degradar y/o desintoxicar los suelos y las aguas contaminadas (Ortiz-Hernández *et al.*, 2014).

La fitorremediación es una de las principales técnicas de biorremediación, para mejorar la condición de los suelos contaminados y se refiere a la utilización de plantas, incluyendo árboles y pastos. Esta metodología se usa para detoxificar, transformar y degradar contaminantes orgánicos, así como para remover contaminantes inorgánicos de suelos, sedimentos, y aguas subterráneas y superficiales (Gerhardt *et al.*, 2009; Qadir *et al.*, 2006; Pilon-Smits, 2005). El objetivo final de la fitorremediación en un suelo contaminado no debe ser sólo eliminar o reducir el contaminante sino, sobre todo, recuperar la calidad de este (Ashraf *et al.*, 2010).

Cuando se desea fitorremediar suelos salinos, la selección de las especies de plantas dependen de la capacidad de éstas para resistir altos niveles de salinidad de los suelos y de su potencial económico agropecuario (medicamentos, aceite comestible, forrajes, biocombustibles) (Nasim *et al.*, 2006).

#### *Técnicas de fitorremediación*

Se pueden clasificar en varios tipos, de acuerdo con el destino de los contaminantes y el medio de superficie (Zouboulis y Moussas, 2011; Carpena y Bernal, 2007). A continuación, se hace una breve descripción de la técnica fitorremediación de interés.

#### *Fitodesalinización*

Esta práctica se refiere a la utilización de plantas halófilas para la eliminación de las sales en los suelos afectados, con el fin de permitirles un crecimiento adecuado (Sakai *et al.*, 2012.). La selección de las especies de plantas se basa generalmente en su capacidad para resistir niveles altos de salinidad de los suelos (Nasim *et al.*, 2007). Sin embargo, existen considerables variaciones entre los cultivos para tolerar la salinidad. Esta capacidad inter e intraespecífica sugiere que se deben realizar ensayos de campo para identificar cultivos locales que se adapten a las condiciones salinas de los suelos (Qadir *et al.*, 2006).

#### **2.4. Suelos del Lago de Texcoco**

Desde la época colonial (año 1520), algunos historiadores reportaron que el lago de Texcoco formaba parte de un gran complejo de lagos y lagunas de Tenochtitlan, principalmente de “aguas salobres” (Thomas, 1994). Al localizarse Texcoco en el eje neovolcánico, lo más lógico es que se trate de sales de origen volcánico, cuya deposición se verían favorecidas por el mal drenaje de la cuenca endorreica (Oliver-Burwitz *et al.*, 2019).

El lago Texcoco cubría 50% de los lagos originales alrededor de la ciudad azteca de Tenochtitlan (actual Ciudad de México). Los lagos fueron drenados artificialmente desde el siglo XVII, provocando el afloramiento de diferentes sedimentos ricos en NaCl y cenizas volcánicas. Las alteraciones ambientales resultado de la desecación causaron un deterioro ecológico. En la actualidad, es una gran área de lecho lacustre expuesto a la desertificación, en donde la tasa de evaporación potencial es mayor que la precipitación pluvial (1 800 mm y 570 mm anuales, respectivamente). Los vientos dominantes provocan la formación

de tormentas de polvo o torbellinos teniendo como consecuencia contaminación eólica en las zonas aledañas. Al no existir salidas de agua a otros valles ni mezclas con aguas más dulces, las sales se acumulan (se evaporan y depositan constantemente), favoreciéndose procesos relacionados con el movimiento, redistribución y acumulación de cloruros, sulfatos, carbonatos y bicarbonatos y, por ende, degradación de suelos por salinidad (Camargo-Hernández, 2010; Dendooven *et al.*, 2010; Oliver-Burwitz *et al.*, 2019).

En 1947, se estableció la Comisión del Lago Texcoco con el propósito de reforestar estos sedimentos. Dicha comisión comenzó un programa de rehabilitación e introdujo plantas halófilas nativas de la zona donde destaca *Distichlis spicata* (L.) Greene, una hierba con alta tolerancia a la sal y al Na, y tamarix (*Tamarix spp.*). Estas especies se han introducido desde la década de 1970 para controlar la erosión. Además, se pueden encontrar *Suaeda nigra* (romerito), Cruciferae (*Eruca sativa*, *Brassica campestris*), compositae, graminiae (*D. spicata*, *Eragrostis obtusiflora* (zacahuistle)); *Tamarix*, *Bouteloua*, *Muhlenbergia*, *Hordeum* y *Cynodon* (Luna-Guido *et al.*, 2000). Estas plantas han estado modificando los sedimentos lacustres formando suelos en la periferia del ex lago y disminuyendo drásticamente la salinidad, como los Mollisols usando la Taxonomía de Suelos (Gutiérrez, 1997).

Los suelos que se formaron después del afloramiento de los sedimentos lacustres Texcoco son de origen aluvial-lacustre producto de la alteración de rocas ígneas (Gutiérrez, 1997). Además, presentan horizontes enriquecidos con carbonato de calcio compuestos por diferentes rasgos calcíticos, sin embargo, es en las tierras blancas localizadas en las laderas y en los montículos presentes en el ex lago de Texcoco, donde la acumulación del carbonato es más intensa a grado tal que origina la formación de los horizontes cálcicos y petrocálcicos, no obstante, los procesos involucrados en su formación no están claramente identificados (Gutiérrez *et al.*, 1998).

Para 1977, Detenal clasifica los suelos del ex lago como Solonchak gléyico y cuatro años después, de acuerdo con el sistema de clasificación norteamericano (Soil Taxonomy), se delimitaron ordenes como Inceptisol, Entisol y Mollisol, pues tienen un horizonte mólico bien expresado (Velázquez, 1981; Gutiérrez, 1997).

Este lago de Texcoco se ubica en la parte inferior de una cuenca cerrada, donde las aguas fluviales se acumulan durante la temporada de lluvias e incluso inundan las zonas urbanas adyacentes. Durante el invierno, se forman gruesas costras de sal, que los agricultores recolectan para consumo humano desde la época prehispánica (Portilla and Aguilera, 1986).

En 2014, el entonces presidente de México, Enrique Peña Nieto, inició la construcción del Nuevo Aeropuerto de la Ciudad de México (NAICM), a pesar de los numerosos conflictos sociales y ambientales generados por la obra (Ortiz y Gutiérrez, 2018). En este proyecto no se consideró al suelo para su construcción aun cuando se tiene suficiente información científica de la baja estabilidad de los materiales. Los ingenieros civiles recomendaron extraer todo el material lacustre y rellenarlos con materiales pétreos abundantes en la zona. De esa manera, comenzaron la extracción de piedra pómez y tezontle y, en los socavones que dejaron, depositaron los materiales lacustres. De acuerdo con José Espino Espinoza, más de 4 millones de metros cúbicos de lodos fueron extraídos de la zona donde se construía el Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (NAICM) y se depositaron en los socavones de las minas antes mencionadas (Salinas, 2018).

En el municipio de Texcoco, estado de México, existen actualmente cuatro poblados (San Miguel Tlaixpan, San Nicolás Tlaminca, Tequexquinahuac y San Dieguito Xochimaca) donde se depositaron estos sedimentos lacustres. Algunos rellenos se presentan en montículos y en otros sitios se formaron rellenos crecientes, por el alto contenido de humedad que hizo que el material se desplazara y formara rasgos arqueados con la pendiente (Figura 2).

En el año 2017, en las comunidades de San Nicolás Tlaminca y San Miguel Tlaixpan, la empresa URBANUM, junto con los Comisariados Ejidales, impulsaron tiraderos de material de construcción (escombros) y lodos provenientes de la construcción del NAICM. Estas compañías incumplieron las normas federales, estatales y municipales que hablan de la protección ambiental ya que estos tiraderos se localizan entre dos Áreas Naturales Protegidas como el Molino de Flores y la Zona Arqueológica del Tezcotzinco. Este último fue un palacio de Nezahualcōyotl que por su importancia histórica y cultural representa un patrimonio muy significativo para los Texcocanos y para todo México. Lugares de visita permanentes del turismo local, regional e internacional se verán dañados por un entorno sucio y contaminado por desechos (Portal Seminario, 2017).

A inicios del sexenio de Andrés Manuel López Obrador, en enero de 2019, el gobierno federal anunció la cancelación oficial del proyecto de Nuevo Aeropuerto de la Ciudad de México (NAICM) en el lago de Texcoco.

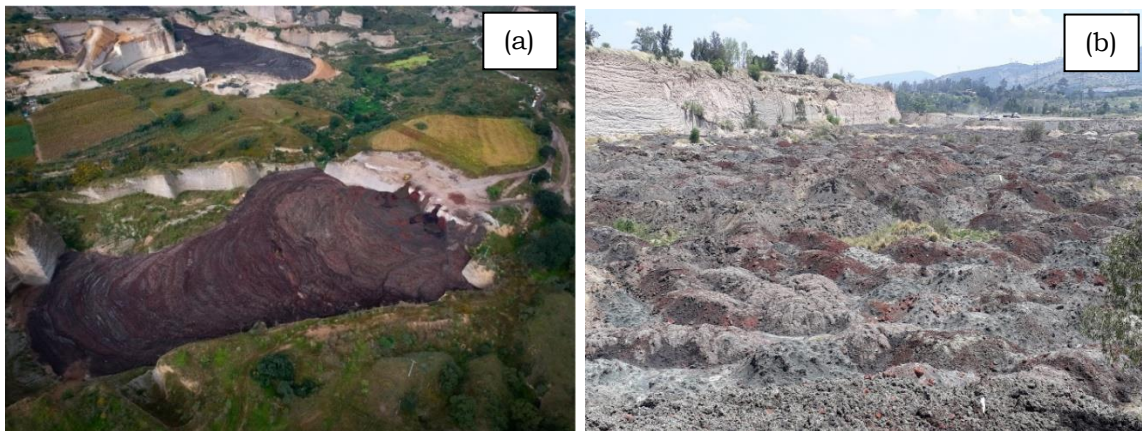


Figura 2. Vista panorámica del depósito de los sedimentos en las minas de (a) San Nicolás Tlaminca, Fuente: Reporte índigo y (b) San Miguel Tlaixpan, fuente: propia. En estas imágenes se puede apreciar como el relleno se distribuye en forma creciente o concoidal con la pendiente o bien en montículos.

Sin embargo, la cancelación del NAICM no resuelve el problema de las graves afectaciones provocadas por los inicios de su construcción y de las numerosas

obras asociadas sobre toda la Región Oriente del Valle de México. La deposición de este sedimento ha traído como consecuencia afecciones en el paisaje, así como la imposibilidad de ocupar el espacio para construcción o reforestación debido al alto contenido de sales y porque la deposición se hace sin medidas de contención o almacenamiento especial.

#### **2.4.1. Condiciones de salinidad del Lago de Texcoco**

La salinidad y sodicidad son condiciones de algunos suelos que limitan la producción agrícola y provocan que se vuelvan infértiles e improductivos (Manzano *et al.*, 2014). El suelo originado en el Lago de Texcoco (México) es un ecosistema terrestre extremo-haloalcalino único, formado por sedimentos amorfos silíceos lacustres y ceniza volcánica y fluvial (Dendooven *et al.*, 2010; JRC, 2019).

Hoy en día, la zona del ex Lago de Texcoco está expuesta a la desertificación. El suelo está cubierto por una cantidad limitada de vegetación halófila y de costras de sal que dejan gran parte del lecho del lago expuesto a la erosión eólica. Los vientos del este causan grandes problemas de contaminación por polvo en la Ciudad de México que se ven agravados por patógenos transportados con las partículas (Dendooven *et al.*, 2010; Oliver-Burwitz *et al.*, 2019).

La región del ex lago de Texcoco se caracteriza por presentar altos contenidos de salinidad por lo que desde hace algunos años se han realizado diferentes estudios en esta zona con el fin de recuperar los suelos para la agricultura e incrementar la productividad. Coras-Merino *et al.* (2014) mencionan que, estas investigaciones son dirigidas a diferentes temáticas, principalmente para evaluar los cambios en las propiedades físicas y químicas de los suelos en combinación con láminas de lavado y soluciones ácidas además del uso de vegetación tolerante a salinidad.

Los suelos del ex lago de Texcoco presentan factores que limitan el crecimiento de las plantas. De acuerdo con Tarín y Velázquez (1986), dichos factores son:



- Contenidos excesivos de sales solubles (CE de 75 a 200 dS m<sup>-1</sup>)
- Contenido extremoso de sodio intercambiable (PSI de 30% a 95%)
- Nivel freático salino a poca profundidad
- Condiciones difíciles de drenaje superficial interno
- Ausencia de estructura en el suelo
- Elevada alcalinidad (pH de 9.5 a 11)
- Presencia en el perfil del suelo de un material muy hidratado que se conoce localmente como jaboncillo

#### **2.4.2. Mejoradores de suelos salinos y salinos sódicos en el Lago de Texcoco**

Existen métodos físicos, químicos y biológicos para recuperar los suelos afectados por sales, entre los que destacan la adición de abonos orgánicos para mejorar la estructura y permeabilidad del suelo, el uso de enmiendas químicas basadas en el empleo de sales cálcicas de alta solubilidad que intercambian el sodio por calcio y la aplicación de ácidos o sustancias formadoras de éstos (Tejada *et al.*, 2006; Aceves, 2011).

Manzano *et al.* (2014) hacen mención de diversos estudios que comprueban la efectividad de algunos tratamientos al reducir el contenido de sales en el suelo; por ejemplo, Serrato-Sánchez *et al.* (2002), ensayaron el lavado del suelo y la aplicación de estiércol para recuperar suelos salinos en la Comarca Lagunera. Montaña *et al.* (1985) analizaron el proceso de recuperación de suelos salinos mediante el uso de columnas de suelo y cuatro tipos de yeso agrícola (sulfato de calcio); comprobaron su efectividad al bajar el pH de 8.5 a 7.9.

En la zona del Lago de Texcoco, como plan de reforestación, se introdujeron especies halófitas nativas de la zona entre las que destacan el pasto salado (*Distichlis spicata*), romerito (*Saueda nigra*, *Saueda edulis*). Principalmente la recuperación de suelos para la agricultura se ha dado en las riberas del antiguo lago, donde la población se fue estableciendo. Para esto, el método más común

para reducir la salinidad fue hacer lavados con agua dulce y por las precipitaciones que con el paso del tiempo se fue reduciendo la salinidad.

## **2.5. Sedimentos lacustres**

En la parte central del ex lago de Texcoco, se presentan sedimentos lacustres compuestos de un hidrogel hipersalino denominado localmente como jaboncillo (Gutiérrez *et al.*, 2005). El jaboncillo es un material formado por amorfos silíceos en forma de nódulos isotrópicos (López *et al.*, 2004) y amorfos de hierro, presenta alta capacidad de retención de humedad (Gutiérrez *et al.*, 2005), y su hipersalinidad se demuestra con su alta conductividad eléctrica ( $>192 \text{ dS m}^{-1}$ ). Sanders (1980) mencionó que se trata de un lago hipersalino incluso con mayor concentración de sales si se compara con el mar y, con el pH alcalino que presenta, es posible extraer NaOH con solo evaporar el agua.

Cuando este hidrogel se expone a la superficie y al proceso de evaporación, la composición iónica aumenta ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{CO}_3^{2-}$  de 3 895, 880, 600  $\text{meL}^{-1}$  respectivamente), con un predominio del catión  $\text{Na}^+$  (con 4 920  $\text{meL}^{-1}$ ) y se produce acumulación de sal (Camargo-Hernández, 2010); además de las concentraciones de metales pesados como plomo (Balderas *et al.*, 2005). En ese sentido el jaboncillo es un material lacustre con propiedades físicas, químicas e hidráulicas que lo hace único en su especie (Gutiérrez, 2010, 2018).

Gutiérrez y Ortiz (2013) realizaron un levantamiento de suelos en el ex lago de Texcoco y encontraron que los sedimentos lacustres presentan diferentes colores como el rojo, verde, negro, y amarillo. Esos sedimentos son ricos en sales como trona, halita y mirabilita, además de compuestos como sulfuro de hierro amorfo y elementos como azufre, cobre, plomo y hasta arsénico. En los sedimentos lacustres de jaboncillo negro es donde ocurre la mayor concentración de sales, y metales pesados y donde incluso no crecen ni las plantas halófilas. Carranza-Edwards (2018) menciona que los sedimentos lacustres del subsuelo del lago de Texcoco son medios heterogéneos y el subsuelo es altamente corrosivo debido a su salinidad.

### III. OBJETIVOS

#### 3.1. Objetivo general

Evaluar el impacto ambiental de los rellenos lacustres hipersalinos depositados en los socavones de ex minas en Texcoco, Estado de México.

#### 3.2. Objetivos particulares

- Determinar las propiedades físicas y químicas de los sedimentos lacustres depositados.
- Caracterizar la geoquímica y mineralogía de los rellenos derivados de sedimentos lacustres.
- Evaluar el efecto del lavado del suelo y la aplicación de estiércol ovino, yeso y material orgánico fresco sobre el contenido de sales solubles y la proporción de sodio soluble en los sedimentos.
- Determinar experimentalmente la cantidad y concentración de los mejoradores a aplicar en los rellenos que permitan el desarrollo de plantas halófitas nativas como romero (*Suaeda edulis*), pasto salado (*Distichlis spicata* (L.) *greene*) y rodadora (*Kochia scoparia* (L.)); así como cultivos tolerantes a la salinidad (cebada (*Hordeum vulgare*) y betabel (*Beta vulgaris*)).
- Proponer una metodología para restaurar el área afectada con hipersalinidad.

#### **IV. HIPOTESIS**

La manera en la que fueron depositados los sedimentos lacustres en las minas (montículos y forma concoidal o creciente por la viscosidad del material) interviene directamente en el cambio de sus propiedades químicas y mineralógicas con el paso del tiempo.

Los sedimentos lacustres que extrajeron del NAICM están fuertemente reducidos y mostrarán diferentes condiciones oxido-reducción por el incremento en la porosidad (tipo de relleno), pendiente y drenaje. En ambientes oxidantes se formará jarosita con pH de 5 a 6; yeso si se está neutralizando; ferrhydrita si el ambiente no es oxidante y tiene pH de 7 a 10 y siderita si el pH es de 6 a 9.

En los rellenos concoidales, la pendiente influye en las condiciones de oxido-reducción y salinidad; en la ladera alta ocurre menor salinidad y oxidación mientras que, en la ladera baja domina la salinidad y la reducción.

En materiales oxidados, mejoradores de suelo como el estiércol, material orgánico fresco y yeso son capaces de bajar la salinidad y sodicidad disminuyendo propiedades como el pH y la CE para lograr la proliferación de especies vegetales halófitas y con el tiempo formar suelo.

## V. MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1. Área de estudio

El presente estudio se llevó a cabo en dos socavones de minas de arena de las localidades de San Nicolás Tlaminca y San Miguel Tlaixpan, municipio de Texcoco, Estado de México. La mina de San Nicolás Tlaminca se localiza en latitud 19°29'55.41" N y longitud 98°49'28.56" O a 2 365 msnm y la de San Miguel Tlaixpan en latitud 19°30'21.78" N y longitud 98°50'22.56" O a 2 332 msnm. El clima en la región es semiárido BS KW (w) (i) (García, 1973), con una precipitación media anual de 558.1 mm y una temperatura media anual de 15.5 °C. La evaporación es de 1 665.8 mm (CNA, normales climatológicas de la estación 15101 San Miguel Tlaixpan, Texcoco). A continuación, se describen los sitios en que fueron depositados los sedimentos lacustres en ambas minas.

- 1) En la mina de San Nicolás Tlaminca, los sedimentos están mezclados con tezontle y geotextiles. Aproximadamente este socavón tiene un área de dos hectáreas. Los sedimentos fueron depositados desde la parte alta del lugar y debido al alto contenido de humedad, los materiales se fueron deslizando hasta la parte más baja, de ahí su arreglo creciente (concoidal) o en forma de abanico hacia la parte más baja (Figura 3a y 3b).
- 2) En la mina de San Miguel Tlaixpan, los sedimentos se depositaron formando montículos (Figura 4). La diferencia entre las minas es que esta se encuentra en un espacio abierto con pendiente del 11% (calculada a través de Google Earth).

La vegetación encontrada es referida a especies halófitas que se han desarrollado en la parte alta de la zona, tales como pasto salado (*Distichlis spicata* (L.) *greene*), romerito (*Suaeda nigra* y *Suaeda torreyana*) y rodadora (*Kochia scoparia* (L.)). No se tiene el conocimiento de cuánto material se depositó ni de la profundidad de las minas.

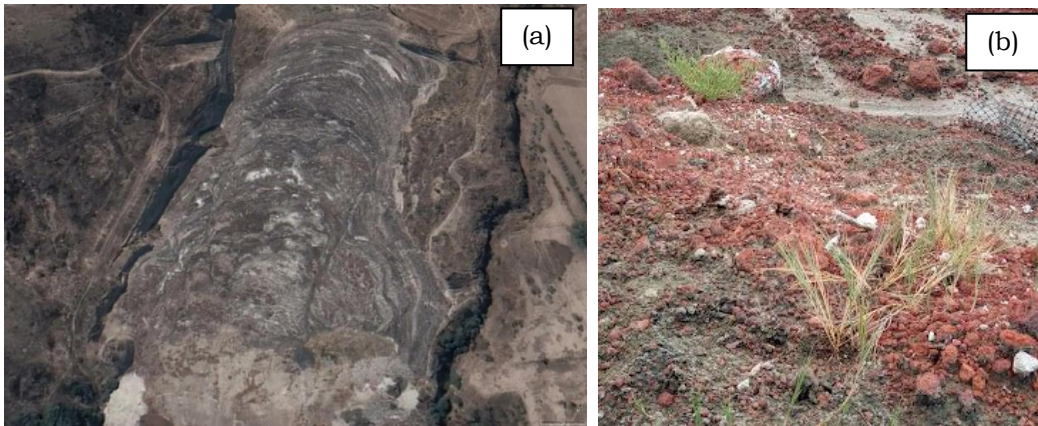


Figura 3. Depósito de sedimentos lacustres en mina de arena de la localidad de San Nicolás Tlaminca, Texcoco, (a) forma de abanico, fuente: Google Earth, 2021, (b) mezcla del sedimento con tezontle, geotextiles y vegetación halófitas.



Figura 4. Sedimentos lacustres depositados en la mina de San Miguel Tlaixpan, Texcoco, a) vista aérea, fuente: Google Earth, 2021, b) y c) sedimentos en forma de montículo, fuente propia.

## 5.2. Trabajo de campo

### San Nicolás Tlaminca

Dada la diversidad de sedimentos lacustres que se depositaron en el socavón de la mina de Tlaminca, se realizaron tres pozos de 130 cm de profundidad en lo que se consideró ladera alta, media y baja y se determinó que los materiales presentan diversas condiciones de oxidación y reducción, como se puede apreciar en la Figura 5. Dado que presentan diferentes condiciones se propuso un muestreo en transectos y a diferentes profundidades. Se colectaron muestras alteradas trazando tres transectos a lo largo del depósito (Figura 6) y, en cada transecto, a cada 10 m se obtuvo la muestra a tres profundidades (0-20 cm, 20-40 cm y 40-60 cm) obteniendo 60 muestras en total, donde se encontraron sedimentos con morfología distinta de acuerdo con el color (verdes, pardos y pardos rojizos), y alternados ocasionalmente con cenizas de color negro como se observa en la Figura 7. Además, se colectó una muestra de sedimento donde se había desarrollado vegetación (pasto salado, Figura 8), esto con el fin de conocer los parámetros de salinidad en los que la vegetación puede proliferar. La herramienta utilizada fue una barrena tipo *Riverside* o *California*.

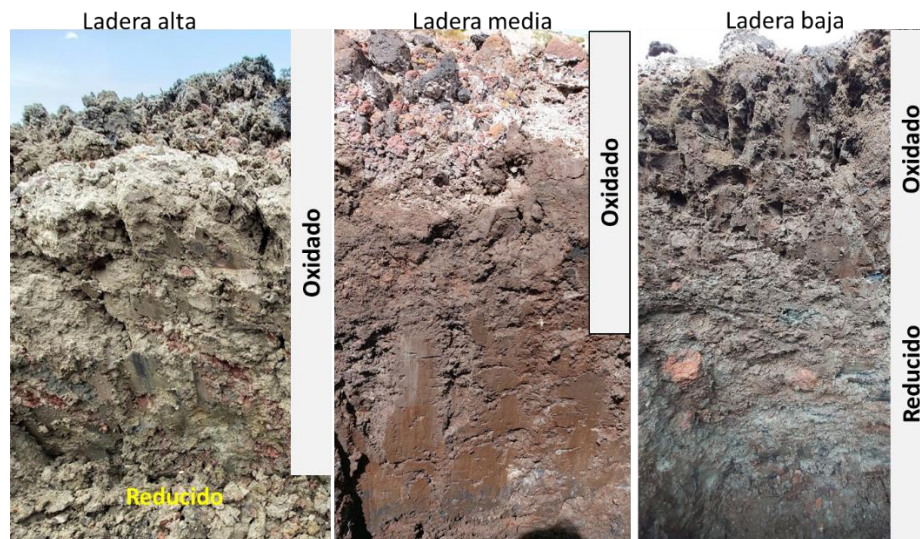


Figura 5. Perfiles en la zona de estudio que muestran el grado de oxidación de los sedimentos, fuente: propia.



Figura 6. Puntos de muestreo.

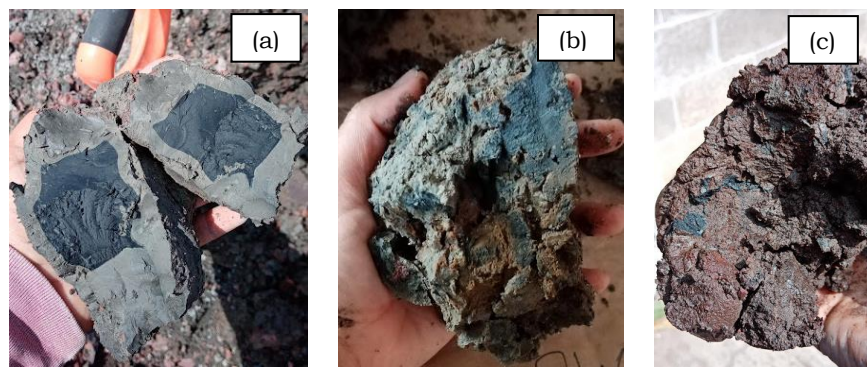


Figura 7. (a) Sedimento donde se aprecia el estado de oxidación (gris) y reducción (negro); (b) y (c) sedimentos oxidados.



Figura 8. Muestra de suelo con pasto salado.

### San Miguel Tlaixpan

En la mina de Tlaixpan, se identificaron cuatro zonas principales de acuerdo al tiempo de depósito de los sedimentos. Cada punto corresponde a un montículo; por ejemplo, para los sedimentos depositados después de 8 meses se tomaron las sales superficiales, el jaboncillo debajo de estas que se encontraba seco y,



por último, con una barrena tipo *California* se sacó una muestra a los 30 cm de profundidad. Este mismo procedimiento se aplicó para el muestreo de los otros tres montículos y se nombraron según las características que presentaron en el muestreo tal como se describe a continuación.

1. Sedimentos depositados después de 8 meses (octubre, 2017)
  - 1.1 Sales superficiales
  - 1.2 Jaboncillo seco pardo muy oscuro
  - 1.3 Jaboncillo húmedo a 30 cm de profundidad (gris oscuro y negro)
2. Sedimentos depositados después de 6 meses (diciembre, 2017)
  - 2.1 Blanca
  - 2.2 Jaboncillo húmedo a 70 cm de profundidad
  - 2.3 Jaboncillo extendido (revuelto con otros materiales)
3. Sedimentos depositados después de un mes (mayo, 2018)
  - 3.1 Jaboncillo húmedo pardo oscuro rojizo
  - 3.2 Jaboncillo húmedo negro
  - 3.3 Jaboncillo húmedo gris verduzco, gris muy oscuro a negro
4. Sedimentos depositados después de un mes (mayo, 2018)
  - 4.1 Jaboncillo húmedo pardo pálido y gris azulado claro
  - 4.2 Jaboncillo húmedo negro
  - 4.3 Jaboncillo húmedo negro y gris olivo
5. Costras de sales

### **5.3. Trabajo de laboratorio**

#### **5.3.1. Análisis físicos y químicos**

Las muestras de rellenos se secaron bajo la sombra y tamizaron con malla <2 mm para obtener la fracción de tierra fina y proceder a su análisis de laboratorio. Cabe mencionar que el muestreo de la mina de Tlaixpan se realizó en mayo del 2018 y la mina de Tlaminca en abril del 2021, antes de la temporada de lluvia.

Las propiedades químicas y físicas que se analizaron para la caracterización de los sedimentos fueron: pH (1:2, suelo: agua), capacidad de intercambio catiónico (CIC) por el método de acetato de amonio, bases intercambiables  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$  y cationes solubles (espectrofotómetro de emisión de flama y por absorción atómica), aniones solubles, conductividad eléctrica (pasta de saturación), color (Carta Munsell) y humedad. Todas las metodologías ilustradas en la Figura 9 fueron extraídas del manual de procedimientos de Van Reeuwijk (2002) y realizadas en el laboratorio del Área de Génesis y Clasificación de Suelos del programa de Edafología del Colegio de Postgraduados.

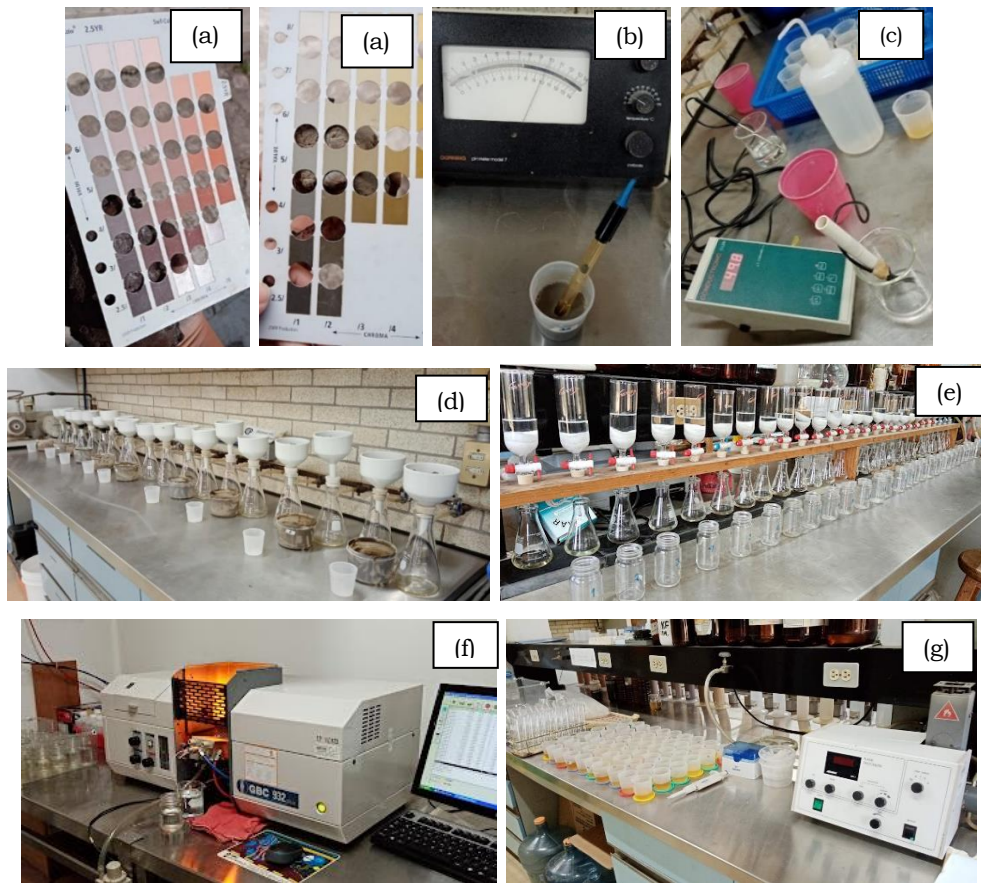


Figura 9. Análisis de laboratorio. (a) Toma de color por la carta Munsell, (b) Potenciómetro para pH, (c) Conductímetro para CE, (d) Pastas de saturación en tren de vacío, (e) Método de acetato de amonio para CIC y cationes intercambiables, (f) Absorción atómica.

### 5.3.2. Análisis mineralógico

#### San Nicolás Tlaminca

Del sedimento de Tlaminca, las costras de sales que se formaron en las muestras mientras se secaban (Figura 10) fueron molidas en un mortero de ágata hasta obtener partículas de 50 micrones. Posteriormente, se analizaron en polvo en el Difractómetro de Rayos X, marca GBC para ser analizadas con difracción de Rayos X y determinar la mineralogía del material por medio del programa Traces versión 6.



Figura 10. Costras de sal formadas en las muestras.

#### San Miguel Tlaixpan

Debido a que el material colectado en Tlaixpan fueron lodos, las muestras se leyeron húmedas, tal cual como venían de campo (reducidas), pero se secaron para su comparación (oxidación). Las muestras se secaron en la estufa a 105 °C y fueron preparadas de la misma forma, reduciéndolas a polvo fino, y por último se tomó la lectura de la contracción o expansión de las arcillas naturales y con etilen glicol. Una vez obtenidos los difractogramas, se analizaron en el programa de Rayos X para la identificación de los minerales presentes.

### 5.4. Fase experimental

Con los sedimentos de la mina de Tlaminca se hizo un experimento completamente al azar, considerando 3 sitios (ladera alta, media y baja), tres mejoradores (estiércol ovino, material orgánico fresco y yeso, además de una

mezcla de yeso y material orgánico), dos dosis de mejorador (100 y 200 t h<sup>-1</sup>) de acuerdo con Rodríguez (1990) y un testigo, con 3 repeticiones cada uno. Los desperdicios de frutas y verduras se cortaron aproximadamente de 2x2 cm para su mejor incorporación con el sedimento.

El sedimento de cada sitio se mezcló hasta ser homogeneizado para su uso en macetas. El Cuadro 4 muestra los tratamientos y las dosis de los mejoradores.

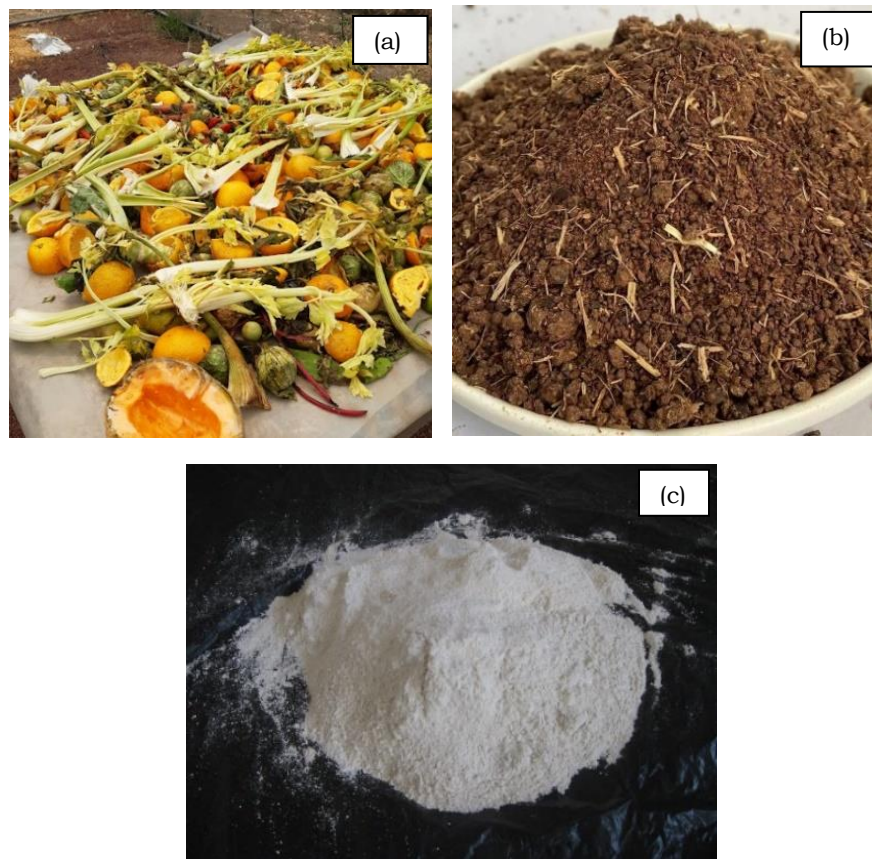


Figura 11. Mejoradores de suelo utilizados. (a) Material orgánico fresco; (b) Estiércol ovino; (c) Yeso agrícola.

Cuadro 4. Tratamientos aplicados.

<b>Tratamiento</b>	<b>Sitio</b>	<b>Mejorador</b>	<b>Dosis (t ha<sup>-1</sup>)</b>
AT	Alto	Testigo	0
AE <sub>100</sub>	Alto	Estiércol	100
AE <sub>200</sub>	Alto	Estiércol	200
AM <sub>100</sub>	Alto	Material orgánico	100
AM <sub>200</sub>	Alto	Material orgánico	200
AY <sub>100</sub>	Alto	Yeso	100
AY <sub>200</sub>	Alto	Yeso	200
AYM <sub>100</sub>	Alto	Yeso/Material orgánico	100
AYM <sub>200</sub>	Alto	Yeso/Material orgánico	200
MT	Medio	Testigo	0
ME <sub>100</sub>	Medio	Estiércol	100
ME <sub>200</sub>	Medio	Estiércol	200
MM <sub>100</sub>	Medio	Material orgánico	100
MM <sub>200</sub>	Medio	Material orgánico	200
MY <sub>100</sub>	Medio	Yeso	100
MY <sub>200</sub>	Medio	Yeso	200
MYM <sub>100</sub>	Medio	Yeso/Material orgánico	100
MYM <sub>200</sub>	Medio	Yeso/Material orgánico	200
BT	Bajo	Testigo	0

<b>Tratamiento</b>	<b>Sitio</b>	<b>Mejorador</b>	<b>Dosis (t ha<sup>-1</sup>)</b>
BE <sub>100</sub>	Bajo	Estiércol	100
BE <sub>200</sub>	Bajo	Estiércol	200
BM <sub>100</sub>	Bajo	Material orgánico	100
BM <sub>200</sub>	Bajo	Material orgánico	200
BY <sub>100</sub>	Bajo	Yeso	100
BY <sub>200</sub>	Bajo	Yeso	200
BYM <sub>100</sub>	Bajo	Yeso/Material orgánico	100
BYM <sub>200</sub>	Bajo	Yeso/Material orgánico	200

En macetas con aproximadamente 3.5 L de volumen se colocó el sedimento muestreado junto con el mejorador según cada tratamiento. El cálculo de mejorador por maceta se hizo con base en la superficie de esta, aplicando 510 g por maceta para la dosis de 200 t ha<sup>-1</sup> y 255 g por maceta para la dosis de 100 t ha<sup>-1</sup>. El tratamiento combinado de yeso y material orgánico se aplicó con una proporción 50/50 para ambas dosis.

Tomando en cuenta la precipitación pluvial media anual y la temporada de lluvia se aplicaron 10 riegos de 500 ml cada uno en periodos de 4 días cada riego. El lixiviado de cada maceta se colectó cada dos riegos para evaluar la disminución de los parámetros de salinidad, en este caso, pH y CE; el Na<sup>+</sup> soluble solo se extrajo del lixiviado inicial y el final. El agua utilizada para los riegos fue destilada.

Al término de los riegos y como experimento exploratorio, algunas plantas halófilas y plantas locales se utilizaron como indicadores biológicos de la disminución de la salinidad, entre ellas el romerito, la rodadora, la cebada

(*Hordeum vulgare*) y betabel (*Beta vulgaris*). Es importante mencionar que la semilla de romerito y la semilla de la rodadora se colectaron de la zona de estudio en la época de secas y fue escasa por lo que no alcanzó la semilla para las macetas de la ladera alta del experimento. La cebada y el betabel fueron distribuidas en todos los tratamientos por igual. Las semillas fueron sembradas al voleo (una pizca) y a partir de su germinación se mantuvieron con la precipitación pluvial restante de la temporada. Después de la temporada de lluvia se procedió a hacer el análisis químico del sedimento final por medio de pastas de saturación donde se determinó el pH, la CE, el contenido de Na<sup>+</sup> soluble y la CIC.

### **5.5. Análisis estadístico**

Finalmente, se utilizó un diseño completamente al azar. Los datos se analizaron en el programa Excel 13, utilizando la prueba de diferencia mínima significativa (DMS) y una comparación de medias con la prueba de rangos múltiples de Tukey a un nivel de significancia de 0.05 para determinar el mejor tratamiento del experimento.

## VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1. Caracterización de los sedimentos de Tlaminca

A través de los pozos que se realizaron en la mina, se pudo observar que los sedimentos experimentan procesos de oxidación con respecto a la pendiente. En la parte alta prácticamente todo el relleno está oxidado y la profundidad de este proceso disminuye en la pendiente baja, en donde todavía se encontraron rellenos negros y con un fuerte olor a azufre. Estos sedimentos fueron depositados hace dos años y aún conservan su estado reducido por el mal drenaje de la parte baja, lo que permite la acumulación de agua durante el periodo de lluvias. A pesar de que la mina es de arena, se esperaría filtración del agua salina; sin embargo, el relleno está colapsado, precisamente por el alto contenido de sodio que impermeabiliza e impide la lixiviación de las sales a los horizontes su superficiales.

Los parámetros que a continuación se describen pertenecen a los resultados del análisis de laboratorio de los sedimentos estudiados, los valores que se presentan en el Cuadro 5 se refieren a las propiedades químicas generales de clasificación de suelos salinos. Asimismo, en el Cuadro 6 se muestran los valores obtenidos del contenido de cationes y aniones solubles, así como de cationes intercambiables, factores clave para su caracterización.

#### *pH*

En general, el análisis químico de las muestras arrojó valores de pH mayores a 8.5, clasificado como fuertemente alcalino de acuerdo con la NOM-021, y concuerdan con los valores reportados por varios autores (Tarín y Velázquez, 1989; López, 2001; Gutiérrez *et al.*, 1998, 2005; Dendooven *et al.*, 2010). Estos resultados demuestran que, el pH de los sedimentos depositados en la mina de Tlaminca no han cambiado de manera considerable, comparados con su estado natural.



El valor más alto obtenido se encuentra entre 20-40 cm de profundidad en la parte baja (pH de 9.8); mientras que, el más bajo fue en la parte media en las profundidades de 0-20 cm y 40-60 cm (pH de 9.4). En el Cuadro 5 se reporta que los valores de pH tienen una variación mínima (de 0.1) con referencia a la profundidad de muestreo.

#### *Conductividad eléctrica (CE)*

Clasificados como muy fuertemente salinos (NOM-021), los sedimentos de las laderas alta y media demuestran que, conforme a la profundidad de muestreo, los valores de CE disminuyen de 58.80 dS m<sup>-1</sup> a 47.75 dS m<sup>-1</sup> en la parte alta y de 61.10 dS m<sup>-1</sup> a 55.27 dS m<sup>-1</sup> en la parte media. La CE es mayor en la parte baja debido a la pendiente del terreno presentando valores de 65.30 dS m<sup>-1</sup> a 63.48 dS m<sup>-1</sup>. El agua presente en el lugar se acumula en la parte baja y permite que haya mayor movilidad de cationes en el sedimento, tal como se menciona en FAO (1988) donde la CE está directamente relacionada con el rango de humedad en campo.

#### *Color*

El color del suelo depende de sus componentes y varía con el contenido de humedad, materia orgánica, contenido de metales pesados como el Cu, Pb, Cr, sulfuro de hierro amorfo y con procesos de gleyzación o grado de oxidación de minerales presentes. Se puede evaluar como una medida indirecta de ciertas propiedades del suelo (el origen de material parental, presencia de materia orgánica, estado de drenaje y la presencia de sales y carbonato, etc.) (CONACYT-CP, 2021; FAO, 2021).

Se presentaron en su mayoría colores en húmedo mezclados de negro (10YR 2/1, 7.5YR 2.5/1, 2.5Y 2.5/1), pardo muy oscuro (10YR 2/2, 7.5YR 2.5/3), gris muy oscuro (10YR 3/1, 2.5Y 3/1) y gris (10YR 4/1) que concuerda con lo encontrado por Gutiérrez (2005). Estos colores indican que el sedimento presenta condiciones de óxido-reducción dado que los colores verdosos podrían referirse

a condiciones reductoras asociadas posiblemente con actividad orgánica, mientras que los pardos y rojizos pueden deberse a condiciones oxidantes (Carranza-Edwards, 2018).



Figura 12. Evidencia fotográfica del cambio de color por oxidación.

### *Cationes y aniones solubles*

El objetivo principal de analizar los cationes y aniones solubles fue el de establecer la composición de las sales solubles presentes. Los altos valores de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Cl}^-$  son atribuidos a los componentes de las sales que predominan en el lugar como la trona ( $\text{Na}_3(\text{CO}_3)(\text{HCO}_3)\cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ ) y halita ( $\text{NaCl}$ ). Los contenidos de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  son relativamente bajos en comparación con los ya mencionados. Con referencia a esto Camargo-Hernández (2010) explica que la baja concentración de calcio y magnesio se debe a la fuerte reacción alcalina, por lo que causa una precipitación de estos elementos en forma de carbonatos con una baja solubilidad.

La salinidad en el valle de Texcoco se debe a la presencia de sales o cloruros, sulfuros o carbonatos. La diferencia entre estos materiales depende de su solubilidad (Oliver-Burwitz *et al.* 2019). El  $\text{Na}^+$  no solo domina en los sitios de intercambio, sino que se encuentra en altas cantidades de forma soluble. Esto trae como consecuencia un alto impacto en las condiciones edáficas (como el deterioro de la estructura al dispersarse la arcilla (García, 2002; Omuto, 2021)) para que proliferen la mayoría de las plantas debido al estrés osmótico al que son sometidas.

De acuerdo con Murillo *et al.* (2001), las altas concentraciones de NaCl provocan que la movilidad del agua disminuya y por ende la velocidad de germinación de las semillas.

#### *Capacidad de Intercambio Catiónico*

La CIC reportada muestra rangos de 44  $\text{Cmol}_{(+)} \text{Kg}^{-1}$  a 72  $\text{Cmol}_{(+)} \text{Kg}^{-1}$  cercanos a los encontrados por Gutiérrez *et al.* (2005) que van de los 240  $\text{Cmol}_{(+)} \text{Kg}^{-1}$ , en muestras húmedas, y 56.10  $\text{Cmol}_{(+)} \text{Kg}^{-1}$  en muestras secas, como es el caso. Además, mencionan que el alto valor de la CIC se debe al hecho de que el hidrogel de Si húmedo tiene alta superficie específica y por ende desarrolla un alto número de cargas en un ambiente alcalino.

Gutiérrez *et al.* (2005) reportaron que los valores obtenidos de CIC en muestras húmedas son tres veces más altos con respecto a las muestras secas, y puede explicar el alto porcentaje de sodio intercambiable.

#### *Porcentaje de Sodio Intercambiable*

El PSI mayor a 15 se considera tradicionalmente que afecta las características estructurales e hidráulicas del suelo (Lastiri, 2016). Los porcentajes de sodio intercambiable mostrados en el Cuadro 5 superan en mayor grado los registros de López (2001) y en menor grado los de Ortiz (1999). Estas diferencias pueden estar relacionadas con la variación estacional, en donde la precipitación de calcio y magnesio es mayor en el periodo seco (primavera) que, en periodos más húmedos, y genera valores de PSI más altos (99.9%) (Camargo-Hernández, 2010).

En la relación entre el PSI y RAS, el sodio en los sitios de intercambio está vinculado con la actividad de las arcillas mientras que el sodio soluble queda libre al estar en exceso y sin suficientes cargas para permanecer en los sitios de intercambio de la fracción arcillosa (CONACYT-CP, 2021). Es por ello que los valores de RAS se muestran elevados.

### Secuencias iónicas

El orden catiónico resultado de los análisis químicos fue  $\text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$ ; para el caso de los aniones, el orden fue  $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{CO}_3^{2-} > \text{SO}_4^{2-}$ . Las sales que se forman de esas secuencias son principalmente halita ( $\text{NaCl}$ ) y trona ( $\text{Na}_3(\text{HCO}_3)(\text{CO}_3) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) los cuales están identificados con el análisis mineralógico realizado.

La variación de los resultados se puede atribuir a la diversidad y el origen del material depositado (no se conoce con certeza su procedencia), a la pendiente del terreno y la mezcla con tezontle que pudo afectar las propiedades físicas y químicas del sedimento original.

Cuadro 5. Clasificación de sedimentos según parámetros de salinidad.

Ladera	Profundidad	pH	CE	CIC	PSI	RAS	Clasificación
	cm		dS m <sup>-1</sup>	Cmol <sup>(+)</sup> Kg <sup>-1</sup>	%		
Alta	0-20	9.6	58.80	59.37	407.81	16 313.38	Suelo salino-sódico
	20-40	9.7	51.63	71.27	212.51	11 872.07	Suelo salino-sódico
	40-60	9.7	47.75	70.36	238.32	9 739.79	Suelo salino-sódico
Media	0-20	9.4	61.10	63.64	240.05	8 383.75	Suelo salino-sódico
	20-40	9.5	54.71	64.09	153.96	8 229.01	Suelo salino-sódico
	40-60	9.4	55.27	59.81	210.98	6 898.11	Suelo salino-sódico
Baja	0-20	9.7	65.30	52.63	342.40	20 330.27	Suelo salino-sódico
	20-40	9.8	64.50	64.15	415.59	27 776.06	Suelo salino-sódico
	40-60	9.7	63.48	44.08	443.65	17 439.81	Suelo salino-sódico

Cuadro 6 . Resultados de laboratorio de los sedimentos de Tlaminca.

Ladera	Profundidad	Cationes solubles				Aniones solubles				Cationes intercambiables			
		Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>
	cm	-----mmol L <sup>-1</sup> -----								----- Cmol(+) Kg <sup>-1</sup> -----			
Alta	0-20	0.08	0.67	23 043.48	1 972.96	72.02	445.12	17 728.57	19.68	31.72	81.85	192.99	27.27
	20-40	0.11	0.61	19 950.31	1 300.69	53.96	322.90	13 085.71	16.14	49.56	86.27	138.8	23.90
	40-60	0.13	0.83	19 322.98	1 216.66	48.93	295.93	11 885.71	14.55	51.59	94.71	148.01	23.90
Media	0-20	0.10	0.52	22 173.91	900.82	42.82	250.95	9 377.78	11.80	31.58	85.21	120.17	18.27
	20-40	0.12	0.65	21 476.43	645.07	34.80	182.98	6 800.00	8.57	42.06	95.78	87.69	17.11
	40-60	0.10	0.59	21 666.67	713.27	37.01	180.55	6 944.44	7.61	42.90	96.34	97.69	17.54
Baja	0-20	0.03	0.45	20 869.57	2 033.25	75.99	583.02	19 575.00	7.88	19.94	64.78	174.52	12.31
	20-40	0.03	0.25	17 282.61	1 566.50	71.30	497.21	16 625.00	4.95	23.45	67.04	270.09	16.89
	40-60	0.05	0.35	16 880.43	1 528.13	68.39	466.61	15 425.00	5.07	27.49	74.03	180.14	21.80

## 6.2. Caracterización de los sedimentos de Tlaixpan

El Cuadro 7 muestra los resultados de los análisis de laboratorio de los sedimentos de San Miguel Tlaixpan.

### *pH*

Los pH obtenidos en los lodos, de acuerdo con la NOM-021, son fuertemente alcalinos (mayores a 8.5) y coinciden con lo ya reportado en la zona del ex Lago de Texcoco (Tarín y Velázquez, 1989; López, 2001; Gutiérrez *et al.*, 1998, 2005; Dendooven *et al.*, 2010). Valores de pH superiores a 8.5 invariablemente indica un PSI de 15 o más. Las costras de sal presentaron los pH más bajos (8.5 y 8.6) mientras que el valor más alto fue en la muestra blanca y el jaboncillo marrón pálido con gris azulado del depósito actual 2 (pH de 10.5). El aumento del pH a valores arriba de 10, puede deberse a la intensa evaporación del lago, lo cual en condiciones reducidas provocó una rápida solubilización del Si, y por lo tanto su sobresaturación (Iler, 1955). Asimismo, la alta alcalinidad es causada por las altas cantidades de sodio y carbonatos (Alexander *et al.*, 1954). La entrada de las aguas pluviales pudo contribuir en la disminución del pH y dar lugar a la precipitación de sílice inorgánica. Este proceso fue descrito por Jones *et al.* (1967) donde mencionan que un cambio de pH de 11 a 8.5 puede provocar la formación de 1.5 mm de capa de sílex por cada metro de profundidad de sales.

### *Conductividad Eléctrica*

De acuerdo con la NOM-021, los sedimentos analizados se consideran fuertemente salinos (8.1 – 16.0 dS m<sup>-1</sup>) y muy fuertemente salinos (>16 dS m<sup>-1</sup>). Las costras compuestas principalmente de halita, trona y calcita (Cuadro 7) alcanzan los 117.6 dS m<sup>-1</sup>; es decir, existe un alto contenido de sales en el sistema. El aumento de la salinidad puede incrementar la movilización de metales y su retención por dos mecanismos. En el primero, los cationes de Na y K pueden reemplazar a metales pesados en lugares de intercambio catiónico. El

segundo, los aniones Cl y SO<sub>4</sub> pueden formar compuestos más estables con metales como Pb, Cu, Cd y Hg (Galán & Romero, 2008).

### *Humedad*

La alta capacidad de retención de humedad está relacionada con la textura constituida por materiales finos, la estructura interna del jaboncillo y los materiales amorfos que se acomodan con un empaquetamiento esponjoso que aumenta la superficie específica (López, 2001). Alexander *et al.* (1954) señalan que, a un pH alcalino fuerte como el presente en los lodos, los polímeros de Si tienen abundantes cargas negativas que reaccionan con las moléculas de agua. Iler (1955) menciona que las masas gelatinosas blandas pueden contener 100 partes de agua por parte de sílice, lo que significa que con un 5% de Si en este material ya se puede explicar el 500% de retención de agua en el jaboncillo. Además, el Na<sup>+</sup>, al tener un gran radio iónico y mayor radio de hidratación, también incrementa la retención de humedad (Brady y Weil, 1999).

### *Color*

El cambio de verdoso a rojizo asociado con fenómenos de óxido-reducción en presencia de materia orgánica está bien documentado en suelos y sedimentos con hierro (Schwertmann y Taylor, 1989). El cambio de color opuesto es menos común y puede ser causado por la reducción del cobre. La causa de los cambios de color no está clara. El jaboncillo rojo no muestra reflejos XRD de óxidos de hierro, mientras que las otras capas contienen pirita (FeS<sub>2</sub>), calcopirita (CuFeS<sub>2</sub>) y fayalite (Fe<sup>2+</sup>SiO<sub>4</sub>). Además, de acuerdo con NRCS-USDA (2000), el color 10YR 2/1 (negro) se refiere a la pirita y al sulfuro de hierro, que coincide con el análisis mineralógico obtenido. Lo anterior mostrado en el Cuadro 8.

Cuadro 7. Resultados de laboratorio de los sedimentos de Tlaixpan.

<b>Muestras</b>		<b>pH</b>	<b>CE</b>	<b>Humedad</b>
			dS m <sup>-1</sup>	%
Depósito	1.1	8.60	105.8	6.94
8 meses	1.2	9.00	40.3	15.58
(octubre 2017)	1.3	9.15	43.9	8.64
Depósito	2.1	10.50	8.0	18.11
6 meses	2.2	9.17	-	3.51
(diciembre 2017)	2.3	9.20	18.8	10.07
Depósito 1	3.1	8.95	77.5	5.03
(mayo 2018)	3.2	9.10	87.2	5.23
	3.3	9.20	87.0	4.98
Depósito 2	4.1	10.50	5.8	6.64
(mayo 2018)	4.2	9.10	79.0	7.36
	4.3	9.15	112.2	4.84
Costra de sal	5	8.50	117.6	3.07



Cuadro 8. Color del sedimento de Tlaixpan.

<b>Muestra</b>		<b>Color</b>	
	1	10YR 2/2	Pardo muy oscuro
Depósito 8 meses (octubre 2017)	2	N 6/1	Gris
	3.1	5Y 4/1	Gris oscuro
	3.2	N 2.5/1	Negro
Depósito 6 meses (diciembre 2017)	4	2.5Y 8.1	Blanco
	5	10YR 2/2	Pardo muy oscuro
	6	N 6/1	Gris
Depósito 1 mes (mayo 2018)	7.1	5YR 2.5/2	Pardo oscuro rojizo
	7.2	10YR 2/1	Negro
	7.3	5YR 2.5/1	Negro
	8	10Y 5/1	Gris verdoso
	9.1	5YR 3/1	Gris muy oscuro
	9.2	N 2.5/1	Negro
	9.3	10Y 5/1	Gris verdoso
Depósito 1 mes (mayo 2018)	10.1	10YR 9/2	Pardo muy pálido
	10.2	5PB 7/1	Gris azulado claro
	11.1	10YR 2/1	Negro
	11.2	N 2.5/1	Negro
	12.1	N 2.5/1	Negro
	12.2	5Y 5/2	Gris olivo
	13	10YR 2/1	Negro

### **6.3. Análisis mineralógico**

#### **6.3.1. Análisis mineralógico de los sedimentos de Tlaminca**

La pérdida de humedad por evaporación estacional (periodo de sequía), bajo condiciones de textura arcillosa, intensifica la acumulación de sales sobre la superficie del suelo, formando costras y eflorescencias (Camargo-Hernández, 2010).

De las costras salinas que se formaron mientras las muestras se secaban, se eligieron dos diferentes; se procesaron y analizaron en el difractómetro de Rayos X, dando como resultado los difractogramas que a continuación se presentan. La primera costra fue seccionada en dos partes denominadas “amarilla” y “blanca”. El difractograma de la Figura 13 corresponde a la parte amarilla; el de la Figura 14 pertenece a la parte blanca; y la Figura 15 al difractograma de la segunda costra. Todos los DRX presentaron reflexiones de trona ( $\text{Na}_3(\text{CO}_3)(\text{HCO}_3) \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ ) y halita ( $\text{NaCl}$ ) lo que concuerda con lo encontrado en el material del ex Lago de Texcoco por Gutiérrez *et al.* (2005) y Camargo-Hernández (2010). Además, se encontró en la parte amarilla, el mineral de clausthalita ( $\text{PbSe}$ ), mostrando la presencia de otros minerales (metales) que componen a los sedimentos.

El grado de movilidad de los minerales depende de su solubilidad, por lo que minerales a base de cloruros serán los primeros en desplazarse, producto del ascenso capilar ante una diferencia de potencial hídrico, seguida por sulfatos, bicarbonatos y por último carbonatos (Roquero *et al.*, 2001). La secuencia iónica de los sedimentos muestra que existe una mayor cantidad de cloruros en la solución del suelo por lo que se esperaría encontrar mayor concentración de halita en la formación de costras, seguida de trona. La costra de la parte amarilla coincide con lo anterior, existe mayor concentración de halita con respecto a la trona; sin embargo, la concentración de trona predomina en la parte blanca y en la segunda costra.

Camargo-Hernández (2010) menciona que la morfología de la costra está relacionada con el manejo, microrrelieve y procesos de formación como deshidratación, sedimentación y evaporación; más que la composición iónica, secuencia mineralógica o mineral dominante. De esa manera, los rasgos micromorfológicos y mineralógicos varían entre costras, aun cuando las características físicas y químicas del sedimento sean las mismas. A pesar de numerosos estudios de salinidad en la zona del ex lago de Texcoco, no existe información sobre el tema de las costras por lo que, es necesario determinar su mineralogía.

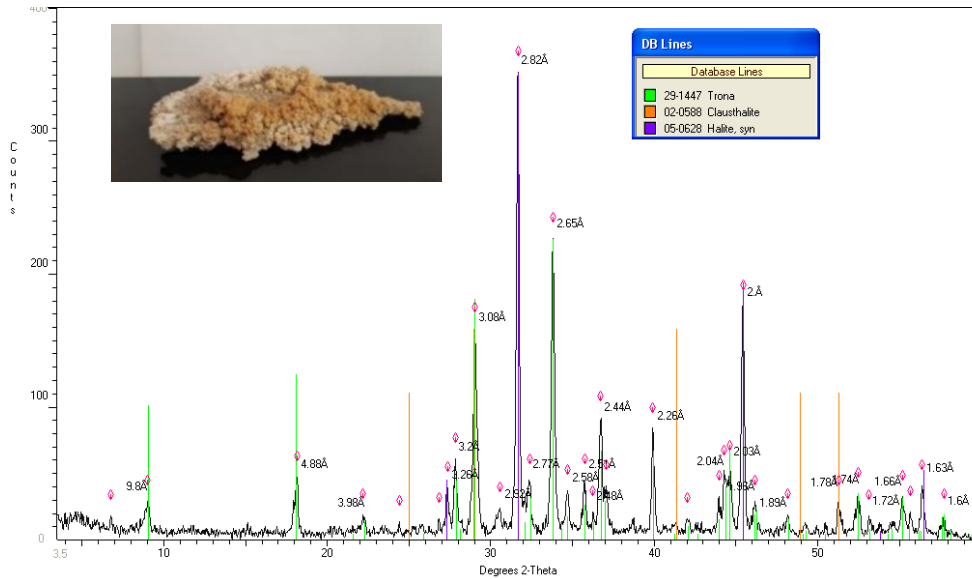


Figura 13. Difractograma de la parte “amarilla” de la primera costra salina.

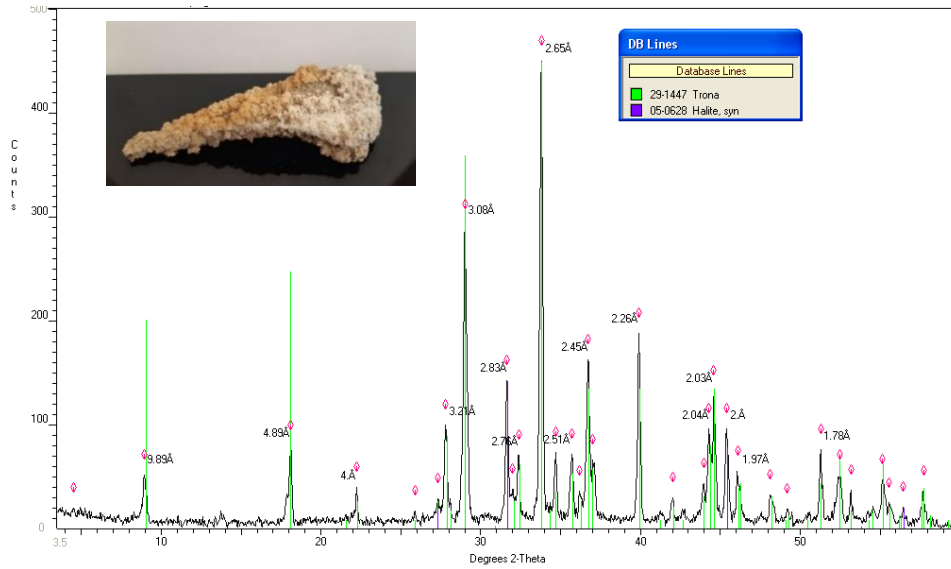


Figura 14. Difractograma de la parte "blanca" de la primera costra salina.

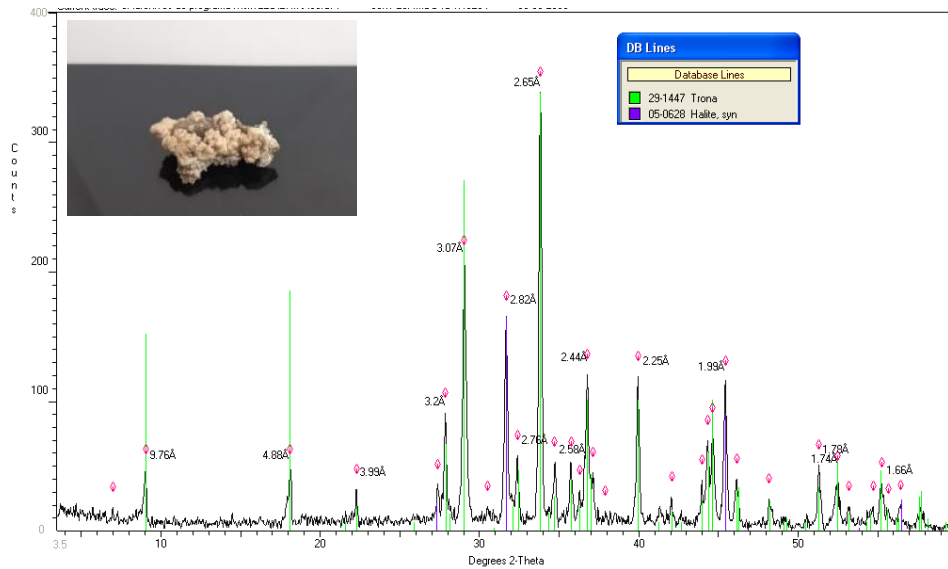


Figura 15. Difractograma de la segunda costra salina.

### 6.3.2. Análisis mineralógico de los sedimentos de Tlaixpan

El análisis de los sedimentos de esta mina está enfocado principalmente en la identificación de los minerales y los procesos de óxido-reducción que se llevan a cabo con la exposición del material al medio ambiente, así como las reacciones que generan modificaciones mineralógicas y, como consecuencia, pueden traer problemas ambientales.

Las Figuras 16 y 17 muestran algunos de los minerales identificados en las muestras de jaboncillo, donde destacan sales como la calcita, halita, polyhalita, trona, albita y halloysita, pero en general se puede indicar que la composición mineralógica de los rellenos es muy compleja

Los minerales compuestos por sulfuros y sulfosales se encontraron predominantemente en el jaboncillo de color negro que conservaban una gran cantidad de humedad (Cuadros 9, 10, 11 y 12), tales como calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), pirita ( $\text{FeS}_2$ ) y covalita ( $\text{CuS}$ ).

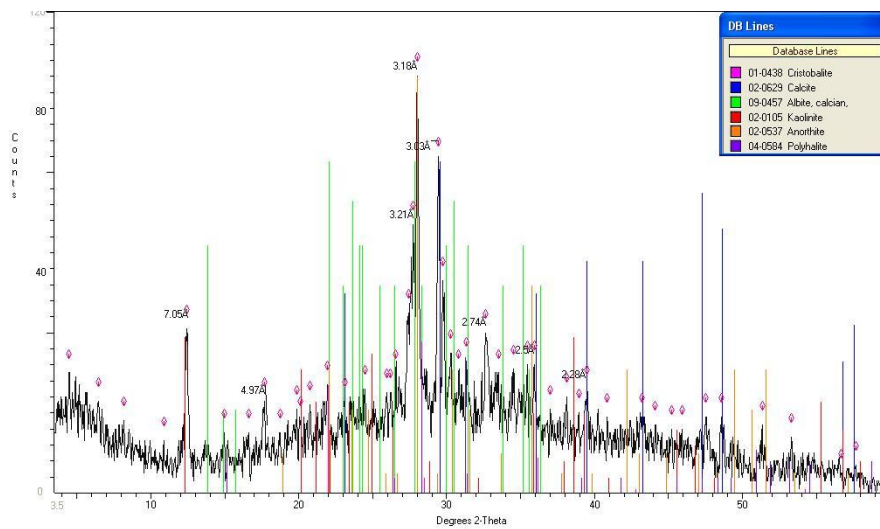


Figura 16. Difractograma del jaboncillo de Tlaixpan.

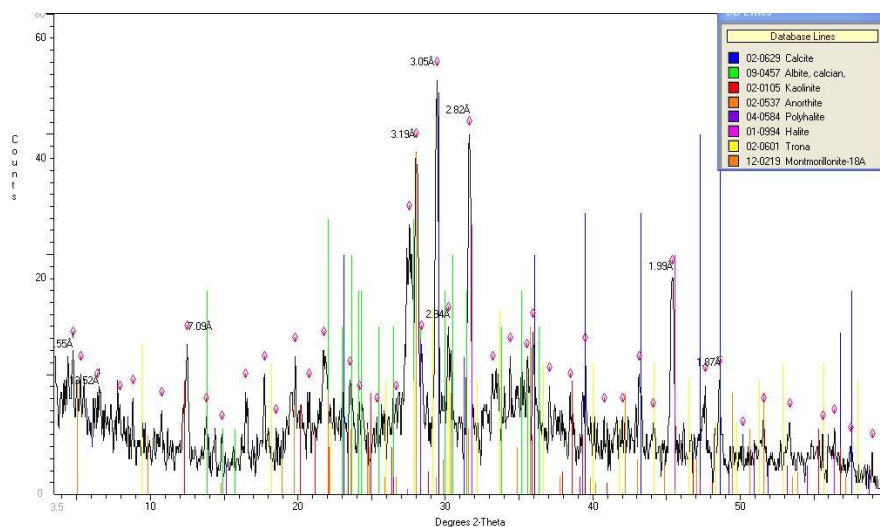


Figura 17. Difractograma del jaboncillo de Tlaixpan.

En los lagos, como es en el caso de Texcoco, la mayoría de los sulfuros son de origen sedimentario y están controlados por las condiciones de reducción y oxidación del medio (Azcárate, *et al.*, 1999). La exposición de sedimentos con este tipo de minerales provoca su oxidación, aunque la pirita, arsenopirita y calcopirita son relativamente resistentes a la oxidación en un amplio rango de valores de pH (Hinojosa, 2002). La oxidación de sulfuros tiene una importancia significativa en el impacto que causa en el medio ambiente por la generación de reacciones ácidas. El ácido generado reacciona con la sal del metal alcalino disponible y precipita en alguna especie de sulfato. Ejemplo de ello ocurre en ambientes muy reductores donde el Fe se puede combinar con el  $S^{2-}$  hasta convertirse en pirita, uno de los sulfuros más importantes. Cuando los suelos y sedimentos contienen cantidades significantes de pirita, el  $S^{2-}$  se oxida a  $SO_4^{=}$  liberando cantidades de  $H_2SO_4$  acidificando fuertemente el suelo donde los metales se hacen muy solubles (Cruz-Guzmán, 2007).

Otra de las implicaciones ambientales de la oxidación de los sulfuros de los sedimentos del lago, es que, en los sulfuros como pirita, calcopirita, galena y marcasita, el arsénico se encuentra sustituyendo al azufre en la estructura (hasta 10% en peso), al variar las condiciones del medio, puede oxidarse y liberarlo (Lillo, s.f.).

La solubilidad y estabilidad de los minerales está ligada al contenido de humedad, a la temperatura y al contenido de  $H_2O$  en el aire (Dixon, 1989). Esto ocurre por las reacciones químicas; por ejemplo, cuando un mineral pierde moléculas de agua y se transforma en otro mineral. Lo anterior explica la existencia de minerales en las muestras húmedas y, al ser secadas, la formación de nuevos minerales se presenta de forma evidente como se aprecia en los Cuadros 9, 10 y 11.

La presencia natural de minerales salinos solubles, incluidos los minerales de carbonato solubles, en el suelo requiere alta evaporación, bajas precipitaciones y un medio para concentrar las sales (Dixon, 1989). Los minerales salinos

encontrados en las muestras como halita, calcita, trona y nahcolita aparecen cuando las muestras son secadas totalmente, y muestran que los sedimentos expuestos a la desecación natural, formarán altas concentraciones de minerales salinos y, como consecuencia, un incremento en la salinidad del sedimento.

Cuadro 9. Mineralogía del jaboncillo depositado a los 8 meses en San Miguel Tlaixpan.

Relleno	Mineral	Intensidad	
		Húmedo	Seco
Jaboncillo negro	Albita ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ )	++	++++
	Anorthita ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ )	-	++++
	Calcita ( $\text{CaCO}_3$ )	++++	+++
	Eiterita ( $\text{BaCO}_3$ )	+++	-
	Magnetita ( $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4$ )	+	-
	Cristobalita ( $\text{SiO}_2$ )	-	++
	Covaline ( $\text{CuS}$ )	++	++++
	Ferrihidrita ( $(\text{Fe}^{3+})_{4-5}(\text{OH},\text{O})_{12}$ )	-	++
Halloysita	+	+	
Jaboncillo gris oscuro	Albita ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ )	-	++++
	Anorthita ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ )	++++	-
	Calcita ( $\text{CaCO}_3$ )	-	+++
	Halita ( $\text{NaCl}$ )	-	+++
	Polyhalita ( $\text{K}_2\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )	-	++++
	Hanksita ( $\text{KNa}_{22}(\text{SO}_4)_9(\text{CO}_3)_2\text{Cl}$ )	-	-
	Arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ )	-	++
	Montmorillonita ( $(\text{Na},\text{Ca})_{0.33}(\text{Al},\text{Mg})_2(\text{Si}_4\text{O}_{10})$ )	-	+++

Intensidad: ++++ muy alto, +++ alto; ++ medio, + bajo, (-) ausente.

Cuadro 10. Mineralogía del jaboncillo depositado al mes (1) en San Miguel Tlaixpan.

Muestra	Mineral	Intensidad	
		Húmedo	Seco
Jaboncillo negro	Albita ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ )	+++	++
	Calcita ( $\text{CaCO}_3$ )	++++	+++
	Halita ( $\text{NaCl}$ )	-	+++
	Esmectita ( $(\text{Na,Ca})_{0.33}(\text{Al,Mg})_2(\text{Si}_4\text{O}_{10})$ )	++	++
	Covaline ( $\text{CuS}$ )	++	++
	Glauberita ( $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2$ )	-	+
	Ferrihidrita ( $(\text{Fe}^{3+})_{4-5}(\text{OH},\text{O})_{12}$ )	-	++
	Amorfos	++	+
	Chalcosiderita ( $\text{Cu}(\text{Fe}^{3+}\cdot\text{Al})_6(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_8\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ )	-	+++
Jaboncillo negro	Albita ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ )	++	+++
	Anorthita ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ )	++	-
	Calcita ( $\text{CaCO}_3$ )	+++	++++
	Halloysisita	++	+
	Halita ( $\text{NaCl}$ )	+	+++
	Esmectita ( $(\text{Na,Ca})_{0.33}(\text{Al,Mg})_2(\text{Si}_4\text{O}_{10})$ )	+	++
Jaboncillo negro	Albita ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ )	++	++
	Calcita ( $\text{CaCO}_3$ )	++++	++++
	Halita ( $\text{NaCl}$ )	-	+++
	Esmectita ( $(\text{Na,Ca})_{0.33}(\text{Al,Mg})_2(\text{Si}_4\text{O}_{10})$ )	++	++
Jaboncillo gris muy oscuro	Albita ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ )	++++	++
	Calcita ( $\text{CaCO}_3$ )	++++	++++
	Esmectita ( $(\text{Na,Ca})_{0.33}(\text{Al,Mg})_2(\text{Si}_4\text{O}_{10})$ )	++++	++
	Fayalita magnésica	-	+



Muestra	Mineral	Intensidad	
		Húmedo	Seco
	Ferrihidrita ((Fe <sup>3+</sup> ) <sub>4.5</sub> (OH,O) <sub>12</sub> )	-	++
	Calcita (CaCO <sub>3</sub> )	++++	++++
Jaboncillo marrón oscuro rojizo	Halita (NaCl)	+	+++
	Esmectita ((Na,Ca) <sub>0.33</sub> (Al,Mg) <sub>2</sub> (Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ))	++++	++
	Glauberita (Na <sub>2</sub> Ca(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> )	+	++
	Calcita (CaCO <sub>3</sub> )	++++	++++
	Albita (NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	++	+++
Jaboncillo gris verduzco	Esmectita ((Na,Ca) <sub>0.33</sub> (Al,Mg) <sub>2</sub> (Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ))	++	+
	Glauberita (Na <sub>2</sub> Ca(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> )	+	++
	Ferrihidrita ((Fe <sup>3+</sup> ) <sub>4.5</sub> (OH,O) <sub>12</sub> )	-	+
	Halloysita	++	+++

Intensidad: +++++ muy alto, +++ alto; ++ medio, + bajo, (-) ausente.

Cuadro 11. Mineralogía del jaboncillo depositado al mes (2) en San Miguel Tlaixpan.

Muestra	Mineral	Intensidad	
		Húmedo	Seco
Jaboncillo marrón muy pálido	Calcita (CaCO <sub>3</sub> )	++++	++++
Jaboncillo gris azulado claro	Calcita (CaCO <sub>3</sub> )	++++	++++
	Albita (NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	++++	++
	Calcita (CaCO <sub>3</sub> )	++++	++
Jaboncillo negro	Halita (NaCl)	-	++++
	Anorthita Na alta (CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> )	++++	++
	Esmectita ((Na,Ca) <sub>0.33</sub> (Al,Mg) <sub>2</sub> (Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ))	++++	++
	Magnetita	-	++

Muestra	Mineral	Intensidad	
		Húmedo	Seco
	Ferrihydrita ((Fe <sup>3+</sup> ) <sub>4-5</sub> (OH,O) <sub>12</sub> )	+++	-
	Lepidocrocita (γ-Fe <sup>3+</sup> O(OH))	+++	-
	Albita cálcica	++++	++
Jaboncillo negro	Halita (NaCl)	-	+++
	Albita (NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	-	+++
	Calcita (CaCO <sub>3</sub> )	-	+++
	Chalcosiderita (Cu(Fe <sup>3+</sup> ·Al) <sub>6</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>4</sub> (OH) <sub>8</sub> ·4H <sub>2</sub> O)	-	+++
	Calcita (CaCO <sub>3</sub> )	++++	+++
Jaboncillo negro	Anorthita Na baja (CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> )	++++	++
	Halita (NaCl)	-	++++
	Calcopirita (CuFeS <sub>2</sub> )	++++	+++
	Anortita (CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> )	++++	++
	Nahcolita (NaHCO <sub>3</sub> )	-	++
	Anorthita Na intermedia (CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> )	++++	++++
Jaboncillo gris olivo	Calcita (CaCO <sub>3</sub> )	++++	++++
	Albita (NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	+++	+++
	Kaolinita (Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> )	++	++
	Halita (NaCl)	-	++++
	Pirita (FeS)	+	+
	Maghemita (Fe <sup>2+</sup> Fe <sup>3+</sup> <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	++	++

Intensidad: ++++ muy alto, +++ alto; ++ medio, + bajo, (-) ausente.

En el Cuadro 12 se observan los minerales identificados en las muestras secas de campo, donde las sales de Ca<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup> y CO<sub>3</sub><sup>-</sup> dominan en intensidad en cada sedimento, seguidas de minerales compuestos por Fe<sup>2+</sup>, Al<sup>2+</sup>, Si y arcillas.

Cuadro 12. Mineralogía del jaboncillo en seco muestreado en San Miguel Tlaixpan.

Muestra	Mineral	Fórmula	Intensidad	Ocurrencia
Pardo muy oscuro	Halita	NaCl	++++	-
	Calcita	CaCO <sub>3</sub>	++	-
	Trona	Na <sub>3</sub> (CO <sub>3</sub> )(HCO <sub>3</sub> ).2(H <sub>2</sub> O)	++	-
Gris oscuro	Albita	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	++++	-
	Halita	NaCl	+	-
	Calcita	CaCO <sub>3</sub>	+++	-
	Montmorillonita	(Na,Ca)0,3(Al,Mg)2Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> •n(H <sub>2</sub> O)	+	-
	Ilita	(K,H <sub>3</sub> O)(Al,Mg,Fe) <sub>2</sub> (Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> [(OH) <sub>2</sub> ,(H <sub>2</sub> O)]	+++	-
Blanco (sales)	Calcita	CaCO <sub>3</sub>	++	-
	Calcita	CaCO <sub>3</sub>	++++	-
Marrón muy oscuro	Arsendescloizite	PbZn(AsO <sub>4</sub> )(OH)	+++	Se produce como un mineral secundario en depósitos polimetálicos hidrotermales oxidados
	Cornubite	Cu <sub>5</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>4</sub> •(H <sub>2</sub> O)	+++	Raro mineral secundario en depósitos de cobre oxidados
	Siderita	Fe <sup>2+</sup> CO <sub>3</sub>	+	Depósitos biosedimentarios, en rocas metamórficas e ígneas

Muestra	Mineral	Fórmula	Intensidad	Ocurrencia
	Aragonite	CaCO <sub>3</sub>	+++	Componente sedimentario detrítico de las partes duras de organismos en depósitos evaporíticos
	Montmorillonita	(Na,Ca)0,3(Al,Mg) <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> •n(H <sub>2</sub> O)	++	-
	Fayalita magnésica	Fe <sup>2+</sup> SiO <sub>4</sub>	++	-
	Lepidocrosita	γ-FeO(OH)	++	Mineral común en depósitos de minerales de hierro, cobre todo cuando abunda la pirita
	Calcita	CaCO <sub>3</sub>	++++	-
	Albita Ca y baja	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	++	-
	Anortita	CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	++++	-
	Maghemita	Fe <sub>2</sub> <sup>3+</sup> O <sub>3</sub>	+++	Oxidación a baja temperatura del ion ferroso, comúnmente magnetita
Gris	Vermiculita	(Mg,Fe <sup>2+</sup> ,Al) <sub>3</sub> (Al,Si) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> •4(H <sub>2</sub> O)	++	Parece haber sido formado por la meteorización o la alteración hidrotermal de la flogopita férrica que contiene hierro
	Pirita	FeS <sub>2</sub>	+	Depósitos sedimentarios, magmáticos, metamórficos e hidrotérmicos
	Lepidocrosita	γ-FeO(OH)	++	Común en depósitos de minerales de hierro, sobre todo cuando abunda la pirita

<b>Muestra</b>	<b>Mineral</b>	<b>Fórmula</b>	<b>Intensidad</b>	<b>Ocurrencia</b>
	Calcita	CaCO <sub>3</sub>	++++	-
	Albita	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	+++	Rocas magmáticas y pegmatíticas
	Anortita	CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	+++	-
Gris verdoso	Esmectita	(Na,Ca)0.3(Al,Mg) <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> .nH <sub>2</sub> O	+++	Producto de oxidación de minerales de selenio
	Barylite	BaBe <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	+++	Pegmatitas alcalinas y cavidades miarciliticas. También en nephelene syenites y otras intrusiones alcalinas
	Augite	(Ca,Na)(Mg,Fe,Al,Ti)(Si,Al) <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	+++	Rocas ígneas y metamórficas básicas
	Halita	NaCl	++++	Depósitos de evaporita marina o continental
	Trona	Na <sub>3</sub> (CO <sub>3</sub> )(HCO <sub>3</sub> ).2(H <sub>2</sub> O)	+++	Depósitos de evaporita no marinos
Costra de sal	Fayalita magnesica	(Fe <sup>2+</sup> ) <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	+++	Depósitos hidrotérmicos asociados con otros arseniuros de cobre
	Pirita	FeS <sub>2</sub>	++	-
	Anortita	CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	++	-

Intensidad: ++++ muy alto, +++ alto; ++ medio, + bajo, (-) ausente.

## **6.4. Fase experimental**

### **6.4.1. Efecto de los mejoradores en el lixiviado colectado**

Del lixiviado obtenido de cada maceta se determinó el pH, la CE y el Na<sup>+</sup> soluble. Las medias de cada tratamiento están reportadas en el Cuadro 13, donde los resultados indican que los valores de estas propiedades van disminuyendo con los tratamientos. Para el caso de la conductividad eléctrica y la cantidad de Na<sup>+</sup> soluble se tomó como mejor tratamiento el de mayor valor, el cual indica que se extrajeron más sales y que se reflejan en los lixiviados. Los porcentajes expresados se refieren a la disminución de la salinidad.

El pH no se modifica solo con riego (tratamientos testigo AT, MT y BT) ni con la aplicación de Yeso<sub>100</sub> (AY<sub>100</sub>, MY<sub>100</sub> y BY<sub>100</sub>), y el relleno mantiene su fuerte alcalinidad (pH >9) por lo que no presenta diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ). Los valores bajos de pH, con una disminución de 6 a 8 décimas, se obtuvieron en los tratamientos con yeso con 200 t ha<sup>-1</sup> (AY<sub>200</sub>, MY<sub>200</sub> y BY<sub>200</sub>), y estiércol (AE<sub>100</sub> y AE<sub>200</sub>, ME<sub>100</sub> y ME<sub>200</sub>; y, BE<sub>100</sub> y BE<sub>200</sub>) en cualquier relación y posición de la pendiente y mostrando diferencias altamente significativas ( $p \leq 0.05$ ) con respecto a los tratamientos.

La CE y el Na<sup>+</sup> soluble de los tratamientos con estiércol (AE<sub>200</sub>, ME<sub>200</sub> y BE<sub>200</sub>) y yeso (AY<sub>200</sub>, MY<sub>200</sub> y BY<sub>200</sub>) mostraron diferencias altamente significativas ( $p \leq 0.05$ ) entre los tratamientos, lo que indica que son los que mayor cantidad de sales liberan del sedimento estudiado. Sin embargo, el tratamiento con mayor extracción de sales y que sería más económico se obtuvo con la aplicación de yeso y estiércol con 100 t ha<sup>-1</sup>, con una reducción de 76.72% de CE y de 79.62% de Na<sup>+</sup>.

Cuadro 13. Resultados de los parámetros analizados del lixiviado inicial y final del sedimento.

<b>Tratamiento</b>	<b>pHi</b>	<b>pHf</b>	<b>CEi</b>	<b>CEf</b>	<b>%</b>	<b>Nai</b>	<b>Naf</b>	<b>%</b>
			---dS m <sup>-1</sup> ---			-----mmol L <sup>-1</sup> -----		
AT	10.0	10.1	46.7	14.3	69.4	8 391.3	2 144.9*	74.4
AE100	9.4	9.1*	48.2	17.3	64.1	7 391.3	2 217.4*	70.0
AE200	9.3	9.1*	66.4	26.2*	60.5	11 594.2	3 826.1*	67.0
AM100	9.2	9.6	34.3	8.6	74.9	5 652.2	1 246.4	77.9
AM200	8.9	9.4	28.0	8.7	68.9	3 318.8	1 101.4	66.8
AY100	9.9	9.8	36.9	11.2	69.6	5 608.7	1 463.8	73.9
AY200	9.5	8.8*	60.0	15.4*	74.3	11 391.3	1 913.0*	83.2
AYM100	9.3	9.5	18.9	14.5	23.3	2 275.4	1 811.6	20.4
AYM200	9.0	9.4	17.4	9.3	46.6	2 058.0	1 246.4	39.4
MT	10.0	10.0	41.4	19.9	51.9	6 029.0	2 217.4	63.2
ME100	9.6	9.0*	56.2	22.4*	60.1	8 260.9	2 507.2*	69.6
ME200	9.4	9.1*	65.4	26.0*	60.2	9 275.4	2 985.5*	67.8
MM100	9.4	9.5	28.0	11.4	59.3	3 275.4	1 826.1	44.2
MM200	9.1	9.2	32.5	11.4	64.9	3 869.6	1 333.3	65.5
MY100	9.8	9.7	49.8	15.0	69.9	8 840.6	2 014.5*	77.2
MY200	9.5	8.9*	51.8	18.3*	64.7	9 420.3	2 318.8*	75.4
MYM100	9.5	9.6	21.2	12.3	42.0	2 289.9	1 405.8	38.6
MYM200	9.3	9.4	26.0	16.4	36.9	2 942.0	1 942.0	34.0

<b>Tratamiento</b>	<b>pHi</b>	<b>pHf</b>	<b>CEi</b>	<b>CEf</b>	<b>%</b>	<b>Nai</b>	<b>Naf</b>	<b>%</b>
BT	9.9	9.9	59.5	16.8	71.8	10 724.6	2 130.4*	80.1
BE100	9.4	8.9*	65.3	20.1*	69.2	8 840.6	2 391.3*	73.0
BE200	9.1	9.0*	61.1	27.3*	55.3	8 405.8	3 115.9*	62.9
BM100	9.2	9.4	29.4	15.3	48.0	2 695.7	1 768.1	34.4
BM200	9.0	9.2	29.4	13.6	53.7	3 029.0	1 637.7	45.9
BY100	9.7	9.4	48.3	12.2	74.7	7 826.1	1 536.2	80.4
BY200	9.4	8.6*	58.7	9.8*	83.3	9 420.3	1 802.9*	80.9
BYM100	9.4	9.5	25.0	13.5	46.0	2 434.8	1 681.2	31.0
BYM200	9.1	9.3	26.4	12.6	52.3	2 840.6	1 608.7	43.4

pHi: pH inicial; pHf: pH final; CEi: CE inicial; CEf: CE final; Nai: Nai inicial; Naf: Na<sup>+</sup> final.

Los resultados marcados con (\*) son altamente significativos comparados con los demás tratamientos, mostrando un nivel de significancia de  $p \leq 0.05$  con la prueba de Tukey.

Es importante mencionar, que los tratamientos donde se utilizó material orgánico fresco y su combinación con yeso aumentaron el valor de pH (de una a cinco décimas).

### *Comportamiento del lixiviado*

Las lecturas de pH tomadas del lixiviado (Anexo 1) a lo largo del experimento muestran, según las Figuras 19, 20 y 21, ciertos comportamientos en cada uno de los tratamientos y sus respectivas dosis. De manera general, se aprecia el contraste del efecto de la dosis más alta (200 t ha<sup>-1</sup>), al tener los valores de pH más bajos que la dosis de 100 t ha<sup>-1</sup> de cualquier mejorador. El tratamiento testigo de cada ladera tiene los valores más altos; además, ambas dosis del tratamiento de estiércol resultan con diferencias altamente significativas ( $p \leq 0.05$ ) con respecto a la dosis de 100 t ha<sup>-1</sup> de yeso (Anexo 2).



La Figura 18 muestra el lixiviado de los tratamientos de la parte baja, donde en las cinco lecturas, los valores más altos de pH se presentan en los tratamientos testigo y yeso de 100 t ha<sup>-1</sup> (BT y BY<sub>100</sub>); mientras que, BE<sub>100</sub> y BE<sub>200</sub> y BY<sub>200</sub>, mantienen los valores más bajos en todo el experimento, teniendo al BY<sub>200</sub> con diferencias altamente significativas ( $p \leq 0.05$ ), con pH de 8.6 en la lectura final. La Figura 19 de la parte media denota de igual manera al tratamiento MY<sub>200</sub> con la mayor significancia ( $p \leq 0.05$ ) del menor valor de pH (9.7); sin embargo, el ME<sub>200</sub> y ME<sub>100</sub> tienen diferencias altamente significativas ( $p \leq 0.05$ ), por tratarse de yeso. El mismo comportamiento ocurre en los tratamientos de la parte alta de la Figura 20.

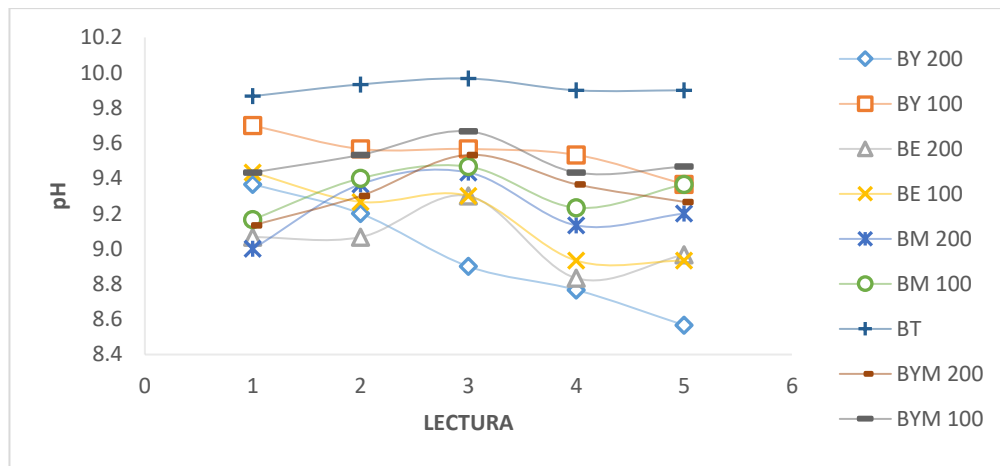


Figura 18. Comportamiento de pH del lixiviado en los tratamientos de la parte baja.

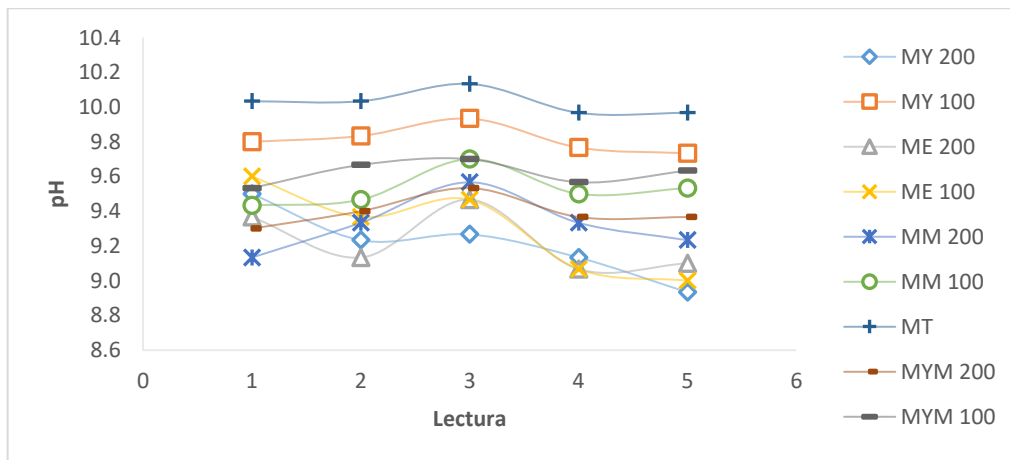


Figura 19. Comportamiento de pH del lixiviado en los tratamientos de la parte media.

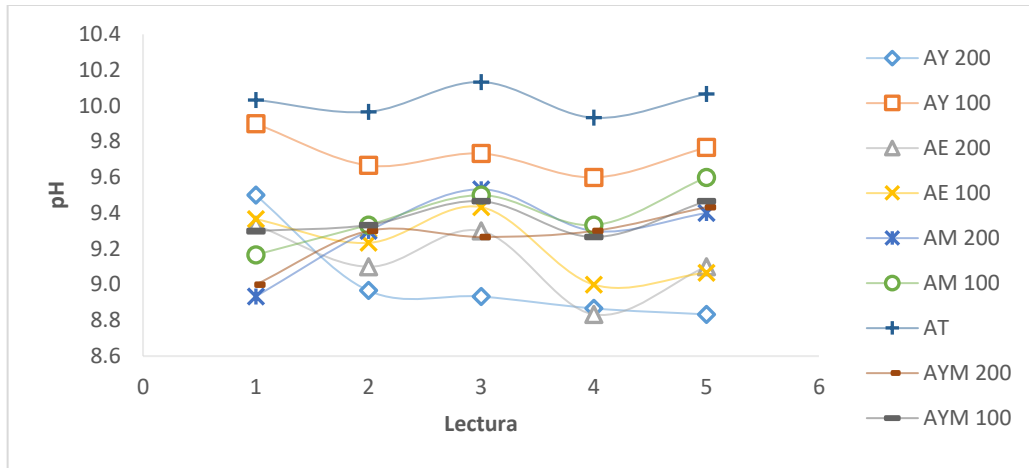


Figura 20. Comportamiento de pH del lixiviado en los tratamientos de la parte alta. La CE de los lixiviados muestreados se reporta en las Figuras 21, 22 y 23 de las laderas baja, media y alta respectivamente. Los valores tienden a disminuir drásticamente conforme avanza el experimento, con diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) en las tres zonas, a excepción de los tratamientos que contienen material orgánico fresco y la combinación de este con yeso. Diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) se encontraron en los tratamientos BY<sub>200</sub> y BE<sub>200</sub> de la ladera baja (Figura 21); en MY<sub>200</sub> y ME<sub>200</sub> en la ladera media (Figura 22) y AY<sub>200</sub> y AE<sub>200</sub> en la ladera alta (Figura 23). Estos resultados indican que el mejor tratamiento para la recuperación de los rellenos hipersalinos es la aplicación de yeso o estiércol con 200 t ha<sup>-1</sup>, no importando las condiciones de drenaje.

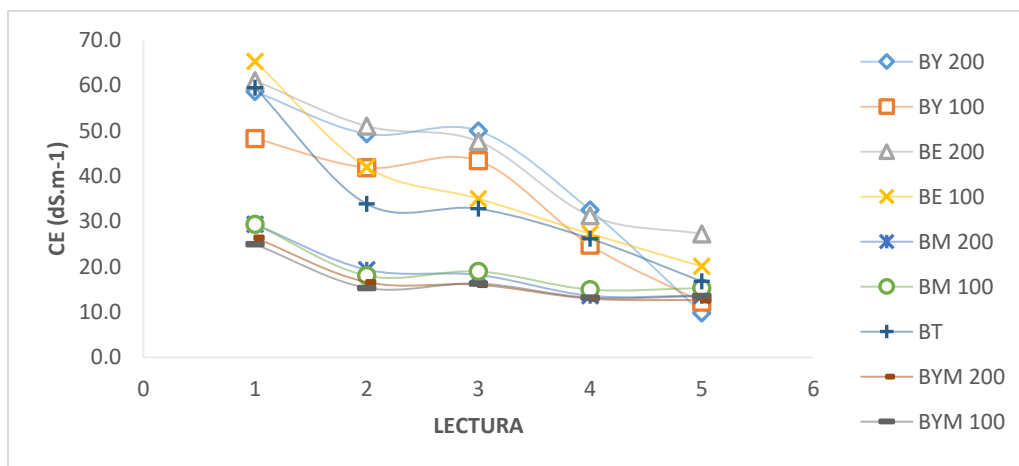


Figura 21. Comportamiento de la CE de lixiviado en los tratamientos de la parte baja.

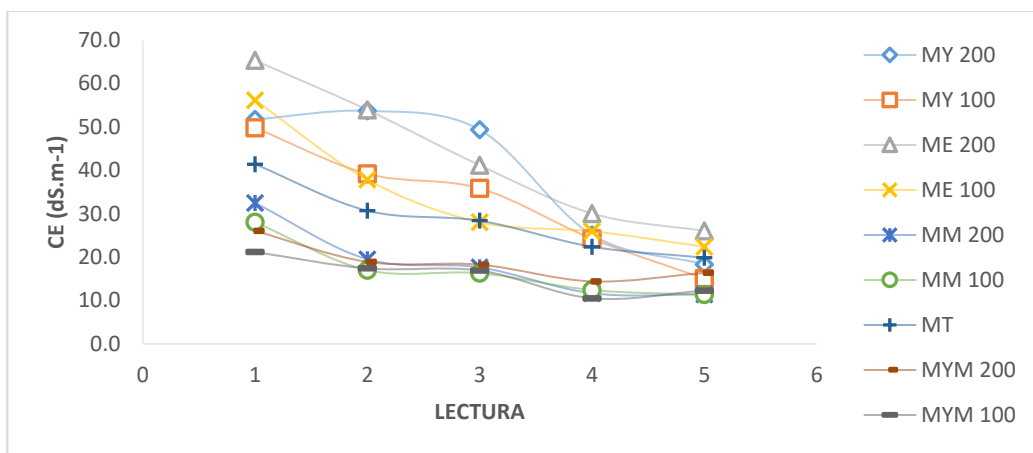


Figura 22. Comportamiento de la CE de lixiviado en los tratamientos de la parte media.

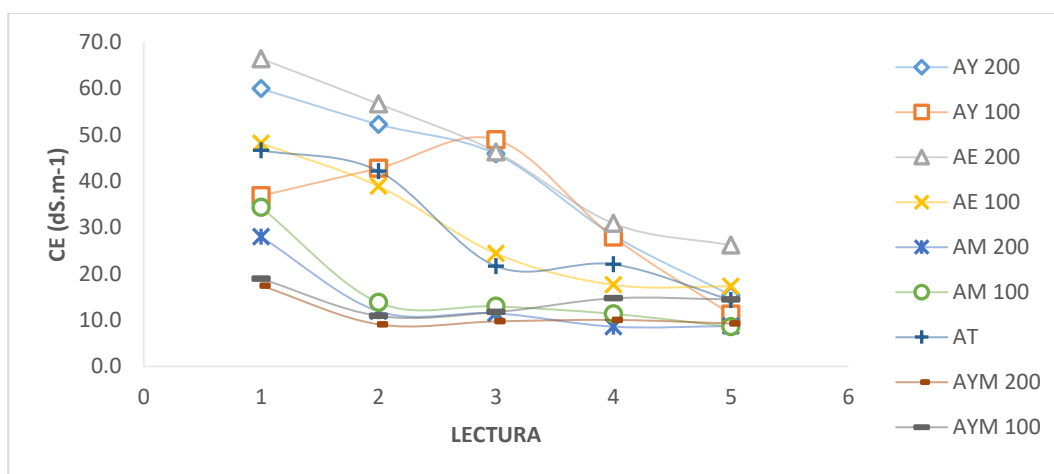


Figura 23. Comportamiento de la CE de lixiviado en los tratamientos de la parte alta.

La cantidad de  $\text{Na}^+$  soluble extraído y reflejado en los lixiviados se aprecia en la Figura 24 donde se muestra que, para las tres partes del experimento, los valores con diferencias muy significativas ( $p \leq 0.05$ ) al inicio del experimento fueron cuando se aplicó yeso y estiércol con el equivalente de  $200 \text{ t ha}^{-1}$ . No obstante, al final del experimento únicamente la aplicación de estiércol (AE<sub>100</sub>, ME<sub>100</sub> y BE<sub>100</sub>) mostró mayor significancia en la lixiviación de  $\text{Na}^+$  soluble. Por su parte, los valores más bajos de lixiviación los presentan los tratamientos de material orgánico fresco y su combinación con yeso, misma situación presentada con los parámetros de pH y conductividad eléctrica.

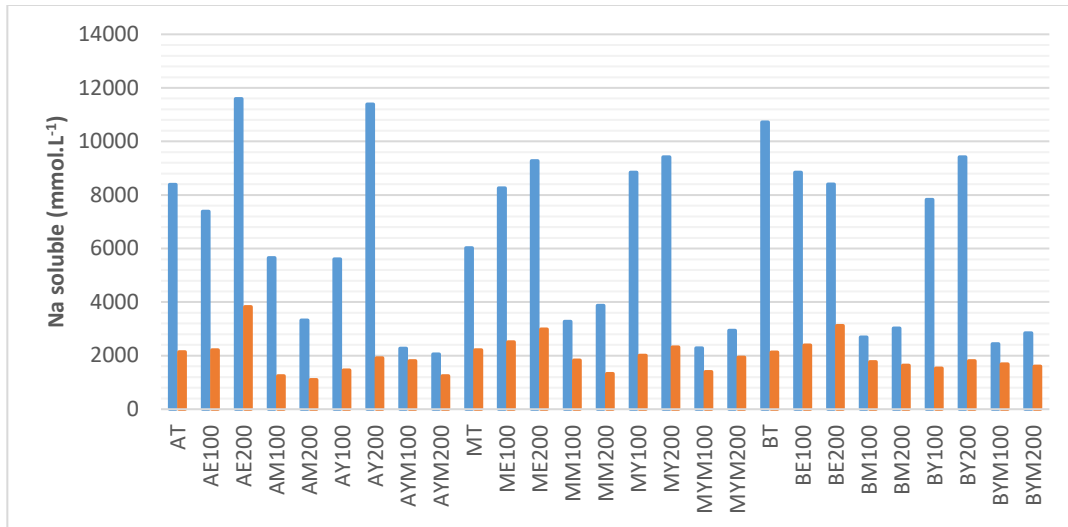


Figura 24. Comportamiento del Na<sup>+</sup> soluble en los lixiviados; la barra azul indica el contenido inicial y la barra naranja el contenido final.

#### 6.4.2. Efecto de los mejoradores en el sedimento

Después de diez rondas de riego, se compararon las muestras iniciales y finales del sedimento. En el Cuadro 14 se aprecian los valores iniciales de los parámetros estudiados en las zonas de estudio, mientras que en la Figura 25 se compara la cantidad de Na<sup>+</sup> soluble del sedimento de las tres laderas de la zona de estudio contra la cantidad que tolera la vegetación (representada por la línea punteada). El pasto salado tolera valores muy altos de alcalinidad y salinidad, pero hasta cierto límite; es decir, valores superiores de 50 dS m<sup>-1</sup> de CE y Na<sup>+</sup> soluble arriba de 12 000 mmol L<sup>-1</sup> no puede desarrollarse. El objetivo entonces es disminuir estas propiedades a través de riegos y mejoradores hasta lograr que las plantas halófitas toleren el suelo.

Cuadro 14. Valores de pH, CE y Na<sup>+</sup> soluble inicial del sedimento.

<b>Zona</b>	<b>pH</b>	<b>CE</b>	<b>Na<sup>+</sup> soluble</b>
		dS m <sup>-1</sup>	mmol L <sup>-1</sup>
Alta	9.6	58.8	23 043.48
Media	9.4	61.1	22 173.91
Baja	9.6	65.3	20 869.57
Vegetación	9.6	48.1	11 739.13

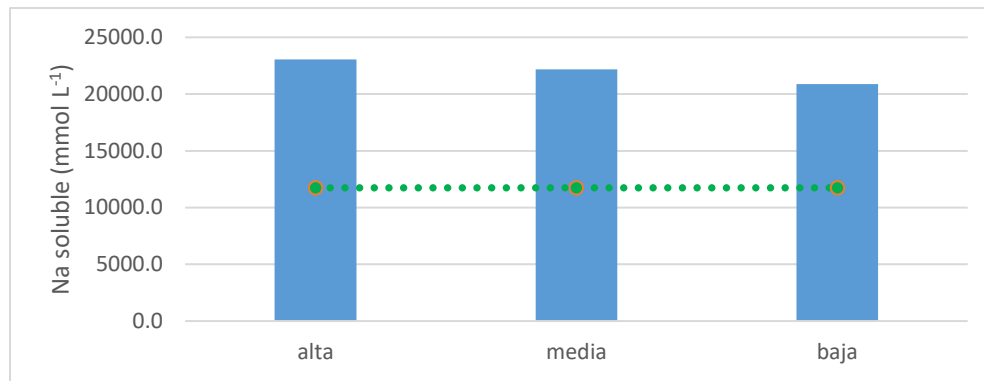


Figura 25. Cantidad de Na<sup>+</sup> soluble inicial del sedimento de las partes alta, media y baja contra el valor del sedimento con vegetación (línea punteada).

En el Cuadro 15 se reportan los valores de pH, CE y contenido de Na<sup>+</sup> soluble disminuyeron en general, y muestran la desalinización en la simulación; además de la CIC y el PSI, parámetros importantes en la clasificación de los suelos salinos y sódicos. En teoría, todos los tratamientos disminuyeron drásticamente la salinidad y sodicidad. A continuación, se analiza cada tratamiento.

Cuadro 15. Resultado de los mejoradores sobre el sedimento.

<b>Tratamiento</b>	<b>pH</b>	<b>CE</b>	<b>Na<sup>+</sup> soluble</b>	<b>CIC</b>	<b>PSI</b>
		dS m <sup>-1</sup>	mmol L <sup>-1</sup>		%
AT	9.6	3.3	7.13	68.71	55.8
AE <sub>100</sub>	9.2*	1.5	6.21	60.67	35.9
AE <sub>200</sub>	9.0*	3.2	5.98	35.41	108.2
AM <sub>100</sub>	9.5	1.7	4.60	67.95	69.1
AM <sub>200</sub>	9.5	2.2	21.16	60.48	81.2
AY <sub>100</sub>	9.1*	5.7	8.97	62.78	74.8
AY <sub>200</sub>	8.2*	3.5	5.75	41.15	198.2*
AYM <sub>100</sub>	9.6	2.8	12.19	66.42	106.5
AYM <sub>200</sub>	9.5	3.0	5.06	59.72	118.5
MT	9.5	1.0	2.30	61.25	129.6
ME <sub>100</sub>	9.4	2.1	7.36	48.62	65.5
ME <sub>200</sub>	9.3*	3.1	17.48	58.76	102.0
MM <sub>100</sub>	9.7	0.9	3.68	48.42	52.3
MM <sub>200</sub>	9.6	1.3	4.37	56.46	106.2
MY <sub>100</sub>	9.0*	3.3	10.35	42.87	99.5
MY <sub>200</sub>	8.3*	4.2	11.50	37.32	201.2*
MYM <sub>100</sub>	9.8	1.3	2.99	40.00	182.3
MYM <sub>200</sub>	9.7	1.2	3.22	61.25	150.8
BT	9.4	0.5	174.80	55.70	130.9

<b>Tratamiento</b>	<b>pH</b>	<b>CE</b>	<b>Na<sup>+</sup> soluble</b>	<b>CIC</b>	<b>PSI</b>
BE <sub>100</sub>	9.3	2.4	13.57	54.55	38.3
BE <sub>200</sub>	9.2*	3.2	16.33	44.79	148.3
BM <sub>100</sub>	9.5	0.9	3.22	54.36	118.2
BM <sub>200</sub>	9.2	1.0	5.75	48.23	133.2
BY <sub>100</sub>	9.3	2.0	5.98	43.07	174.3
BY <sub>200</sub>	8.4*	4.1	11.50	30.43	175.6*
BYM <sub>100</sub>	9.3	1.2	19.55	50.34	127.7
BYM <sub>200</sub>	9.2	3.0	4.37	44.02	170.5

Los resultados marcados con (\*) son altamente significativos comparados con los demás tratamientos, mostrando un nivel de significancia de  $p \leq 0.05$  con la prueba de Tukey.

#### *Efecto del yeso en el sedimento*

Cuando se aplica yeso en la recuperación de suelos salino-sódicos, se debe acompañar con drenaje y a veces también con la aplicación de riegos excesivos, tal como ocurrió en este estudio. El sodio reemplaza al calcio proveniente del yeso junto con el exceso de sales solubles, y debe removerse con riego y drenaje de la zona radical para lograr su recuperación (Abrol *et al.*, 1988). La aplicación de yeso es el método de recuperación más rápido y químicamente más estable, y que se demuestra con los resultados obtenidos.

En el caso del pH, el tratamiento de yeso, para las tres zonas de estudio, tuvo diferencias altamente significativas ( $p \leq 0.05$ ) entre los tratamientos. El pH disminuyó casi dos unidades, de 9.6, 9.4 y 9.6 a 8.2, 8.3 y 8.4 en la ladera alta, media y baja respectivamente; además, la CE es muy baja y se clasifica como no salino ( $<4 \text{ dS m}^{-1}$ ). Estos valores indican que las especies vegetales y halófitas se pueden desarrollar de mejor manera en los rellenos, sobre todo si la dosis es de  $200 \text{ t ha}^{-1}$ . Con referente al contenido final de  $\text{Na}^+$  soluble, éste es muy variable

en todos los tratamientos y los de yeso no forman parte de los valores mínimos reportados.

#### *Efecto del estiércol en el sedimento*

Manzano *et al.* (2014) utilizaron estiércol bovino como mejorador de un suelo salino y encontraron que la CE aumentó por el contenido de sales en el material. Así mismo, se toma en cuenta que la aplicación de estiércol genera mejoras en la estructura de los suelos, hay aumento de la porosidad y, por lo tanto, drenaje.

Lo anterior se refleja con los resultados obtenidos donde el pH registra diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ), contra los tratamientos testigo y de material orgánico fresco y su combinación con yeso para la parte alta y media para ambas dosis de estiércol. La CE de la dosis de 200 t ha<sup>-1</sup> es mayor que la dosis de 100 t ha<sup>-1</sup> (alrededor de una unidad) y coincide con lo citado anteriormente donde el contenido de sales de estiércol es mayor. La diferencia significativa se da en la dosis de 200 t ha<sup>-1</sup> contra los demás tratamientos a excepción del yeso. En cuanto al contenido de Na<sup>+</sup> soluble, éste es muy variable y presenta valores abajo del promedio de cada zona.

Además, se encontraron lombrices en el material final del tratamiento con estiércol de dosis 200 t ha<sup>-1</sup>, lo que es una evidencia de la baja salinidad y sodicidad del sedimento. El pH del suelo o sustrato es un factor determinante en la presencia o ausencia de las lombrices (Garrido-García, 2014). Este debe estar en un rango de 5.5 – 8.0; sin embargo, los tratamientos donde se encontraron las lombrices presentan un pH de 9.0, 9.3 y 9.2 en las laderas alta, media y baja respectivamente. Al respecto, se ha reportado que un pH superior a 9.5 del sustrato afecta negativamente el desarrollo, reproducción actividad de las lombrices (Reines *et al.*, 2004), lo que sugiere que el sedimento se encuentra en los límites óptimos para el desarrollo de la lombriz. A pesar de tener tratamientos con valores de pH menores, no se encontró microfauna, posiblemente por el contenido de nutrientes presentes en el estiércol, además de



la estructura final adquirida del sedimento y el contenido de humedad que conserva.



Figura 26. Lombrices en los tratamientos de estiércol con dosis de 200 t ha<sup>-1</sup>.

#### *Efecto del material orgánico fresco en el sedimento*

Otero *et al.* (2006) reportaron resultados favorables en el pH en relación con la aplicación de enmiendas orgánicas en suelos salinos y sódicos. En este estudio no fue el caso para la disminución del pH, pero si para la CE y el Na<sup>+</sup> soluble; aunque con valores menos significativos que el resto de los tratamientos como ya se mencionó. La adición de materia orgánica tiene un efecto acidificante en los suelos, como resultado de la actividad de los microorganismos en el proceso de descomposición, teniendo como consecuencia la liberación de dióxido de carbono y otros gases (Stewart *et al.*, 2000; Gasca *et al.*, 2011). No obstante, los resultados arrojan un aumento en el pH de la zona media de 9.4 a 9.7 y 9.6 para la dosis 100 t ha<sup>-1</sup> y 200 t ha<sup>-1</sup> respectivamente. La estructura masiva del sedimento y la poca porosidad limita la actividad biológica y con ello la descomposición adecuada de la materia orgánica. La CE es variable en las tres zonas, pero dominan los valores menores a los 4 dS.m<sup>-1</sup> que los clasifica como no salinos.

### *Efecto de los mejoradores en el PSI*

Gupta *et al.* (1984) estudiaron el efecto de los materiales orgánicos en el comportamiento de dispersión de los suelos e infirieron que con un PSI alto, el papel de la materia orgánica en la mejora de las propiedades físicas del suelo era algo cuestionable. Sin embargo, cuando se aplica junto con enmiendas inorgánicas o cuando se aplica en suelos de sodicidad ligera, los materiales orgánicos siempre han demostrado ser beneficiosos y, por lo tanto, su uso en la recuperación de suelos sódicos ocupa un lugar importante. En el caso de los rellenos de las minas, presentan una cantidad excesiva de sales sobre todo el  $\text{Na}^+$  en los sitios de intercambio, de ahí que el PSI mantenga valores de 35% a 200% aún con la aplicación de yeso con dosis de  $200 \text{ t ha}^{-1}$  y con diferencias altamente significativas ( $p \leq 0.05$ ) con respecto a los otros tratamientos. El PSI de los tratamientos con material orgánico muestra los valores menores de entre todos los tratamientos, explicado por la acción de los iones contenidos en el material orgánico, suficientes para desplazar el  $\text{Na}^+$  de los sitios de intercambio del suelo según Gasca *et al.* (2011).

### *Efecto de los mejoradores en la CIC*

Los tratamientos que contienen materia orgánica tienen valores altos de CIC. Al respecto, Liang *et al.* (2005) mencionan que la mineralización de la materia orgánica incrementa los compuestos aromáticos, los cuales no pueden ser adsorbidos en las superficies de los minerales aumentando la superficie específica del suelo. Este proceso se ve reflejado en una mayor CIC y mejores condiciones para la agregación de las partículas (Gasca *et al.*, 2011).

Un denominador común a los trabajos anteriormente citados que muestran resultados positivos es la aplicación de riego, que permite la lixiviación del sodio intercambiado por el calcio y el exceso de sales solubles, lográndose de esta manera la recuperación (Abrol *et al.*, 1988). Manzano *et al.* (2014) estudiaron un suelo de salinidad alta (CE de  $22.2 \text{ dS m}^{-1}$ ) y pH medianamente alcalino de 8 y concluyen que el uso de mejoradores resulta innecesario para la rehabilitación

de los suelos salino-sódicos se puede lograr únicamente con la aplicación de lavado.

Los resultados en la presente investigación muestran que solo con el uso de riego (tratamiento testigo) se obtiene una disminución considerable en la CE y en contenido de Na<sup>+</sup> soluble en el sedimento, en comparación con el inicial. No obstante, la cantidad excesiva de sales solubles en el sedimento estudiado demostró que se necesitan mejoradores para disminuir el pH, la CE y los excesos de Na<sup>+</sup> soluble.

Una contribución importante es la de Wang *et. al.* (2017) donde simularon la desalinización en una columna de suelo salino-alcalino y midieron las sales en cada capa de la columna. Los resultados encontrados indican que la salinidad disminuyó en la capa superior y ésta migró hacia las capas inferiores. Esto se puede considerar aplicable en la zona de estudio con el drenaje horizontal (debido a la pendiente) para así dejar libre de sales la capa superficial y recuperar el espacio con vegetación halófitas.

#### **6.4.3. Indicador biológico**

Como resultado de la disminución de la salinidad, el crecimiento de especies vegetales halófitas en los tratamientos fue favorable. En el Cuadro 10 se muestra la vegetación desarrollada, así como su densidad (número de plantas por maceta) y la altura alcanzada. En menor cantidad se desarrolló *Portulaca oleracea*.

El tiempo de germinación de las semillas fue de 15 a 20 días (de 23 de junio a 6 de julio de 2021 para cebada y del 23 de junio al 14 de julio de 2021 para romerito, betabel y rodadora). A partir de que germinaron las semillas, las plantas se mantuvieron con la lluvia de la temporada (del 14 de julio al 23 de septiembre de 2021).

En los tratamientos de Y<sub>200</sub> y Y<sub>100</sub>, en las tres partes del área de estudio, germinó y desarrolló con éxito la cebada llegando incluso a rellenar grano (Figura 26), siendo la especie más susceptible a la salinidad de las utilizadas en este

experimento. Lo mismo se observa en el tratamiento AE<sub>200</sub> donde, de manera general, en la parte alta de la zona se tienen los valores más bajos de los parámetros estudiados y que, por la pendiente, existe vegetación en el lugar (Figura 27).

El cultivo de cebada (*Hordeum vulgare* L.) tolera la salinidad, pero no los suelos encharcados y arcillosos. La cebada se puede desarrollar en suelos poco profundos, pedregosos y bien drenados con pH de 6 a 8.5 (SAGARPA, 2017).

El cultivo de remolacha azucarera, o betabel (*Beta vulgaris*), es tolerante a la salinidad, pero durante sus primeras etapas de crecimiento (germinación y hasta la formación de corona) le afecta drásticamente, causándole la muerte. Para contrarrestar el problema se sugiere dar riegos pesados para bajar los niveles de salinidad. Valdivia *et al.* (2010) reportaron que un suelo con conductividad eléctrica de 19.32 dSm<sup>-1</sup> y pH de 6.5 a 8, genera buenos rendimientos de remolacha azucarera (SAGARPA, 2011).

La succulencia es una característica frecuente en las plantas halófitas; por ejemplo, el romerito (*Suaeda nigra*) resiste a muy elevadas concentraciones de sales y alta alcalinidad (Noguez-Hernández *et al.*, 2019). Dadas esas características, el romerito proliferó en todos los tratamientos adaptándose a los niveles finales de salinidad del sedimento, lo que da buenos indicios para formar suelo y para la recuperación del lugar.

Otra especie desarrollada fue la rodadora o coquia (*Kochia scoparia*), la cual se distingue por crecer en suelos salinos y alcalinos, así como en climas áridos y es recomendada para revegetar o reforestar las zonas áridas y semiáridas de México (Benítez, 2009). Además, es utilizada como forraje para borregos y bovinos de carne.

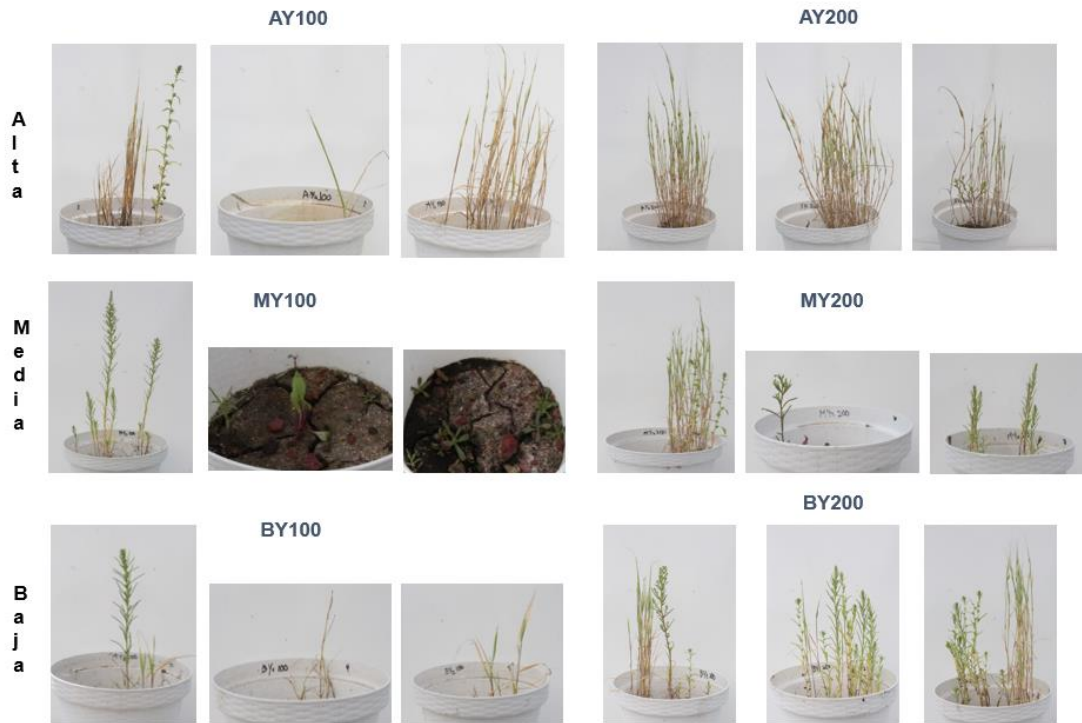


Figura 27. Tratamientos con yeso.



Figura 28. Tratamientos con estiércol.

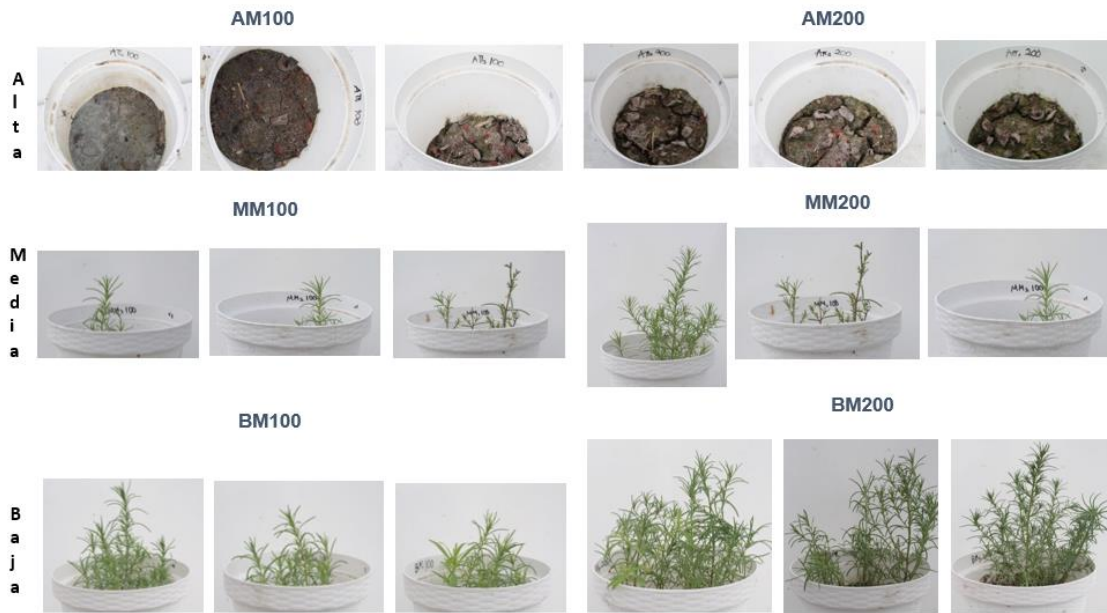


Figura 29. Tratamientos con material orgánico.



Figura 30. Tratamientos con material orgánico y yeso.

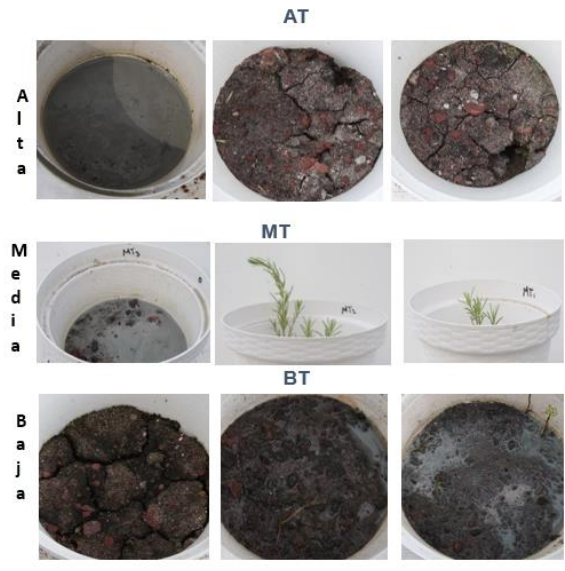


Figura 31. Tratamientos testigo.

Cuadro 16. Indicadores biológicos

	LADERA ALTA			LADERA MEDIA			LADERA BAJA		
	Especie vegetal	Altura cm	Densidad de planta	Especie vegetal	Altura cm	Densidad de planta	Especie vegetal	Altura cm	Densidad de planta
Y <sub>200</sub>	<i>H. vulgaris</i>	25-40	41	<i>H. vulgaris</i>	20-35	23	<i>H. vulgaris</i>	20-44	63
	<i>S. nigra</i>	27	16	<i>B. vulgaris</i>	3-6	6	<i>S. nigra</i>	15	1
	<i>Kochia scoparia</i>	24	31	<i>Kochia scoparia</i>	15-25	7	<i>B. vulgaris</i>	3	18
Y <sub>100</sub>	<i>H. vulgaris</i>	20	5	<i>H. vulgaris</i>	10	1	<i>H. vulgaris</i>	13-32	58
	<i>Kochia scoparia</i>	30-40	10	<i>Kochia scoparia</i>	10-25	6	<i>Kochia scoparia</i>	27	1
E <sub>200</sub>	<i>S. nigra</i>	18	10	<i>S. nigra</i>	4-25	62	<i>H. vulgaris</i>	14	2
	<i>B. vulgaris</i>	5	4	<i>B. vulgaris</i>	5-8	8	Otra hierba	2	1
				<i>Kochia scoparia</i>	7-11	8			
E <sub>100</sub>	<i>S. nigra</i>	15-30	48	<i>S. nigra</i>	5-30	26	<i>S. nigra</i>	11	1
	<i>Kochia scoparia</i>	15-35	2	<i>B. vulgaris</i>	2-4	8	<i>B. vulgaris</i>	2-5	11
				<i>Kochia scoparia</i>	5	6	Herbácea	2	1
M <sub>200</sub>	<i>S. nigra</i>	10-27	22	<i>S. nigra</i>	10-25	9	-	-	-



LADERA ALTA				LADERA MEDIA			LADERA BAJA		
	Especie vegetal	Altura	Densidad de planta	Especie vegetal	Altura	Densidad de planta	Especie vegetal	Altura	Densidad de planta
M <sub>200</sub>	<i>Kochia scoparia</i>	11	1	<i>S. torreyana</i>	10-15	4	-	-	-
M <sub>100</sub>	<i>S. nigra</i>	8-15	23	<i>S. nigra</i>	10	2	-	-	-
	<i>Kochia scoparia</i>	7	1	<i>S. torreyana</i>	8-15	6	-	-	-
YM <sub>200</sub>	<i>S. nigra</i>	5	12	<i>S. nigra</i>	10-18	11	-	-	-
	<i>B. vulgaris</i>	4-6	2	<i>B. vulgaris</i>	4	2	<i>B. vulgaris</i>	4	2
	Verdolaga	-	2	<i>Kochia scoparia</i>	2	1	Otra hierba	8	2
				Verdolaga	-	1			
YM <sub>100</sub>	<i>S. nigra</i>	15-24	3						
	<i>B. vulgaris</i>	9	2	<i>S. nigra</i>	5-15	16	-	-	-
	<i>S. torreyana</i>	9-13	3						
T	-	-		<i>S. nigra</i>	3-18	11	-	-	-

## VII. CONCLUSION GENERAL

Considerando el tiempo transcurrido desde la deposición de los sedimentos hasta las fechas de muestreo, las propiedades físicas y químicas no han variado considerablemente en comparación con lo reportado en la zona del ex Lago de Texcoco.

El espacio físico donde son depositados este tipo de sedimentos lacustres influye directamente en la evolución/transformación física, química y mineralógica del material, ya que se ven afectados por factores como la pendiente y el drenaje para conservar o no la humedad.

La mineralogía se vio afectada por el contenido de humedad de los sedimentos. Sales como la halita y trona se forman cuando disminuye la humedad o el sedimento se seca en su totalidad. En las minas estudiadas se puede observar la formación de costras salinas con la estacionalidad.

A pesar de que los sedimentos depositados en las minas de estudio son del mismo origen, la forma y lugar de deposición hace que presenten características distintas. Debido al tiempo de muestreo, la mineralogía de los sedimentos presenta variaciones en el contenido de compuestos de azufre y metales.

Los sedimentos de San Miguel Tlaixpan se depositaron en forma de montículos en una mina abierta y de gran extensión, donde el drenaje favorece su secamiento natural. Estos sedimentos fueron muestreados en un tiempo máximo de ocho meses después de que se extrajeron de su medio natural, por lo que sus propiedades físicas, químicas y mineralógicas no son muy diferentes a las reportadas en la zona del ex Lago de Texcoco. Estos sedimentos se caracterizaron por presentar minerales compuestos por sulfuros y sulfosales en el jaboncillo de color negro que conservaban gran cantidad de humedad natural. En este caso, el mineral de mayor importancia es la pirita en donde el  $S^{2-}$  se oxida a  $SO_4^{=}$ , se liberan cantidades de  $H_2SO_4$ , con ello el suelo se acidifica fuertemente y los metales contenidos en el sedimento se hacen muy solubles.

Esta reacción puede provocar filtración hacia el agua subterránea y, por ende, una fuerte contaminación de los mantos acuíferos de la zona (zona de recarga). Otro problema derivado de los sulfuros es el del H<sub>2</sub>S (ácido sulfhídrico) y su característico hedor a huevo podrido, lo que se reduce en contaminación olfativa para las comunidades aledañas. Lo anterior sin descartar el alto contenido de sales que se forman cuando los sedimentos se secan.

En la mina de San Nicolás Tlaminca, al ser una mina cerrada y de poca superficie, los rellenos se depositaron en forma concoidal debido a la viscosidad y pendiente del terreno. En este caso, no existe drenaje que permita la circulación del agua, y se generan condiciones de óxido-reducción (reflejadas en la profundidad del material) y salinidad. En la ladera alta, la salinidad fue menor (baja CE) con respecto a la ladera baja (mayor CE). Al existir mayor humedad en la ladera baja, se conservan las condiciones naturales de reducción del material mientras que en la ladera alta ya hubo oxidación de los minerales.

Debido a la composición química de los sedimentos, las sales más comunes encontradas en los análisis mineralógicos fueron halita y trona, que se caracterizan por presentar una alta solubilidad. La cantidad excesiva de sales en los suelos limita en gran manera el crecimiento adecuado de la vegetación.

Se rechaza la hipótesis de la presencia de jarosita y yeso en ambientes oxidantes o con pH neutros; la presencia de ferrihydrita fue común en el jaboncillo negro.

Con el objetivo de identificar química, física y mineralógicamente el sedimento para su posterior tratamiento y recuperación ambiental, el experimento realizado con la aplicación de mejoradores de suelo dio buenos resultados en cuanto a la disminución de la salinidad.

La aplicación de riegos y mejoradores de suelo a los sedimentos lacustres depositados en los socavones de minas del municipio de Texcoco tratados en macetas, disminuyó la salinidad y sodicidad hasta niveles adecuados para el desarrollo de vegetación, como ocurrió con romero (*Suaeda edulis*), pasto salado

(*Distichlis spicata* (L.) green), rodadora (*Kochia scoparia* (L.)), cebada (*Hordeum vulgare*) y betabel (*Beta vulgaris*). Se redujo el contenido de sodio soluble y sodio intercambiable, lo que disminuyó la CE hasta clasificar los sedimentos como no salinos.

Los tratamientos E<sub>200</sub> y Y<sub>200</sub>, son los que se pueden recomendar para mejorar la condición de sodicidad de los sedimentos. Sin embargo, la aplicación de estiércol, al ser de bajo costo, puede ser útil para la remediación del sedimento, dado que mejoraron las propiedades físicas, como la estructura, aumento de porosidad, permeabilidad y por lo tanto drenaje, que favorece la lixiviación de las sales.

## **VIII. RECOMENDACIONES**

Para lograr la recuperación de los sitios donde fueron depositados los sedimentos lacustres extraídos en la construcción del NAICM en las zonas aledañas, principalmente las minas de Texcoco, se necesita conocer el estado físico, químico y mineralógico actual de este material, así como las características del sitio para determinar la forma en que se va a actuar. La estabilización química del sedimento es importante en el sentido de prevenir la oxidación o reducción de los minerales que pueden traer problemas ambientales serios.

Como ya se comprobó en este estudio, es posible disminuir la salinidad y sodicidad del sedimento para que permita el desarrollo de especies vegetales y con el tiempo formar suelo; por lo que se recomienda la aplicación de estiércol para mejorar la estructura y con ello el drenaje lo que permitirá el lavado de las sales en la temporada de lluvias.

En zonas donde no exista drenaje o este sea difícil por la condición geográfica del lugar, como el socavón de San Nicolás Tlaminca, se recomienda la nivelación del terreno. Esto con el fin de aprovechar la composición química del material y la humedad que forma costras salinas conocidas como tequesquite, que son de consumo humano.

## IX. LITERATURA CITADA

- Abrol I.P., Yadav J.S.P., Massoud F.I. (1988). Salt affected soils and their management. *FAO Soils Bulletin* 39. 119 p.
- Abd-Elwahid M., (2018). Influence of long-term wastewater irrigation on soil quality and its spatial distribution. *Annals of Agricultural Sciences*, 63:191-199.
- Aceves N., E. (2011). El ensalitramiento de los suelos bajo riego. Fundación Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas A.C. México, D. F.
- Alexander, G. B., Heston, W. M. & Iler, R. K. (1954). The solubility of amorphous silica in water. *J. Phys. Chem.* 58, 453-455.
- Ashraf, M. Y., Ashraf, M., Mahmood, K., Akhter, J., Hussain, F. & Arshad, M. (2010). Phytoremediation of saline soils for sustainable agricultural productivity. In *Plant Adaptation and Phytoremediation* (pp. 335-355). Springer Netherlands.
- Ashraf, M., Athar, H. R., Harris, P. J. C., & Kwon, T. R. (2008). Some prospective strategies for improving crop salt tolerance. *Advances in Agronomy*, 97, 45-110.
- Azcárate, A. J., Rodas, M., Bottrel, H., Raiswell, R., Velasco, F. & Mas, J.R. (1999). Pathways and distances of fluid flow during low-grade metamorphism: evidence from pyrite deposits of the Cameros Basin, Spain. *J. Metam. Geol.* 17: 339-348.
- Balderas, P. C. A., Gutiérrez, C. Ma del C., Carrillo, G. R., Ortiz, S. C. A. & Lugo de la fuente, J.A. (2006). Distribución de elementos traza en los suelos de la microcuenca en Texcoco. *Terra Latinoamericana* 24: 451-461.
- Barkla, B., Vera, R., Balderas, E., & Pantoja, O. (2008). Mecanismos de tolerancia a la salinidad en plantas. Una ventana al quehacer científico. México, DF: Instituto de Biotecnología, UNAM, 263-272.
- Benítez, V. S. (2009). Coquia (*Kochia scoparia*). Proyecto PAPIME PE205907. FESC UNAM, Cuautitlán.
- Bohn, L.; McNeal, L.; O'Connor, A. (1993). Química del suelo. Editorial Limusa. México, D.F.
- Bui, E. N. (2013). Soil salinity: a neglected factor in plant ecology and biogeography. *Journal of Arid Environments*, 92, 14-25.
- Camargo-Hernández, A. (2010). Estudio multiescalar de la formación de costras salinas sobre sedimentos amorfos silíceos lacustres. Tesis de doctorado, Programa de Edafología, Colegio de Postgraduados. México.

- Carranza-Edwards A. (2018). Correlación litológica del subsuelo del lago de Texcoco. *Hidrobiológica* 28 (1): 93-101.
- Cominelli, E., Conti, L., Tonelli, C. & Galbiati, M. (2013). Challenges and perspectives to improve crop drought and salinity tolerance. *New Biotechnol* 30, 355–361.
- Comisión Nacional del Agua (CNA) –SEMARNAT. (2007). Proyecto Lago de Texcoco, Rescate 407 Hidroecológico. OCAVAM. México, D. F., pp. 140.
- CONACYT-CP. (2021). Levantamientos de suelos: Contribución al proyecto prioritario del ex lago de Texcoco. Montecillo, Texcoco, estado de México.
- Coras-Merino, P. M., Ontiveros-Capurata, R. & Diakite-Diakite, L. (2014). Groundwater flow and concentration of salts in agricultural soils. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 4: 537-548
- Cruz-Guzmán, A. M. (2007). La contaminación de suelos y aguas. Su prevención con nuevas sustancias naturales. Universidad de Sevilla, España. 243 p.
- Dendooven, L., Alcántara-Hernández, R. J., Valenzuela-Encinas, C., Luna-Guido, M., Perez-Guevara, F., & Marsch, R. (2010). Dynamics of carbon and nitrogen in an extreme alkaline saline soil: A review. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(6), 865–877. doi:10.1016/j.soilbio.2010.02.014
- DETENAL. (1976). Carta topográfica.
- Dixon, J. B., Weed, S. B., Doner, H. E., & Lynn, W. C. (1989). Carbonate, Halide, Sulfate, and Sulfide Minerals. *Minerals in Soil Environments*. Chapter 6, pp 279-330. doi:10.2136/sssabookser1.2ed.c6
- FAO, (1988). Salt-affected soils and their management. *Soils Bulletin* 39, Rome: FAO.
- FAO, (2021). Propiedades Físicas. Portal de Suelos de la FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. [online] Available at: <<https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>> [Accessed November 2021].
- Fernández-Bucesa N., C. Siebe, S. Cram, J.L. Palacio. (2006). Mapping soil salinity using a combined spectralresponse index for bare soil and vegetation: A case study in the former lake Texcoco, Mexico. *Journal of Arid Environments* 65: 644–667.
- Galán, H., E. & Romero, B., A. (2008). Contaminación de suelos por metales pesados. *Revista de la Sociedad Española de Mineralogía, Macla* 10, 48-60.

- Gao, S., Ouyang, C., Wang, S., Xu, Y., Tang, L. & Chen, F. (2008). Effects of salt stress on growth, antioxidant enzyme and phenylalanine ammonia-lyase activities in *Jatropha curcas* L. seedlings. *Plant Soil Environ.* 54, 374–381.
- García, E. (1973). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köpen. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México, pp. 146.
- Garrido-García, R. (2014). Efecto de catorce sustratos para la producción de humus de lombriz roja (*Eisenia foetida*). Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero en recursos naturales renovables mención conservación de suelos y agua. Universidad Nacional Agraria De La Selva.
- Gasca, A. C., Menjivar, C. J. y Torrente, T. A. (2011). Cambios en el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y la relación de absorción de sodio (RAS) de un suelo y su influencia en la actividad y biomasa microbiana. *Acta agronómica* 60(1), 27-38.
- Gaylarde, C. C., Bellinaso, M. D. L., & Manflo, G. P. (2005). Biorremediação. *Biotecnologia Ciência y Desenvolvimento*, 34, 36-43.
- Gerhardt, K. E., Huang, X. D., Glick, B. R., & Greenberg, B. M. (2009). Phytoremediation and rhizoremediation of organic soil contaminants: potential and challenges. *Plant Science*, 176(1), 20-30.
- González, L. M., Ramírez, R., & Aguilera, R. (2002). Los suelos salinizados y su utilización en la producción agrícola. *Alimentaria* (339), 103-107.
- Gupta, RK, Singh, OP & Abrol, IP (1984). Determinación de la capacidad de intercambio catiónico y sodio intercambiable en suelos alcalinos. *Soil Sci.*, (En prensa).
- Gutiérrez, C. Ma del C. (1997). Los suelos de la ribera del ex lago de Texcoco (Macro y micromorfología). Ph.D. Tesis. Programa de Edafología, Colegio de Postgraduados. Montecillo. Texcoco, México.
- Gutiérrez, C. Ma del C., & W. Effland. (2010). Pedogenic and biogenic siliceous features. In: micromorphological features of soils and regolites. Stoops, G., V. Marcelino and F. Mess (eds.), *Elsevier* 1: 637-645. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53156-8.00021-0>
- Gutiérrez, C. Ma del C., Stoops, G. & Ortiz, S., C.A. (1998). Carbonato de calcio en los suelos del ex lago de Texcoco. *Terra Latinoamericana*, 16(1): 11-19.
- Gutiérrez, C. Ma del C., Stoops, G., Ortiz, S., C.A. & López, G., A. (2005). Amorphous Silica Materials In Soils And Sediments Of The Ex Lago De Texcoco. *Catena* 60: 205-226.



- Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Alam, M. M., Bhowmik, P. C., Hossain, M. A., Rahman, M. M., & Fujita, M. (2014). Potential Use of Halophytes to Remediate Saline Soils. *BioMed research international*.
- Iler, R.K., (1955). *Colloid Chemistry of Silica and Silicates*. Cornell Univ. Press, Ithaca, N.Y
- Jaramillo J., D. (2002). *Introducción a la ciencia del suelo*. Medellín Colombia: Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ciencias. 1er ed., p. 346. Obtenido de: <http://www.bdigital.unal.edu.co/2242/1/70060838.2002.pdf>
- JRC. (2019). Global map of soil salinization. World atlas of desertification. Joint Research Centre. UE. (<https://wad.jrc.ec.europa.eu/soilsalinization>)
- LABORATORIO DE SALINIDAD, (1974). *Suelos salinos y sódicos. Diagnóstico y rehabilitación*. United States Department of Agriculture (USDA). Ed. Limusa. México. 172 p.
- Lastiri, M., (2016). *Evaluación y selección de una planta forrajera con potencial para fitorremediar suelos salinos*. Maestría. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional. Unidad Michoacán. Instituto Politécnico Nacional.
- Li, Z. y Shuman M., L. (1996). Heavy metal movement in metal contaminated soil profiles. *Soil Sci*. 161: 656-666.
- Lillo, J. (s.f). Peligros geoquímicos: arsénico de origen natural en las aguas. Grupo de Estudios de Minería y Medioambiente. <https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-15564/Peligros%20geoqu%C3%ADmicos%20del%20ars%C3%A9nico%20-%20Javier%20Lillo.pdf>.
- López, A. G. (2001). *La cementación y caracterización superficial de los sedimentos lacustres en el ex lago de Texcoco*. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados Montecillo, México.
- López, A. G., Gutiérrez, C. Ma. del C., Ortiz, S. C. A., Flores, R. D. & Segura, C. M. A. (2004). Sediments of the ex-Lake of Texcoco, and their Behavior with the Application of Calcareous Materials and Compaction. *Terra Latinoamericana* 22(1): 1-10.
- Luna-Guido, M.L., Beltrán-Hernández, R.I., Solis-Ceballos, N.A., Hernández-Chavez, N., Mercado-García, F., Olalde-Portugal, V., Catt, J.A., Dendooven, L. (2000). Chemical and biological characteristics of alkaline saline soils from the former lake Texcoco as affected by artificial drainage. *Biology and Fertility of Soils* 32, 102-108.

- Manchanda, G., & Garg, N. (2008). Salinity and its effects on the functional biology of legumes. *Acta Physiologiae Plantarum*, 30(5), 595-618.
- Manzano B., J.I., Rivera O., P., Briones E., F. & Zamora T., C. (2014). Rehabilitation of Saline-Sodic Soils: A Case Study in Irrigation District 086, Jimenez, Tamaulipas, Mexico. *Terra Latinoamericana* 32(3): 211-219.
- Mata-Fernández I, Rodríguez-Gamiño ML, López-Blanco J, Vela-Correa GH. (2014). Dinámica de la salinidad en los suelos. *Revista digital del Departamento El Hombre y Su Ambiente* 1(5): 26-35.
- Montaño G., S., Ortega E., M., Ramírez A., C. & Rone P., J. L. (1985). Estudio de 3 yesos agrícolas y yeso puro bajo 2 formas de aplicación (incorporado al suelo y solubilizado en el agua) en el mejoramiento de la capa arable de un suelo sódico. *Agrociencia* 59: 169-186.
- Nasim, M., Qureshi, R. H., Saqib, M., Aziz, T., Nawaz, S., Akhtar, J., & Anwar-ul-Haq, M. (2007). Properties of salt affected soil under *Eucalyptus camaldulensis* plantation in field conditions. *Pak. J. Agri. Sci*, 44, 3.
- NOM-021-RECNAT-2000. (2002). Establece las especificaciones de fertilidad, sanidad y clasificación de suelos, estudios, muestreo y análisis.
- Noguez, H. R., Carballo, C. A. & Flores, O. H. (2013). *Suaeda edulis* (Chenopodiaceae), una nueva especie de lagos salinos del centro de México. *Botanical Sciences* 91 (1): 19-25.
- NRCS-USDA. (2000). The Color of Soil. Disponible en: <[https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/edu/?cid=nr cs142p2\\_054286](https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/edu/?cid=nr cs142p2_054286)>
- Oliver-Burwitz, L., Rodríguez-Esteban, J.A., Torres-Costa, V. & Hernández, Z. (2019). Análisis espacio-temporal de la degradación de suelos afectados por salinidad en el sistema lacustre del Valle de Texcoco (México). *Teledetección: hacia una visión global del cambio climático*. 365-368.
- Omuto, C.T., Vargas, R.R., El Mobarak, A.M., Mohamed, N., Viatkin, K. y Yigini, Y. (2021). Mapeo de suelos afectados por salinidad - Manual técnico. Roma, FAO. <https://doi.org/10.4060/ca9215es>
- Ortiz-Hernández, M. L., Rodríguez, A., Sánchez-Salinas, E., & Castrejón-Godínez, M. L. (2014). Bioremediation of Soils Contaminated with Pesticides: Experiences in Mexico. In *Bioremediation in Latin America* (pp. 69-99). Springer International Publishing.
- Otero, L., Francisco, A., Gálvez, V., Morales, R., Sánchez, I., Labaut, M., & Rivero, L. (2008). Caracterización y evaluación de la salinidad. 9 pp.

- Otero, L., Gálvez, V., Navarro, N., Díaz, G., Rivero L. y Vantour A. (2006). Contribución de las fracciones adsorbentes al intercambio catiónico de suelos arroceros de la llanura sur Habana-Pinar del Río. *Terra Latinoamericana* 24: 9-15.
- Pilon-Smits, E. (2005). Phytoremediation. *Annu. Rev. Plant Biol.*, 56: 15-39.
- Porta J., López-Acevedo M. y Poch R. (2011). Introducción a la edafología: uso y protección de los suelos. Segunda edición. Ediciones Mundi-prensa. 508 p.
- Porta J., López-Acevedo M. y Roquero C. (2003). Edafología Para la Agricultura y el Medio Ambiente. Tercera Edición. Ediciones Mundi-Prensa. 917 p.
- Portal Seminario. (2017). En Texcoco contaminan cerros por aeropuerto. [online] Available at: <<http://www.frecuencialaboral.com/TEXCOCOcontaminancerrosportaero puerto2017.html>>
- Portilla, L. M. and Aguilera, C. (1986). Tenochtitlan y sus contornos hacia 1950. *Celanece Mexicana S. A. México D.F.* 109 pp.
- Qadir, M., Oster, J. D., Schubert, S., & Murtaza, G. (2006). Vegetative bioremediation of sodic and saline-sodic soils for productivity enhancement and environment conservation. In *Biosaline Agriculture and Salinity Tolerance in Plants* (pp. 137-146). Birkhäuser Basel.
- Qadir, M., Oster, J. D., Schubert, S., Noble, A. D., & Sahrawat, K. L. (2007). Phytoremediation of Sodic and Saline-Sodic Soils. *Advances in Agronomy* 96: 197- 247.
- Reinés, M., J.A. Loza Llamas y S.H. Contreras Rodríguez. (2004). Lombricultura una biotecnología para la sustentabilidad. Editado por Fundación Produce Jalisco A.C. y la Universidad de Guadalajara. 60 pp.
- Rengasamy, P. (2006). World salinization with emphasis on Australia. *Journal of Experimental Botany*, 57(5): 1017-1023.
- Reporte indigo. Fotografía panorámica del depósito de los sedimentos en las minas de San Miguel Tlaixpan y San Nicolás Tlaminca.
- Reyes, J.J., Murillo, B., Nieto, A., Troyo, E., Reynaldo, I.M., Rueda, E. O., & Cuervo, J.L. (2014). Crecimiento y desarrollo de variedades de albahaca (*Ocimum basilicum* l.) en condiciones de salinidad. *Terra Latinoamericana*, 32(1), 35-45.
- Richards, L. (1954). Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. USDA Agricultural hand-book vol. 60. US Government printing office, Washington, DC. 160 pp.

- Richards, L. (1980). Diagnóstico y Rehabilitación de Suelos Salinos y Sódicos. 6th ed. México: Limusa.
- Rivera, E., Sánchez, M., y Domínguez, H. (2018). pH como factor de crecimiento en plantas. *Revista Iberoamericana de Comunicación*, 4, 101-105.
- Rodríguez Muñoz, A. (1990). Caracterización de los Métodos empíricos de Recuperación de Suelos Salinos en San Salvador Atenco y San Francisco Acuexcomac, México. Tesis Profesional, Depto. de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Roquero, E., Goy, J. L., Zazo, C. & Artieda, O. (2001). Control geomorfológico de la salinidad en suelos aluviales. Sector Central del Valle del Tajo. Madrid-Toledo. *Rev. C&G* 15, (3-4).
- Ruiz Cerda, E., Aldaco Nuncio, R. A., Trejo, M., Fortis Hernández, M., Olague Ramírez, J., & Villagómez Gamboa, J. C. (2012). Aprovechamiento y mejoramiento de un suelo salino mediante el cultivo de pastos forrajeros. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 45(1), 19.
- SAGARPA. (2011). Producción de Remolacha Azucarera en el Valle de Mexicali, BC. Mexicali, BC. 7 p.
- SAGARPA. (2017). Planeación Agrícola Nacional 2017-2030. Cebada *grano mexicana*. México. 15 p.
- Sakai, Y., Ma, Y., Xu, C., Wu, H., Zhu, W., Yang, J. (2012). Phytodesalination of a salt-affected soil with four halophytes in China. *J. Arid Land Stud.*22(1), 17-20.
- Salinas, C., J. (2018). Alerta Chapingo sobre riesgos de lodos tóxicos extraídos de zona del NAICM. *La Jornada*, p. 12. Publicado el 20 de abril del 2018.
- Sánchez, B. E., Ortega, E. M., González, H. V., Camacho, E. M., Kohashi, S. J. (2008). Crecimiento de plantas de papa (*Solanum tuberosum* L.) cv. Alpha, inducidos por diversas soluciones salinas. *Interciencia* 33(9):1-9.
- Sanders, H.J. (1980). Reorganizing and improving enviromental condition in the high Valley of Mexico. *Applied Geography and Development* 16:105-116.
- Sandoval-Moreno, A., & Ochoa-Ocaña, M. A. (2010). Grupos locales, acceso al agua y su problemática de contaminación en la Ciénega de Chapala, Michoacán. *Economía, Sociedad y Territorio*, 10(34), 683-719.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2009). El Medio Ambiente en México: En Resumen 2009. México. Gobierno Federal. ([www.semarnat.gob.mx](http://www.semarnat.gob.mx)) pp. 20-23

- Schofield, R. V., & Kirkby, M. J. (2003). Application of salinization indicators and initial development of potential global soil salinization scenario under climatic change. *Global biogeochemical cycles*, 17(3).
- Schwertmann, U. & Taylor, R. M. (1989). Iron oxides. In Dixon, J. B., Weed, S. B. (Eds.), *Minerals in Soil Environments*. Soil Science Society of America, Book Series: No. 1. Madison, WI, pp. 379-438.
- Serrato, R., Ortiz, A., Dimas, J. y Berúmen, S. (2002). Aplicación de lavado y estiércol para recuperar suelos salinos en la Comarca Lagunera, México. *Terra Latinoamericana* 20 (3): 329-336.
- Silburn, D. M., Cowie, B. A., & Thornton, C. M. (2009). The Brigalow Catchment Study revisited: Effects of land development on deep drainage determined from non-steady chloride profiles. *Journal of Hydrology*, 373(3), 487-498.
- Tarín, V., M. y Velázquez L., A. (1986). Lavado de suelos en el ex-Lago de Texcoco. *Ingeniería hidráulica en México*. 30-49
- Tejada, M., C. García, J. L. González, and M. T. Hernández. (2006). Use of organic amendment as a strategy for saline soil remediation: Influence on the physical, chemical and biological properties of soil. *Soil Biol. Biochem.* 38: 1413-1421.
- Thomas, H. (1994). *La Conquista de México*. Booket Ed., 1136 pp.
- Trinidad-Santos, A., Velasco-Velasco, J. (2016). Importancia de la materia orgánica en el suelo. *Agroproductividad*, 9(8), 52-58.
- Van Reeuwijk, L.P. (2003). *Procedimientos para análisis de suelos*. Trad. Al español, Ma del C. Gutiérrez Castorena, C.A. Tavarez E., C.A. Ortiz Solorio. Colegio de Postgraduados, Montecillo. Estado de México.
- Velázquez, L. A. (1981). *Estudio agrológico detallado del ex lago de Texcoco*, Estado de México. SARH, CLT, México.
- Volke Sepúlveda, T., Velasco Trejo, J.A. (2002). *Tecnologías de remediación para suelos contaminados*. Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT). México. 64.
- Wang S, Feng Q, Zhou Y, Mao X, Chen Y, Xu H. (2017). Dynamic changes in water and salinity in saline-alkali soils after simulated irrigation and leaching. *PLoS ONE* 12(11): e0187536. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0187536>
- Yu, H., Xi, B., Ma, W., Li, D., He, X. (2011). Fluorescence spectroscopic properties of dissolved fulvic acids from salined fluvio-aquic soils around Wuliangshuai in Hetao Irrigation District, China. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75, 1359-1367.

- Yuan, B.C., Xu, X.G., Li, Z.Z., Gao, T.P., Gao, M., Fan, X.W., Deng, J.M. (2007). Microbial biomass and activity in alkalized magnesian soils under arid conditions. *Soil Biol. Biochem.* 39, 3004–3013. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.05.034>
- Zamudio-González, B., López-Pérez, L., Alcántar-González, G., González-Eguiarte, D. R., Ruiz-Corral, J. A., & Castellanos, J. Z. (2004). Delimitación de áreas salinas en el Distrito de Riego de Caborca, Sonora, México. *Terra Latinoamericana*, 22(1), 91-97.
- Zouboulis, A. I., & Moussas, P. A. (2011). Groundwater and soil pollution: bioremediation. *Encyclopedia of Environmental Health*, 1037-1044.

## ANEXOS

### ANEXO 1. ANÁLISIS QUÍMICOS

Se muestran los análisis químicos de las 60 muestras tomadas para la caracterización de los sedimentos de la mina de San Nicolás Tlaminca.

Cuadro 17. Parámetros de clasificación de salinidad de los sedimentos.

LADERA	PUNTO	PROFUNDIDAD (cm)	pH	CE dS m <sup>-1</sup>	CIC Cmol(+) Kg <sup>-1</sup>	RAS	PSI %
ALTA	1	0-20	9.3	74.1	40.80	49 021.81	882.44
		20-40	9.4	67.4	52.40	21 691.89	386.69
		40-60	9.7	49.9	66.80	7 535.33	101.35
	2	0-20	9.8	72.9	81.40	11 344.02	166.05
		20-40	9.8	50.1	76.00	8 708.74	148.26
		40-60	9.9	57.7	82.80	13 480.80	380.51
	3	0-20	9.7	47.2	34.00	8 971.45	595.96
		20-40	9.6	60.9	72.20	18 967.80	249.50
		40-60	10.1	70.9	40.80	23 570.45	606.86
	4	0-20	10.1	40.5	89.58	9 138.29	226.19
		20-40	10.0	39.9	82.05	10 354.74	27.70
		40-60	10.0	31.8	88.57	3 772.47	0.27
	5	0-20	10.0	43.6	85.51	8 116.72	105.47
		20-40	10.0	38.3	93.86	5 923.91	215.88
		40-60	10.0	29.3	82.25	3 831.21	136.99
	6	0-20	9.7	94.6	35.22	19 389.40	511.43
		20-40	10.0	76.5	46.22	12 621.31	341.11
		40-60	10.0	64.5	68.61	12 066.28	262.54
	7	0-20	10.1	47.2	49.07	8 211.95	367.12
		20-40	10.1	35.3	76.15	4 836.09	118.44
		40-60	9.7	30.0	62.71	3 921.98	179.68
MEDIA	8	0-20	10.0	31.3	92.20	5 364.03	73.43
		20-40	10.1	30.3	42.60	5 778.39	158.93
		40-60	10.1	28.6	81.80	6 076.70	27.79
	9	0-20	10.0	37.7	88.20	8 333.32	76.76
		20-40	10.1	34.7	81.85	6 744.11	192.62
		40-60	10.0	32.2	66.58	6 594.30	101.69
	10	0-20	10.0	32.4	83.27	8 472.38	216.33
		20-40	9.9	30.6	83.68	4 992.45	0.29

LADERA	PUNTO	PROFUNDIDAD (cm)	pH	CE dS m <sup>-1</sup>	CIC Cmol <sub>(+)</sub> Kg <sup>-1</sup>	RAS	PSI %
		40-60	9.4	30.2	89.58	5 761.35	50.47
		0-20	10.1	36.7	73.91	6 911.64	61.18
	11	20-40	9.9	33.8	87.34	5 182.79	129.00
		40-60	10.0	39.3	57.01	6 304.19	237.10
		0-20	9.9	44.8	32.17	9 605.33	280.37
	12	20-40	9.9	33.1	68.41	4 623.60	33.23
		40-60	9.9	26.9	29.11	3 945.48	232.54
		0-20	9.9	33.9	62.10	8 143.40	36.60
	13	20-40	9.9	23.3	56.40	3 729.39	40.30
		40-60	9.5	26.1	54.97	4 625.62	82.26
		0-20	9.9	58.4	53.14	13 985.68	423.63
	14	20-40	9.8	48.7	41.74	28 590.06	323.84
		40-60	9.7	49.5	53.95	12 810.55	375.55
		0-20	10.0	59.8	36.65	17 278.06	859.69
	15	20-40	10.0	45.4	45.81	11 002.05	344.14
		40-60	10.2	45.4	27.89	7 118.58	645.82
		0-20	10.1	36.1	51.10	4 859.92	132.48
	16	20-40	10.0	32.5	69.02	3 418.26	163.25
		40-60	10.0	39.2	77.37	8 846.19	145.64
		0-20	9.7	68.4	63.52	32 447.75	248.18
	17	20-40	9.6	64.0	62.51	27 992.95	360.15
		40-60	10.0	62.3	57.42	22 842.76	470.41
		0-20	9.7	57.6	47.03	21 369.56	574.27
	18	20-40	9.7	52.0	74.11	29 632.36	394.78
		40-60	9.6	52.5	34.82	27 104.02	582.00
		0-20	9.7	56.4	48.86	18 929.97	414.67
BAJA	19	20-40	9.7	78.6	61.69	45 739.27	437.81
		40-60	9.8	80.3	55.99	9 431.45	161.08
		0-20	9.7	68.1	51.10	8 573.81	132.48
	20	20-40	10.0	63.4	62.30	7 739.66	469.61
		40-60	9.5	58.8	28.10	10 380.99	561.10



Cuadro 18. Cationes y aniones solubles para la caracterización de los sedimentos.

LADERA	PUNTO	PROFUNDIDAD cm	CATIONES SOLUBLES				ANIONES SOLUBLES				
			Ca mmolL <sup>-1</sup>	Mg mmolL <sup>-1</sup>	Na mmolL <sup>-1</sup>	K mmolL <sup>-1</sup>	CO <sub>3</sub> mmol(-)L <sup>-1</sup>	HCO <sub>3</sub> mmol(-)L <sup>-1</sup>	Cl mmol(-)L <sup>-1</sup>	SO <sub>4</sub> mmol(-)L <sup>-1</sup>	
ALTA	1	0-20	0.01	1.21	38260.87	6649.62	121.66	834.34	36000	36.77	
		20-40	0.08	0.96	15652.17	2557.54	93.10	514.90	24600	31.55	
		40-60	0.18	1.32	6521.74	1611.25	53.48	288.52	10200	26.25	
	2	0-20	0.03	0.92	7826.09	1713.55	93.66	522.34	30500	26.16	
		20-40	0.09	0.63	5217.39	1074.17	50.26	309.74	13600	15.50	
		40-60	0.12	0.88	9565.22	1815.86	65.10	400.90	19400	21.38	
	3	0-20	0.18	0.61	5652.17	1150.90	49.84	262.16	13700	11.20	
		20-40	0.06	0.60	10869.57	2122.76	69.16	452.84	20500	19.29	
		40-60	0.04	0.89	16086.96	2557.54	96.74	691.26	28300	29.89	
	4	0-20	0.15	0.50	5217.39	971.87	42.28	219.72	6900	23.79	
		20-40	0.16	0.53	6086.96	1253.20	37.10	206.90	7600	20.78	
		40-60	0.13	0.70	2434.78	434.78	27.30	112.70	6000	8.74	
	5	0-20	0.12	0.71	5217.39	997.44	54.74	301.26	7800	19.95	
		20-40	0.21	0.66	3913.04	895.14	34.16	191.84	7000	15.74	
		40-60	0.31	1.14	3260.87	716.11	23.30	126.70	5600	7.36	
	6	0-20	0.03	0.38	8695.65	1687.98	96.46	737.54	19600	11.43	
		20-40	0.03	0.15	3782.61	741.69	61.04	432.96	12300	4.68	
		40-60	0.04	0.17	3913.04	946.29	51.38	306.62	8300	3.36	
	7	0-20	0.06	0.34	3695.65	639.39	45.50	238.50	9600	8.43	
		20-40	0.13	0.71	3130.43	460.36	32.90	151.10	6000	5.44	
		40-60	0.12	0.68	2478.26	434.78	25.20	144.80	5400	4.86	
	MEDIA	8	0-20	0.13	0.57	3173.91	537.08	26.46	125.54	5600	5.21
			20-40	0.11	0.56	3347.83	562.66	26.46	143.54	6200	5.87
			40-60	0.13	0.56	3565.22	562.66	25.90	130.10	5500	7.50
9		0-20	0.20	0.72	565.22	920.72	36.12	169.88	7800	26.07	
		20-40	0.19	0.64	4347.83	792.84	30.80	139.20	7000	18.72	
		40-60	0.16	0.71	4347.83	895.14	24.36	135.64	5900	15.64	
10		0-20	0.12	0.41	4347.83	818.41	32.48	153.52	6300	10.75	
		20-40	0.20	0.72	3391.30	613.81	27.16	122.84	5800	11.03	
		40-60	0.15	0.73	3826.09	716.11	30.80	103.20	6100	7.23	
11		0-20	0.13	0.83	4782.61	1099.74	46.62	275.38	8500	10.81	
		20-40	0.13	1.28	4347.83	971.87	39.62	230.38	6900	10.02	
		40-60	0.08	1.07	4782.61	1227.62	49.28	254.72	9500	13.10	
12		0-20	0.10	0.82	6521.74	1329.92	51.38	272.62	14000	18.39	
		20-40	0.14	0.80	3173.91	767.26	28.84	189.16	8000	15.71	
		40-60	0.13	0.80	2695.65	588.24	23.94	120.06	5300	7.01	
13		0-20	0.09	0.44	4217.39	920.72	31.78	150.22	8700	8.38	
		20-40	0.12	0.73	2434.78	511.51	24.50	77.50	4600	3.67	
		40-60	0.12	0.67	2913.04	639.39	27.86	98.14	5200	4.73	

LADERA	PUNTO	PROFUNDIDAD cm	CATIONES SOLUBLES				ANIONES SOLUBLES			
			Ca mmolL <sup>-1</sup>	Mg mmolL <sup>-1</sup>	Na mmolL <sup>-1</sup>	K mmolL <sup>-1</sup>	CO <sub>3</sub> mmol(₃)L <sup>-1</sup>	HCO <sub>3</sub> mmol(₃)L <sup>-1</sup>	Cl mmol(₃)L <sup>-1</sup>	SO <sub>4</sub> mmol(₃)L <sup>-1</sup>
		0-20	0.03	0.13	3913.04	843.99	73.08	502.92	12900	12.37
	14	20-40	0.01	0.02	3565.22	537.08	55.86	336.14	10300	4.83
		40-60	0.03	0.20	4347.83	664.96	58.52	349.48	10100	6.39
		0-20	0.03	0.22	6086.96	1125.32	56.56	463.44	13500	10.56
	15	20-40	0.04	0.27	4347.83	690.54	51.80	292.20	7700	4.74
		40-60	0.06	0.30	3043.48	588.24	51.38	268.62	8100	3.56
		0-20	0.11	0.57	2826.09	511.51	30.94	145.06	7100	3.64
	16	20-40	0.10	0.81	2304.35	358.06	28.14	115.86	4700	2.55
		40-60	0.05	0.26	3478.26	537.08	41.02	164.98	6800	3.35
		0-20	0.06	0.54	17826.09	2813.30	84.14	675.86	21400	9.09
	17	20-40	0.03	0.33	11739.13	2122.76	88.20	591.80	17800	4.90
		40-60	0.04	0.34	10000.00	1918.16	74.76	569.24	17200	4.19
		0-20	0.01	0.43	10000.00	2301.79	78.40	665.60	22500	7.98
	18	20-40	0.01	0.11	7391.30	1790.28	73.08	544.92	19500	4.70
		40-60	0.03	0.14	7826.09	1892.58	80.64	543.36	20100	6.70
BAJA		0-20	0.01	0.45	9130.43	1918.16	86.66	611.34	21900	8.50
	19	20-40	0.02	0.02	5652.17	1381.07	75.46	498.54	17000	5.23
		40-60	0.05	0.66	5652.17	1355.50	75.74	518.26	16700	5.61
		0-20	0.03	0.38	3913.04	1099.74	54.74	379.26	12500	5.97
	20	20-40	0.07	0.56	4347.83	971.87	48.44	353.56	12200	5.00
		40-60	0.05	0.25	4043.48	946.29	42.42	235.58	7700	3.78

Cuadro 19. Cationes intercambiables para la caracterización de los sedimentos.

LADERA	PUNTO	PROFUNDIDAD	CATIONES INTERCAMBIABLES			
			Ca	Mg	Na	K
		cm	Cmol <sup>(+)</sup> kg <sup>-1</sup>	Cmol <sup>(+)</sup> kg <sup>-1</sup>	Cmol <sup>(+)</sup> kg <sup>-1</sup>	Cmol <sup>(+)</sup> kg <sup>-1</sup>
ALTA	1	0-20	36.57	92.93	360.03	38.49
		20-40	48.26	93.71	202.63	35.88
		40-60	29.03	101.10	67.70	22.78
	2	0-20	38.73	89.00	135.17	31.95
		20-40	33.26	95.64	112.68	22.78
		40-60	39.52	103.52	315.06	25.40
	3	0-20	42.00	95.52	202.63	31.95
		20-40	152.89	107.28	180.14	38.49
		40-60	110.94	81.90	247.60	38.49
	4	0-20	27.91	73.53	202.63	26.71
		20-40	29.16	84.20	22.73	18.85
		40-60	28.10	96.41	0.24	14.92
	5	0-20	25.89	75.08	90.19	21.47
		20-40	27.16	92.05	202.63	22.78
		40-60	93.90	120.42	112.68	33.26
	6	0-20	18.07	74.62	180.14	12.31
		20-40	21.17	59.34	157.65	13.61
		40-60	26.15	73.18	180.14	12.31
	7	0-20	32.91	72.27	180.14	28.02
		20-40	35.03	71.69	90.19	14.92
		40-60	33.50	86.44	112.68	20.16
MEDIA	8	0-20	40.55	116.60	67.70	14.92
		20-40	49.79	119.08	67.70	14.92
		40-60	33.60	100.88	22.73	14.92
	9	0-20	33.08	90.01	67.70	25.40
		20-40	31.26	94.47	157.65	20.16
		40-60	28.34	95.54	67.70	14.92
	10	0-20	23.67	91.49	180.14	21.47
		20-40	21.82	96.77	0.24	13.61
		40-60	22.47	97.33	45.22	7.07
	11	0-20	33.84	85.38	45.22	17.54
		20-40	42.64	105.47	112.68	21.47
		40-60	34.20	98.27	135.17	21.47
	12	0-20	27.10	84.75	90.19	17.54
		20-40	44.01	120.44	22.73	20.16
		40-60	85.20	125.44	67.70	20.16
13	0-20	27.83	96.30	22.73	12.31	
	20-40	27.98	94.68	22.73	13.61	
	40-60	33.47	113.50	45.22	16.23	
14	0-20	23.25	69.36	225.11	17.54	

LADERA	PUNTO	PROFUNDIDAD	CATIONES INTERCAMBIABLES				
			Ca	Mg	Na	K	
			cm	Cmol(+)kg <sup>-1</sup>	Cmol(+)kg <sup>-1</sup>	Cmol(+)kg <sup>-1</sup>	Cmol(+)kg <sup>-1</sup>
BAJA	15	20-40	28.29	70.31	135.17	11.00	
		40-60	33.65	67.29	202.63	21.47	
		0-20	30.60	60.22	315.06	21.47	
	16	20-40	32.31	73.49	157.65	16.23	
		40-60	32.32	78.87	180.14	24.09	
		0-20	44.29	72.78	67.70	16.23	
	17	20-40	100.47	87.27	112.68	22.78	
		40-60	82.87	89.96	112.68	17.54	
		0-20	16.20	61.72	157.65	16.23	
	18	20-40	20.75	67.33	225.11	17.54	
		40-60	27.19	65.60	270.09	24.09	
		0-20	17.15	57.68	270.09	17.54	
	19	20-40	20.34	62.87	292.57	14.92	
		40-60	25.70	69.85	202.63	22.78	
		0-20	20.95	78.02	202.63	7.07	
	20	20-40	23.63	69.81	270.09	16.23	
		40-60	24.70	78.71	90.19	21.47	
		0-20	25.46	61.72	67.70	8.38	
	20	20-40	29.07	68.14	292.57	18.85	
		40-60	32.38	81.96	157.65	18.85	

Cuadro 20. Datos del lixiviado colectado pertenecientes a cada una de las lecturas tomadas a los tratamientos del experimento.

Tratamiento	REP	pH					CE					Na soluble	Na soluble
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	inicial	final
							----- dS m <sup>-1</sup> -----					mmol.L <sup>-1</sup>	Cmol(+)kg <sup>-1</sup>
BY 200	1	9.3	9.1	8.8	8.8	8.4	45.3	48.8	50.4	33.5	18.62	7826.09	2826.09
BY 200	2	9.5	9.5	9.2	9.0	8.9	65.3	50.7	52.0	32.8	4.1	10434.78	408.70
BY 200	3	9.3	9.0	8.7	8.5	8.4	65.4	48.5	47.6	31.3	6.7	10000.00	2173.91
BY 100	1	9.6	9.6	9.5	9.5	9.3	57.6	38.1	44.9	28.4	12.9	10869.57	1695.65
BY 100	2	9.9	9.6	9.6	9.5	9.4	25.8	42.1	45.2	21.3	11.7	2608.70	1391.30
BY 100	3	9.6	9.5	9.6	9.6	9.4	61.5	45.4	40.1	24.7	12.1	10000.00	1521.74
BE 200	1	9.1	9.1	9.3	8.8	9.0	61.0	49.9	48.3	30.8	31.8	10000.00	3739.13
BE 200	2	9.1	9.1	9.3	8.9	8.8	57.6	48.8	53.1	31.7	19.3	6956.52	2173.91
BE 200	3	9.0	9.0	9.3	8.8	9.1	64.6	54.4	41.6	31.3	30.7	8260.87	3434.78
BE 100	1	9.4	9.3	9.2	8.9	8.9	64.0	35.1	33.8	29.8	18.2	7826.09	2043.48
BE 100	2	9.4	9.2	9.4	9.0	8.9	73.1	43.8	34.9	25.3	24.9	11304.35	2869.57
BE 100	3	9.5	9.3	9.3	8.9	9.0	58.8	47.1	36.4	26.8	17.2	7391.30	2260.87
BM 200	1	9.1	9.3	9.4	9.0	9.2	32.3	19.2	19.4	14.0	14.3	3478.26	1608.70
BM 200	2	9.0	9.4	9.5	9.1	9.2	27.3	19.8	18.4	14.5	13.8	2739.13	1869.57
BM 200	3	8.9	9.4	9.4	9.3	9.2	28.5	19.1	16.8	12.3	12.8	2869.57	1434.78
BM 100	1	9.0	9.2	9.4	9.1	9.4	35.8	18.9	20.2	14.9	13.8	2652.17	1695.65
BM 100	2	9.3	9.5	9.5	9.3	9.4	26.7	18.0	18.9	15.4	15.3	2782.61	1652.17
BM 100	3	9.2	9.5	9.5	9.3	9.3	25.7	17.2	17.8	14.6	16.8	2652.17	1956.52
BT	1	9.8	10.0	10.0	9.9	9.9	60.8	29.1	23.8	22.1	18.0	10869.57	2434.78
BT	2	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	56.6	40.3	35.6	28.6	15.9	9565.22	1956.52
BT	3	9.9	9.9	10.0	9.9	9.9	61.1	32.2	39.0	27.9	16.4	11739.13	2000.00

Tratamiento	REP	pH					CE					Na soluble	Na soluble
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	inicial	final
BYM 200	1	9.2	9.4	9.6	9.4	9.3	29.1	13.7	15.8	12.3	12.3	3347.83	1565.22
BYM 200	2	9.1	9.4	9.5	9.3	9.2	23.1	19.2	17.3	14.7	13.7	2478.26	1739.13
BYM 200	3	9.1	9.1	9.5	9.4	9.3	27.0	16.9	15.0	11.9	11.9	2695.65	1521.74
BYM 100	1	9.4	9.5	9.6	9.4	9.4	26.3	15.1	15.6	13.2	16.4	2652.17	2173.91
BYM 100	2	9.4	9.5	9.6	9.4	9.5	27.9	15.3	16.4	14.0	11.5	2782.61	1304.35
BYM 100	3	9.5	9.6	9.8	9.5	9.5	20.7	15.6	16.9	12.3	12.7	1869.57	1565.22
MY 200	1	9.1	8.9	9.0	8.9	8.8	70.9	49.2	42.9	23.8	13.1	13478.26	1608.70
MY 200	2	9.7	9.3	9.4	9.1	9.0	39.8	59.2	51.0	30.0	17.5	6956.52	2260.87
MY 200	3	9.7	9.5	9.4	9.4	9.0	44.6	52.8	54.2	21.6	24.4	7826.09	3086.96
MY 100	1	10.0	10.0	10.0	9.9	9.8	28.6	18.7	27.3	23.4	20.7	3478.26	3000.00
MY 100	2	9.8	9.8	9.9	9.7	9.7	55.3	48.8	36.1	22.6	10.8	10434.78	1347.83
MY 100	3	9.6	9.7	9.9	9.7	9.7	65.6	50.1	44.2	26.7	13.6	12608.70	1695.65
ME 200	1	9.4	9.3	9.5	9.1	9.2	70.5	56.8	45.3	30.4	27.3	10000.00	3173.91
ME 200	2	9.4	9.1	9.4	9.0	8.9	61.3	53.9	42.1	30.7	21.7	8695.65	2478.26
ME 200	3	9.3	9.0	9.5	9.1	9.2	64.3	51.2	36.2	29.1	29.1	9130.43	3304.35
ME 100	1	9.6	9.4	9.4	9.0	8.9	51.2	39.3	29.7	30.8	23.0	6086.96	2521.74
ME 100	2	9.6	9.4	9.5	9.2	9.1	52.2	31.6	25.0	22.2	22.4	8260.87	2391.30
ME 100	3	9.6	9.3	9.5	9.0	9.0	65.2	42.7	29.4	24.9	21.8	10434.78	2608.70
MM 200	1	9.1	9.3	9.5	9.2	9.2	29.6	19.3	17.5	11.0	11.3	3434.78	1347.83
MM 200	2	9.2	9.4	9.6	9.4	9.3	35.4	20.7	18.0	12.6	11.1	3913.04	1391.30
MM 200	3	9.1	9.3	9.6	9.4	9.2	32.5	18.5	17.4	11.4	11.7	4260.87	1260.87
MM 100	1	9.5	9.6	9.7	9.5	9.5	31.0	16.9	13.6	11.4	10.1	3739.13	1739.13
MM 100	2	9.4	9.3	9.7	9.5	9.5	27.2	17.8	18.8	11.9	12.1	3086.96	1608.70
MM 100	3	9.4	9.5	9.7	9.5	9.6	25.9	16.3	16.5	13.9	11.9	3000.00	2130.43

Tratamiento	REP	pH					CE					Na soluble	Na soluble
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	inicial	final
MT	1	10.0	10.0	10.2	10.0	9.9	47.6	34.4	23.9	16.3	16.1	7826.09	3000.00
MT	2	10.0	10.0	10.1	9.9	10.0	36.2	28.3	29.1	25.7	22.4	4173.91	1826.09
MT	3	10.1	10.1	10.1	10.0	10.0	40.5	29.4	32.2	25.2	21.1	6086.96	1826.09
MYM 200	1	9.3	9.5	9.6	9.5	9.4	27.5	17.5	17.1	13.5	14.4	3217.39	1260.87
MYM 200	2	9.2	9.2	9.4	9.1	9.2	23.5	18.5	21.0	16.0	19.8	2608.70	2695.65
MYM 200	3	9.4	9.5	9.6	9.5	9.5	27.1	20.7	16.7	13.7	14.9	3000.00	1869.57
MYM 100	1	9.6	9.7	9.7	9.6	9.6	23.6	24.9	18.1	12.1	13.8	2521.74	1652.17
MYM 100	2	9.5	9.6	9.7	9.6	9.7	18.2	11.9	12.0	9.5	11.8	2043.48	1304.35
MYM 100	3	9.5	9.7	9.7	9.5	9.6	21.7	15.4	20.6	9.9	11.2	2304.35	1260.87
AY 200	1	9.5	8.9	8.9	8.9	8.9	68.3	51.8	44.7	24.4	13.9	13913.04	1652.17
AY 200	2	9.5	8.9	8.8	8.8	8.8	35.3	52.8	48.9	29.3	14.1	4173.91	1695.65
AY 200	3	9.5	9.1	9.1	8.9	8.8	76.3	52.2	44.0	31.2	18.1	16086.96	2391.30
AY 100	1	10.0	9.7	9.7	9.6	9.7	26.1	56.9	47.7	25.1	12.0	3086.96	1565.22
AY 100	2	9.9	9.6	9.7	9.5	9.8	18.3	20.1	53.4	34.3	6.7	2000.00	782.61
AY 100	3	9.8	9.7	9.8	9.7	9.8	66.2	51.4	45.8	24.4	15.0	11739.13	2043.48
AE 200	1	9.3	9.1	9.4	8.8	9.1	76.5	63.2	55.7	32.0	28.4	15652.17	4086.96
AE 200	2	9.4	9.1	9.0	8.8	9.1	55.6	49.6	39.8	35.8	26.8	7826.09	3956.52
AE 200	3	9.3	9.1	9.5	8.9	9.1	67.2	57.3	43.5	24.8	23.3	11304.35	3434.78
AE 100	1	9.3	9.2	9.4	8.9	9.1	56.6	39.3	31.0	18.7	18.7	9130.43	2608.70
AE 100	2	9.4	9.3	9.4	9.0	9.0	40.5	25.3	19.8	19.6	16.1	4782.61	1956.52
AE 100	3	9.4	9.2	9.5	9.1	9.1	47.5	52.1	22.3	14.5	17.0	8260.87	2086.96
AM 200	1	9.0	9.3	9.5	9.4	9.5	28.8	7.9	10.9	8.1	8.1	3304.35	1000.00
AM 200	2	8.8	9.2	9.5	9.2	9.3	32.3	10.5	11.2	8.7	10.1	4043.48	1304.35
AM 200	3	9.0	9.4	9.6	9.3	9.4	22.8	17.3	12.3	8.9	7.9	2608.70	1000.00

Tratamiento	REP	pH					CE					Na soluble	Na soluble
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	inicial	final
AM 100	1	9.2	9.3	9.5	9.2	9.5	44.2	17.0	15.3	13.5	10.6	9130.43	1391.30
AM 100	2	9.2	9.3	9.5	9.3	9.6	42.5	14.5	16.0	12.5	9.1	6086.96	1347.83
AM 100	3	9.1	9.4	9.5	9.5	9.7	16.3	9.9	7.6	8.0	6.0	1739.13	1000.00
AT	1	10.0	9.9	10.1	10.0	10.1	54.7	38.6	19.9	14.1	9.6	11304.35	1434.78
AT	2	10.1	10.0	10.2	9.9	10.1	27.0	44.1	7.1	30.1	21.3	3434.78	2782.61
AT	3	10.0	10.0	10.1	9.9	10.0	58.3	43.8	37.9	21.9	12.1	10434.78	2217.39
AYM 200	1	8.9	9.2	8.8	9.3	9.4	25.5	9.7	7.72	8.0	8.5	3086.96	1000.00
AYM 200	2	9.0	9.3	9.5	9.3	9.4	14.8	8.7	10.2	9.8	8.3	1739.13	913.04
AYM 200	3	9.1	9.4	9.5	9.3	9.5	12.0	8.8	11.2	12.3	11.0	1347.83	1826.09
AYM 100	1	9.3	9.3	9.5	9.3	9.5	15.6	8.4	9.5	11.4	12.1	1739.13	1478.26
AYM 100	2	9.3	9.4	9.5	9.2	9.4	13.4	9.7	11.5	17.6	18.3	1652.17	2217.39
AYM 100	3	9.3	9.3	9.4	9.3	9.5	27.8	14.6	14.2	15.1	13	3434.78	1739.13



Los resultados que a continuación se muestran pertenecen a los análisis del sedimento después de la aplicación de los mejoradores.

Cuadro 21. Resultados finales del sedimento.

<b>Tratamiento</b>	<b>pH</b>	<b>CE</b>	<b>CIC</b>	<b>PSI</b>	<b>Na soluble</b>	<b>Na intercambiable</b>
		dS m <sup>-1</sup>	Cmol <sub>(+)</sub> Kg <sup>-1</sup>	%	mmol L <sup>-1</sup>	Cmol <sub>(+)</sub> kg <sup>-1</sup>
AT	9.6	3.3	68.71	55.8	7.13	38.31
AE100	9.2	1.5	60.67	35.9	6.21	21.78
AE200	9.0	3.2	35.41	108.2	5.98	38.31
AM100	9.5	1.7	67.95	69.1	4.60	46.96
AM200	9.5	2.2	60.48	81.2	21.16	49.13
AY100	9.1	5.7	62.78	74.8	8.97	46.96
AY200	8.2	3.5	41.15	198.2	5.75	81.57
AYM100	9.6	2.8	66.42	106.5	12.19	70.75
AYM200	9.5	3.0	59.72	118.5	5.06	70.75
MT	9.5	1.0	61.25	129.6	2.30	79.40
ME100	9.4	2.1	48.62	65.5	7.36	31.83
ME200	9.3	3.1	58.76	102.0	17.48	59.94
MM100	9.7	0.9	48.42	52.3	3.68	25.34
MM200	9.6	1.3	56.46	106.2	4.37	59.94
MY100	9.0	3.3	42.87	99.5	10.35	42.64
MY200	8.3	4.2	37.32	201.2	11.50	75.08
MYM100	9.8	1.3	40.00	182.3	2.99	72.92
MYM200	9.7	1.2	61.25	150.8	3.22	92.38
BT	9.4	0.5	55.70	130.9	174.80	72.92
BE100	9.3	2.4	54.55	38.3	13.57	20.92
BE200	9.2	3.2	44.79	148.3	16.33	66.43
BM100	9.5	0.9	54.36	118.2	3.22	64.27
BM200	9.2	1.0	48.23	133.2	5.75	64.27
BY100	9.3	2.0	43.07	174.3	5.98	75.08
BY200	8.4	4.1	30.43	175.6	11.50	53.45
BYM100	9.3	1.2	50.34	127.7	19.55	64.27
BYM200	9.2	3.0	44.02	170.5	4.37	75.08

## ANEXO 2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los análisis de varianza se realizaron en una hoja de cálculo programada de Excel 13. Utilizando un diseño completamente al azar, este procedimiento ejecuta un análisis de varianza de un factor para la variable dependiente a analizar. Construye varias pruebas para comparar los valores medios de la variable dependiente para los diferentes tratamientos. La prueba-F en las tablas de ANOVA mostrarán si hay diferencias significativas entre las medias. Si las hay, con la prueba de rangos múltiples de Tukey a un nivel de significancia de 0.05 se determinan cuáles medias son significativamente diferentes de otras y con ello el mejor tratamiento del experimento. Las claves de los tratamientos se muestran como:

Clave	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
Tratamiento	T	E100	E200	M100	M200	Y100	Y200	YM100	YM200

### Análisis estadístico del comportamiento de pH en los lixiviados

ANOVA DE LA PARTE BAJA						
F.V.	GL	SC	CM	F	Ft (5%)	Ft (1%)
TRAT	8	3.425	0.428148	<b>31.243</b>	2.51	3.71
ERROR	18	0.247	0.013704			
TOTAL	26	3.672				

Comparación de tratamientos de la parte baja por el método de diferencia mínima significativa (DSM). DMS = 0.122974492

T1-T2	T1-T3	T1-T4	T1-T5	T1-T6	T1-T7	T1-T8	T1-T9
0.97	0.93	0.53	0.70	0.53	1.33	0.43	0.63
*	*	*	*	*	*	*	*
T2-T3	T2-T4	T2-T5	T2-T6	T2-T7	T2-T8	T2-T9	
-0.03	-0.43	-0.27	-0.43	0.37	-0.53	-0.33	
N.S.	*	*	*	*	*	*	
T3-T4	T3-T5	T3-T6	T3-T7	T3-T8	T3-T9		
-0.40	-0.23	-0.40	0.40	-0.50	-0.30		
*	*	*	*	*	*		
T4-T5	T4-T6	T4-T7	T4-T8	T4-T9			

0.17	0.00	0.80	-0.10	0.10
*	N.S.	*	N.S.	N.S.
T5-T6	T5-T7	T5-T8	T5-T9	
-0.17	0.63	-0.27	-0.07	
*	*	*	N.S.	
T6-T7	T6-T8	T6-T9		
0.80	-0.10	0.10		
*	N.S.	N.S.		
T7-T8	T7-T9			
-0.90	-0.70			
*	*			
T8-T9				
0.20				
*				

N.S. = No significativo

\* = Significativo

### ANOVA DE LA PARTE MEDIA

F.V.	GL	SC	CM	F	Ft (5%)	Ft (1%)
TRAT	8	3.000	0.375	<b>36.16</b>	2.51	3.71
ERROR	18	0.187	0.01037037			
TOTAL	26	3.187				

Comparación de tratamientos de la parte media por el método de diferencia mínima significativa (DSM). DMS = 0.106977684

T1-T2	T1-T3	T1-T4	T1-T5	T1-T6	T1-T7	T1-T8	T1-T9
0.97	0.87	0.43	0.73	0.23	1.03	0.33	0.60
*	*	*	*	*	*	*	*
T2-T3	T2-T4	T2-T5	T2-T6	T2-T7	T2-T8	T2-T9	
-0.10	-0.53	-0.23	-0.73	0.07	-0.63	-0.37	
N.S.	*	*	*	N.S.	*	*	
T3-T4	T3-T5	T3-T6	T3-T7	T3-T8	T3-T9		
-0.43	-0.13	-0.63	0.17	-0.53	-0.27		
*	*	*	*	*	*		
T4-T5	T4-T6	T4-T7	T4-T8	T4-T9			
0.30	-0.20	0.60	-0.10	0.17			
*	*	*	N.S.	*			
T5-T6	T5-T7	T5-T8	T5-T9				
-0.50	0.30	-0.40	-0.13				
*	*	*	*				
T6-T7	T6-T8	T6-T9					
0.80	0.10	0.37					
*	N.S.	*					
T7-T8	T7-T9						
-0.70	-0.43						
*	*						
T8-T9							
0.27							
*							

N.S. = No significativo

\* = Significativo

<b>ANOVA DE LA PARTE ALTA</b>						
F.V.	GL	SC	CM	F	Ft (5%)	Ft (1%)
TRAT	8	3.434	0.42925926	96.5833333	2.51	3.71
ERROR	18	0.080	0.00444444			
TOTAL	26	3.514				

Comparación de tratamientos de la parte alta por el método de diferencia mínima significativa (DSM). DMS = 0.070033333

T1-T2	T1-T3	T1-T4	T1-T5	T1-T6	T1-T7	T1-T8	T1-T9
1.00	0.97	0.47	0.67	0.30	1.23	0.60	0.63
*	*	*	*	*	*	*	*
T2-T3	T2-T4	T2-T5	T2-T6	T2-T7	T2-T8	T2-T9	
-0.03	-0.53	-0.33	-0.70	0.23	-0.40	-0.37	
N.S.	*	*	*	*	*	*	
T3-T4	T3-T5	T3-T6	T3-T7	T3-T8	T3-T9		
-0.50	-0.30	-0.67	0.27	-0.37	-0.33		
*	*	*	*	*	*		
T4-T5	T4-T6	T4-T7	T4-T8	T4-T9			
0.20	-0.17	0.77	0.13	0.17			
*	*	*	*	*			
T5-T6	T5-T7	T5-T8	T5-T9				
-0.37	0.57	-0.07	-0.03				
*	*	N.S.	N.S.				
T6-T7	T6-T8	T6-T9					
0.93	0.30	0.33					
*	*	*					
T7-T8	T7-T9						
-0.63	-0.60						
*	*						
T8-T9							
0.03							
N.S.							

N.S. = No significativo

\* = Significativo

## Análisis estadístico del comportamiento de CE en los lixiviados

ANOVA DE LA PARTE BAJA						
F.V.	GL	SC	CM	F	Ft(5%)	Ft(1%)
TRAT	8	658.694	82.336737	<b>5.40</b>	2.51	3.71
ERROR	18	274.412	15.2451259			
TOTAL	26	933.106				

Comparación de tratamientos de la parte baja por el método de diferencia mínima significativa (DSM). DMS = 4.101678014

T1-T2	T1-T3	T1-T4	T1-T5	T1-T6	T1-T7	T1-T8	T1-T9
-3.33	-10.50	1.47	3.13	4.53	6.96	3.23	4.13
N.S.	*	N.S.	N.S.	*	*	N.S.	*
T2-T3	T2-T4	T2-T5	T2-T6	T2-T7	T2-T8	T2-T9	
-7.17	4.80	6.47	7.87	10.29	6.57	7.47	
*	*	*	*	*	*	*	
T3-T4	T3-T5	T3-T6	T3-T7	T3-T8	T3-T9		
11.97	13.63	15.03	17.46	13.73	14.63		
*	*	*	*	*	*		
T4-T5	T4-T6	T4-T7	T4-T8	T4-T9			
1.67	3.07	5.49	1.77	2.67			
N.S.	N.S.	*	N.S.	N.S.			
T5-T6	T5-T7	T5-T8	T5-T9				
1.40	3.83	0.10	1.00				
N.S.	N.S.	N.S.	N.S.				
T6-T7	T6-T8	T6-T9					
2.43	-1.30	-0.40					
N.S.	N.S.	N.S.					
T7-T8	T7-T9						
-3.73	-2.83						
N.S.	N.S.						
T8-T9							
0.90							
N.S.							

N.S. = No significativo

\* = Significativo

ANOVA DE LA PARTE MEDIA						
F.V.	GL	SC	CM	F	Ft(5%)	Ft(1%)
TRAT	8	539.612	67.4514815	<b>2.30</b>	2.51	3.71
ERROR	18	528.240	29.3466667			
TOTAL	26	1067.852				

Comparación de tratamientos de la parte media por el método de diferencia mínima significativa (DSM). DMS = 5.690827825

T1-T2	T1-T3	T1-T4	T1-T5	T1-T6	T1-T7	T1-T8	T1-T9
4.93	-6.17	8.50	8.50	4.83	1.53	7.60	3.50
N.S.	*	*	*	N.S.	N.S.	*	N.S.
T2-T3	T2-T4	T2-T5	T2-T6	T2-T7	T2-T8	T2-T9	
-11.10	3.57	3.57	-0.10	-3.40	2.67	-1.43	
*	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	
T3-T4	T3-T5	T3-T6	T3-T7	T3-T8	T3-T9		
14.67	14.67	11.00	7.70	13.77	9.67		
*	*	*	*	*	*		
T4-T5	T4-T6	T4-T7	T4-T8	T4-T9			
0.00	-3.67	-6.97	-0.90	-5.00			
N.S.	N.S.	*	N.S.	N.S.			
T5-T6	T5-T7	T5-T8	T5-T9				
-3.67	-6.97	-0.90	-5.00				
N.S.	*	N.S.	N.S.				
T6-T7	T6-T8	T6-T9					
-3.30	2.77	-1.33					
N.S.	N.S.	N.S.					
T7-T8	T7-T9						
6.07	1.97						
*	N.S.						
T8-T9							
-4.10							
N.S.							

N.S. = No significativo

\* = Significativo

#### ANOVA DE LA PARTE ALTA

F.V.	GL	SC	CM	F	Ft (5%)	Ft (1%)
TRAT	8	745.563	93.1953704	<b>9.29303</b>	2.51	3.71
ERROR	18	180.513	10.0285185			
TOTAL	26	926.076				

Comparación de tratamientos de la parte alta por el método de diferencia mínima significativa (DSM). DMS = 3.326706197

T1-T2	T1-T3	T1-T4	T1-T5	T1-T6	T1-T7	T1-T8	T1-T9
-2.93	-11.83	5.77	5.63	3.10	-1.03	-0.13	5.07
N.S.	*	*	*	N.S.	N.S.	N.S.	*
T2-T3	T2-T4	T2-T5	T2-T6	T2-T7	T2-T8	T2-T9	
-8.90	8.70	8.57	6.03	1.90	2.80	8.00	
*	*	*	*	N.S.	N.S.	*	
T3-T4	T3-T5	T3-T6	T3-T7	T3-T8	T3-T9		
17.60	17.47	14.93	10.80	11.70	16.90		
*	*	*	*	*	*		
T4-T5	T4-T6	T4-T7	T4-T8	T4-T9			
-0.13	-2.67	-6.80	-5.90	-0.70			
N.S.	N.S.	*	*	N.S.			

T5-T6	T5-T7	T5-T8	T5-T9
-2.53	-6.67	-5.77	-0.57
N.S.	*	*	N.S.
T6-T7	T6-T8	T6-T9	
-4.13	-3.23	1.97	
*	N.S.	N.S.	
T7-T8	T7-T9		
0.90	6.10		
N.S.	*		
T8-T9			
5.20			
*			

N.S. = No significativo

\* = Significativo

### Análisis estadístico de la fase experimental

ANOVA DE pH DE LA PARTE ALTA						
F.V.	GL	SC	CM	F	Ft (5%)	Ft (1%)
TRAT	8	4.867	0.60833333	<b>60.83</b>	2.51	3.71
ERROR	18	0.180	0.01			
TOTAL	26	5.047				

Comparación de pH de tratamientos de la parte alta por el método de diferencia mínima significativa (DSM). DMS = 0.10505

T1-T2	T1-T3	T1-T4	T1-T5	T1-T6	T1-T7	T1-T8	T1-T9
0.40	0.60	0.10	0.10	0.50	1.40	0.00	0.10
*	*	N.S.	N.S.	*	*	N.S.	N.S.
T2-T3	T2-T4	T2-T5	T2-T6	T2-T7	T2-T8	T2-T9	
0.20	-0.30	-0.30	0.10	1.00	-0.40	-0.30	
*	*	*	N.S.	*	*	*	
T3-T4	T3-T5	T3-T6	T3-T7	T3-T8	T3-T9		
-0.50	-0.50	-0.10	0.80	-0.60	-0.50		
*	*	N.S.	*	*	*		
T4-T5	T4-T6	T4-T7	T4-T8	T4-T9			
0.00	0.40	1.30	-0.10	0.00			
N.S.	*	*	N.S.	N.S.			
T5-T6	T5-T7	T5-T8	T5-T9				
0.40	1.30	-0.10	0.00				
*	*	N.S.	N.S.				
T6-T7	T6-T8	T6-T9					
0.90	-0.50	-0.40					
*	*	*					
T7-T8	T7-T9						
-1.40	-1.30						
*	*						
T8-T9							
0.10							
N.S.							

N.S. = No significativo

\* = Significativo

<b>ANOVA DE CE DE LA PARTE ALTA</b>						
F.V.	GL	SC	CM	F	Ft (5%)	Ft (1%)
TRAT	8	36.867	4.60833333	<b>460.83</b>	2.51	3.71
ERROR	18	0.180	0.01			
TOTAL	26	37.047				

Comparación de CE de tratamientos de la parte alta por el método de diferencia mínima significativa (DSM). DMS = 0.10505

T1-T2	T1-T3	T1-T4	T1-T5	T1-T6	T1-T7	T1-T8	T1-T9
1.80	0.10	1.60	1.10	-2.40	-0.20	0.50	0.30
*	*	N.S.	N.S.	*	*	N.S.	N.S.
T2-T3	T2-T4	T2-T5	T2-T6	T2-T7	T2-T8	T2-T9	
-1.70	-0.20	-0.70	-4.20	-2.00	-1.30	-1.50	
*	*	*	N.S.	*	*	*	
T3-T4	T3-T5	T3-T6	T3-T7	T3-T8	T3-T9		
1.50	1.00	-2.50	-0.30	0.40	0.20		
*	*	N.S.	*	*	*		
T4-T5	T4-T6	T4-T7	T4-T8	T4-T9			
-0.50	-4.00	-1.80	-1.10	-1.30			
*	*	*	N.S.	N.S.			
T5-T6	T5-T7	T5-T8	T5-T9				
-3.50	-1.30	-0.60	-0.80				
*	*	N.S.	N.S.				
T6-T7	T6-T8	T6-T9					
2.20	2.90	2.70					
*	*	*					
T7-T8	T7-T9						
0.70	0.50						
*	*						
T8-T9							
-0.20							
N.S.							

N.S. = No significativo

\* = Significativo

<b>ANOVA DE Na soluble DE LA PARTE ALTA</b>						
F.V.	GL	SC	CM	F	Ft(5%)	Ft(1%)
TRAT	8	666.469	83.3086833	<b>83.31</b>	2.51	3.71
ERROR	18	18.000	1			
TOTAL	26	684.469				



Comparación de Na soluble de tratamientos de la parte alta por el método de diferencia mínima significativa (DSM). DMS = 1.0505

T1-T2	T1-T3	T1-T4	T1-T5	T1-T6	T1-T7	T1-T8	T1-T9
0.92	1.15	2.53	-14.03	-1.84	1.38	-5.06	2.07
N.S.	*	*	*	*	*	*	*
T2-T3	T2-T4	T2-T5	T2-T6	T2-T7	T2-T8	T2-T9	
0.23	1.61	-14.95	-2.76	0.46	-5.98	1.15	
N.S.	*	*	*	N.S.	*	*	
T3-T4	T3-T5	T3-T6	T3-T7	T3-T8	T3-T9		
1.38	-15.18	-2.99	0.23	-6.21	0.92		
*	*	*	N.S.	*	N.S.		
T4-T5	T4-T6	T4-T7	T4-T8	T4-T9			
-16.56	-4.37	-1.15	-7.59	-0.46			
*	*	*	*	N.S.			
T5-T6	T5-T7	T5-T8	T5-T9				
12.19	15.41	8.97	16.10				
*	*	*	*				
T6-T7	T6-T8	T6-T9					
3.22	-3.22	3.91					
*	*	*					
T7-T8	T7-T9						
-6.44	0.69						
*	N.S.						
T8-T9							
7.13							
*							

N.S. = No significativo

\* = Significativo

#### ANOVA DE pH DE LA PARTE MEDIA

F.V.	GL	SC	CM	F	Ft(5%)	Ft(1%)
TRAT	8	5.280	0.66	<b>66.00</b>	2.51	3.71
ERROR	18	0.180	0.01			
TOTAL	26	5.460				

Comparación de pH de tratamientos de la parte alta por el método de diferencia mínima significativa (DSM). DMS = 0.10505

T1-T2	T1-T3	T1-T4	T1-T5	T1-T6	T1-T7	T1-T8	T1-T9
0.10	0.20	-0.20	-0.10	0.50	1.20	-0.30	-0.20
*	*	N.S.	N.S.	*	*	N.S.	N.S.

T2-T3	T2-T4	T2-T5	T2-T6	T2-T7	T2-T8	T2-T9
0.10	-0.30	-0.20	0.40	1.10	-0.40	-0.30
*	*	*	N.S.	*	*	*
T3-T4	T3-T5	T3-T6	T3-T7	T3-T8	T3-T9	
-0.40	-0.30	0.30	1.00	-0.50	-0.40	
*	*	N.S.	*	*	*	
T4-T5	T4-T6	T4-T7	T4-T8	T4-T9		
0.10	0.70	1.40	-0.10	0.00		
N.S.	*	*	N.S.	N.S.		
T5-T6	T5-T7	T5-T8	T5-T9			
0.60	1.30	-0.20	-0.10			
*	*	N.S.	N.S.			
T6-T7	T6-T8	T6-T9				
0.70	-0.80	-0.70				
*	*	*				
T7-T8	T7-T9					
-1.50	-1.40					
*	*					
T8-T9						
0.10						
N.S.						

N.S. = No significativo

\* = Significativo

#### ANOVA DE CE DE LA PARTE MEDIA

F.V.	GL	SC	CM	F	Ft(5%)	Ft(1%)
TRAT	8	34.687	4.33583333	<b>36.13</b>	2.51	3.71
ERROR	18	2.160	0.12			
TOTAL	26	36.847				

Comparación de CE de tratamientos de la parte media por el método de diferencia mínima significativa (DSM). DMS = 0.363903875

T1-T2	T1-T3	T1-T4	T1-T5	T1-T6	T1-T7	T1-T8	T1-T9
-1.10	-2.10	0.10	-0.30	-2.30	-3.20	-0.30	-0.20
*	*	*	N.S.	*	*	N.S.	N.S.
T2-T3	T2-T4	T2-T5	T2-T6	T2-T7	T2-T8	T2-T9	
-1.00	1.20	0.80	-1.20	-2.10	0.80	0.90	
*	*	*	*	*	*	*	
T3-T4	T3-T5	T3-T6	T3-T7	T3-T8	T3-T9		
2.20	1.80	-0.20	-1.10	1.80	1.90		
*	*	*	*	*	*		
T4-T5	T4-T6	T4-T7	T4-T8	T4-T9			
-0.40	-2.40	-3.30	-0.40	-0.30			
*	*	*	*	N.S.			
T5-T6	T5-T7	T5-T8	T5-T9				
-2.00	-2.90	0.00	0.10				
*	*	N.S.	N.S.				
T6-T7	T6-T8	T6-T9					

-0.90	2.00	2.10
*	*	*
T7-T8	T7-T9	
2.90	3.00	
*	*	
T8-T9		
0.10		
N.S.		

N.S. = No significativo

\* = Significativo

### ANOVA DE Na soluble DE LA PARTE MEDIA

F.V.	GL	SC	CM	F	Ft(5%)	Ft(1%)
TRAT	8	635.470	79.4337583	<b>79.43</b>	2.51	3.71
ERROR	18	18.000	1			
TOTAL	26	653.470				

Comparación de Na soluble de tratamientos de la parte media por el método de diferencia mínima significativa (DSM). DMS = 1.0505

T1-T2	T1-T3	T1-T4	T1-T5	T1-T6	T1-T7	T1-T8	T1-T9
-5.06	-15.18	-1.38	-2.07	-8.05	-9.20	-0.69	-0.92
*	*	N.S.	N.S.	*	*	N.S.	N.S.
T2-T3	T2-T4	T2-T5	T2-T6	T2-T7	T2-T8	T2-T9	
-10.12	3.68	2.99	-2.99	-4.14	4.37	4.14	
*	*	*	N.S.	*	*	*	
T3-T4	T3-T5	T3-T6	T3-T7	T3-T8	T3-T9		
13.80	13.11	7.13	5.98	14.49	14.26		
*	*	N.S.	*	*	*		
T4-T5	T4-T6	T4-T7	T4-T8	T4-T9			
-0.69	-6.67	-7.82	0.69	0.46			
N.S.	*	*	N.S.	N.S.			
T5-T6	T5-T7	T5-T8	T5-T9				
-5.98	-7.13	1.38	1.15				
*	*	N.S.	N.S.				
T6-T7	T6-T8	T6-T9					
-1.15	7.36	7.13					
*	*	*					
T7-T8	T7-T9						
8.51	8.28						
*	*						
T8-T9							
-0.23							
N.S.							

N.S. = No significativo

\* = Significativo

<b>ANOVA DE pH DE LA PARTE BAJA</b>						
F.V.	GL	SC	CM	F	Ft (5%)	Ft (1%)
TRAT	8	2.400	0.3	<b>30.00</b>	2.51	3.71
ERROR	18	0.180	0.01			
TOTAL	26	2.580				

Comparación de pH de tratamientos de la parte baja por el método de diferencia mínima significativa (DSM). DMS = 0.10505

T1-T2	T1-T3	T1-T4	T1-T5	T1-T6	T1-T7	T1-T8	T1-T9
0.10	0.20	-0.10	0.20	0.10	1.00	0.10	0.20
*	*	N.S.	N.S.	*	*	N.S.	N.S.
T2-T3	T2-T4	T2-T5	T2-T6	T2-T7	T2-T8	T2-T9	
0.10	-0.20	0.10	0.00	0.90	0.00	0.10	
*	*	*	N.S.	*	*	*	
T3-T4	T3-T5	T3-T6	T3-T7	T3-T8	T3-T9		
-0.30	0.00	-0.10	0.80	-0.10	0.00		
*	*	N.S.	*	*	*		
T4-T5	T4-T6	T4-T7	T4-T8	T4-T9			
0.30	0.20	1.10	0.20	0.30			
N.S.	*	*	N.S.	N.S.			
T5-T6	T5-T7	T5-T8	T5-T9				
-0.10	0.80	-0.10	0.00				
*	*	N.S.	N.S.				
T6-T7	T6-T8	T6-T9					
0.90	0.00	0.10					
*	N.S.	N.S.					
T7-T8	T7-T9						
-0.90	-0.80						
*	*						
T8-T9							
0.10							
N.S.							

N.S. = No significativo

\* = Significativo

<b>ANOVA DE CE DE LA PARTE BAJA</b>						
F.V.	GL	SC	CM	F	Ft (5%)	Ft (1%)
TRAT	8	36.300	4.5375	<b>453.75</b>	2.51	3.71
ERROR	18	0.180	0.01			
TOTAL	26	36.480				

Comparación de CE de tratamientos de la parte baja por el método de diferencia mínima significativa (DSM). DMS = 0.10505

T1-T2	T1-T3	T1-T4	T1-T5	T1-T6	T1-T7	T1-T8	T1-T9
-1.90	-2.70	-0.40	-0.50	-1.50	-3.60	-0.70	-2.50
*	*	N.S.	N.S.	*	*	N.S.	N.S.
T2-T3	T2-T4	T2-T5	T2-T6	T2-T7	T2-T8	T2-T9	
-0.80	1.50	1.40	0.40	-1.70	1.20	-0.60	
*	*	*	N.S.	*	*	*	
T3-T4	T3-T5	T3-T6	T3-T7	T3-T8	T3-T9		
2.30	2.20	1.20	-0.90	2.00	0.20		
*	*	N.S.	*	*	*		
T4-T5	T4-T6	T4-T7	T4-T8	T4-T9			
-0.10	-1.10	-3.20	-0.30	-2.10			
N.S.	*	*	N.S.	N.S.			
T5-T6	T5-T7	T5-T8	T5-T9				
-1.00	-3.10	-0.20	-2.00				
*	*	N.S.	N.S.				
T6-T7	T6-T8	T6-T9					
-2.10	0.80	-1.00					
*	*	*					
T7-T8	T7-T9						
2.90	1.10						
*	*						
T8-T9							
-1.80							
N.S.							

N.S. = No significativo

\* = Significativo

#### ANOVA DE Na soluble DE LA PARTE BAJA

F.V.	GL	SC	CM	F	Ft(5%)	Ft(1%)
TRAT	8	73168.882	9146.11023	<b>10289.25</b>	2.51	3.71
ERROR	18	16.000	0.8889			
TOTAL	26	73184.882				

Comparación de Na soluble de tratamientos de la parte baja por el método de diferencia mínima significativa (DSM). DMS = 0.990427088

T1-T2	T1-T3	T1-T4	T1-T5	T1-T6	T1-T7	T1-T8	T1-T9
161.23	158.47	171.58	169.05	168.82	163.30	155.25	170.43
*	*	N.S.	N.S.	*	*	N.S.	N.S.
T2-T3	T2-T4	T2-T5	T2-T6	T2-T7	T2-T8	T2-T9	
-2.76	10.35	7.82	7.59	2.07	-5.98	9.20	
*	*	*	N.S.	*	*	*	
T3-T4	T3-T5	T3-T6	T3-T7	T3-T8	T3-T9		
13.11	10.58	10.35	4.83	-3.22	11.96		
*	*	N.S.	*	*	*		
T4-T5	T4-T6	T4-T7	T4-T8	T4-T9			

-2.53	-2.76	-8.28	-16.33	-1.15
N.S.	*	*	N.S.	N.S.
T5-T6	T5-T7	T5-T8	T5-T9	
-0.23	-5.75	-13.80	1.38	
*	*	N.S.	N.S.	
T6-T7	T6-T8	T6-T9		
-5.52	-13.57	1.61		
*	*	*		
T7-T8	T7-T9			
-8.05	7.13			
*	*			
T8-T9				
15.18				
N.S.				

---

N.S. = No significativo

\* = Significativo