



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

**“Estudio del problema de salinidad en una
parcela de Teoloyucan, Estado de México:
Caracterización química, física y propuesta de
un método de rehabilitación.”**

TESIS
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO AGRICOLA
PRESENTA:
REGINA PATRICIA MELÉNDEZ NAVAS

Asesor
Dr. Arturo Aguirre Gómez
Coasesor
M.C. Roberto García Fragoso



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por permitirme cumplir mis metas de formación profesional y a la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán por abrirme sus puertas y brindarme la oportunidad de forjarme en sus aulas.

Al Dr. Arturo Aguirre por su apoyo, asesoría, interés y confianza al permitirme realizar este proyecto y llenarme de sus conocimientos y enseñanzas.

Al M.C Roberto García por todo el tiempo e interés invertido en este proyecto, por siempre apoyarme y escucharme.

A mis profesores por guiarme durante todos mis estudios universitarios y en especial a Yazmín Cuervo por ser más que mi profesora y convertirse en mi amiga y Roberto Gama por todo su apoyo, enseñanza y cariño.

A los sinodales que integran el jurado por su tiempo, colaboración y valiosos comentarios para el termino y logro de este proyecto.

Dedicatorias

A dios por siempre cuidarme, estar a mi lado y guiar mi camino en todo momento.

A mis padres Roberto y Reina por todo su amor, cariño, confianza, paciencia, por darme la vida y enseñarme a vivirla, por darme la libertad de ser y hacer lo que yo quería, por estar conmigo durante toda esta carrera, este logro es de ustedes y para ustedes porque sin su apoyo nunca lo hubiera logrado los amo.

A mis hermanas Lorena y Alejandra por siempre estar conmigo, por todos los buenos momentos que hemos vivido, por estar juntas en los no tan buenos, por ser parte de esta gran familia las quiero.

A mis segundas hermanas Etna y Patricia por todos estos años juntas, por estar conmigo en cada batalla perdida y ganada, por su amistad, consejos, lágrimas y risas, por permitirme conocerlas y porque siempre estemos juntas.

A mis amigas y amigos en especial Nancy, Sara, Alma, Iván, Einar, Oscar, Diego y Rafael por compartir libros, aulas, sillas, conocimientos, alegrías y tristezas, por aceptarme y quererme tal y como soy.

A mis chaparritas Natalia y Sonia por haber estado juntas durante toda la carrera sin importar nada ni nadie, por apoyarme y vivir conmigo esta vida que tenemos juntas, por compartir conmigo todo lo que son y porque nunca dejemos de ser amigas, las quiero.

A ti Bruno Gama por ser mi amigo, confidente, apoyo y sostén durante tantos años, por todo lo vivido, aprendido y sufrido, por los regaños y abrazos justo en el momento necesario, por ser parte de mi vida y dejarme ser parte de la tuya, por compartir conmigo todo lo bueno y no tan bueno, gracias por todo el cariño y amor brindado, te adoro.

ÍNDICE

I INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos e hipótesis	3
1.2 Antecedentes	4
1.3 Descripción de la zona de estudio	5
1.3.1 Geográfica	5
1.3.2 Climática	6
1.3.3 Económica	6
1.3.4 Agrícola	6
1.4 Definición de suelo	7
1.4.1 Definición y caracterización de suelos salinos	8
1.4.2 Efectos de la salinidad	9
1.4.2.1 Germinación	10
1.4.2.2 Emergencia y crecimiento	10
1.4.2.3 Clorofila	11
1.4.2.4 Dispersión de suelos	12
1.5 Rehabilitación de suelos	13
1.5.1 Lavado	13
1.5.2 Yeso	14
1.5.3 Otros materiales de rehabilitación	15
1.6 Importancia de las propiedades analizadas	16
1.6.1 pH	16
1.6.2 Conductividad eléctrica	16
1.6.3 Materia orgánica	17
1.6.4 Calcio más magnesio	18
1.6.5 Capacidad de intercambio catiónico	19
1.6.6 Carbonatos en suelo	19
1.6.7 Porcentaje de saturación	20
1.6.8 Densidad aparente	20
1.6.9 Textura	21
II MATERIALES Y MÉTODOS	
2.1 Condiciones de experimentación	22
2.2 Muestreo de suelo	22
2.3 Manejo de las muestras	23
2.3.1 Secado	23

2.3.2 <i>Molido</i>	24
2.3.3 <i>Tamizado</i>	24
2.3.4 <i>Homogeneizado</i>	24
2.3.5 <i>Almacenamiento</i>	24
2.4 Caracterización química y física de las muestras de suelo	24
2.4.1 <i>Pasta y extracto de saturación</i>	25
2.4.2 <i>pH</i>	25
2.4.3 <i>Conductividad eléctrica (CE)</i>	26
2.4.4 <i>Porcentaje de materia orgánica</i>	26
2.4.5 <i>Concentración de calcio más magnesio solubles</i>	27
2.4.6 <i>Capacidad de intercambio catiónico</i>	28
2.4.7 <i>Concentración de carbonatos en suelo</i>	29
2.4.8 <i>Concentración de aniones en extracto de saturación (cloruro, sulfato y fosfato)</i>	29
2.4.9 <i>Porcentaje de saturación</i>	30
2.4.10 <i>Densidad aparente</i>	30
2.4.11 <i>Textura</i>	31
2.5 Diseño experimental	32
2.5.1 <i>Tratamientos de rehabilitación</i>	32
2.5.2 <i>Bioensayos</i>	37
2.5.2.1 <i>Variedad puma 1076</i>	38
III RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
3.1 Resultados del análisis químico y físico del suelo	39
3.1.1 <i>pH y acidez</i>	39
3.1.2 <i>Conductividad eléctrica</i>	41
3.1.3 <i>Porcentaje de materia orgánica</i>	43
3.1.4 <i>Calcio más magnesio</i>	45
3.1.5 <i>Capacidad de intercambio catiónico</i>	47
3.1.6 <i>Carbonatos en suelo</i>	49
3.1.7 <i>Porcentaje de Sodio Intercambiable, PSI</i>	51
3.1.8 <i>Aniones solubles</i>	53
3.1.8.1 <i>Cloruros</i>	53
3.1.8.2 <i>Sulfatos</i>	55
3.1.8.3 <i>Clasificación salina con base en relaciones aniónicas</i>	56
3.1.8.4 <i>Fosfatos</i>	57
3.1.9 <i>Porcentaje de saturación</i>	59
3.1.10 <i>Densidad aparente</i>	60

3.1.11 <i>Textura</i>	62
3.2 Pruebas biológicas vs. Rehabilitación	63
3.2.1 <i>Porcentaje de germinación</i>	63
3.2.2 <i>Altura de la planta</i>	63
3.2.3 <i>Grosor de tallo</i>	64
3.2.4 <i>Clorofila</i>	65
3.2.5 <i>Longitud de raíz</i>	66
3.2.6 <i>Masa seca y masa fresca</i>	67
3.2.7 <i>Análisis cualitativo de los individuos experimentales</i>	68
3.2.8 <i>Transferencia a campo</i>	70
3.2.9 <i>Resumen de resultados</i>	71
IV CONCLUSIONES	72
V BIBLIOGRAFÍA	73
VI ANEXOS	76

I INTRODUCCIÓN

Una de las áreas en las que se aplican los conocimientos adquiridos por el Ingeniero Agrícola, durante su formación, está enfocada al estudio, caracterización y aprovechamiento de los suelos.

El suelo es una colección de cuerpos naturales formados por sólidos (minerales y orgánicos), líquidos y gases, sobre la superficie de los terrenos. Presenta, ya sea, horizontes o capas, que se diferencian del material de origen como resultado de adiciones, pérdidas, migraciones y transformaciones de energía y materia; o por la habilidad de soportar raíces de plantas en un ambiente natural (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT] 2000).

La fertilidad del suelo es una cualidad resultante de la interacción entre las características físicas, químicas y biológicas del mismo, que consiste en la capacidad de poder suministrar condiciones necesarias para el crecimiento y desarrollo de las plantas. En México y en el mundo hay diferentes tipos de suelos algunos de ellos aptos para la agricultura y otros no, uno de los grandes problemas en el mundo es el suelo salino que es aquel que contiene suficientes sales solubles como para reducir el crecimiento y desarrollo de las plantas, con conductividades eléctricas iguales o mayores a 4 dS m^{-1} , en México es importante estudiar este tipo de suelos ya que cuenta con una gran extensión de desiertos en el norte del país, por lo que es necesario estudiarlos para poder establecer métodos de rehabilitación, para su óptimo aprovechamiento (López, 1985).

Para realizar estudios con el propósito de evaluar salinidad de los suelos y remediarla, se aplican procedimientos de muestreo en campo, determinaciones analíticas para posteriormente elaborar las interpretaciones respectivas a los análisis y el planteamiento de rehabilitación correspondiente (Gómez, 2004).

El estudio de los suelos puede depender de los programas de fertilización, desalinización y/o clasificación, entre otros. Como cada estudio de suelos tiene particularidades, es difícil en la mayoría de los casos, mantener la misma

metodología para la recolección de muestras y la obtención de resultados de campo, por lo que conviene planear cuidadosamente su proceso, los cuales pueden modificarse de acuerdo con los fines del estudio, el criterio agronómico del investigador y los intereses personales y económicos de quienes necesitan los resultados que se obtendrán (López, 1985).

En el presente trabajo se realizó el muestreo y análisis de un suelo salino para caracterizarlo y proponer diferentes métodos de rehabilitación que generen un aprovechamiento agrícola de una parcela en específico, que en algún momento puedan aplicarse a terrenos con problemas similares según sus necesidades.

1.1 Objetivos e hipótesis

Objetivo general

Realizar los estudios de caracterización física y química asociados con la salinidad de suelos y plantear un tratamiento de rehabilitación, en beneficio de los productores agrícolas de Teoloyucan, Estado de México.

Objetivos particulares

- Caracterizar física y químicamente las muestras de suelo salino, llevando a cabo determinaciones específicas.
- Diseñar estrategias de rehabilitación para disminuir la salinidad del suelo basadas en tratamientos químicos evaluados bajo condiciones de invernadero.
- Proponer la transferencia de las estrategias de rehabilitación obtenidas en invernadero al campo.

Hipótesis

- Si se realiza la caracterización física y química de un suelo que presenta indicios de salinidad, entonces, se podrán diseñar y proponer métodos de rehabilitación para el incremento de rendimientos, aplicando la teoría basada en las ecuaciones de conservación de agua y sales.

1.2 Antecedentes

En 1988 el productor adquiere el terreno que se encuentra a unos 300 - 350 m de la laguna de Zumpango que en ese momento se encontraba seca y se sembraba en toda esa área, principalmente Avena, Maíz y Alfalfa.

En 1994 inicia el restablecimiento de la laguna, la cual según acuerdos con el gobierno se llenaría con 20 % de aguas residuales y 80 % de agua pluvial, pero realmente se llenó con 80 % de aguas residuales y 20 % de agua pluvial, al llenarse la laguna comienzan algunos problemas de infiltración y la baja gradual del rendimiento de la parcela (El Universal, 2009, 2010(a) (b)) y (Milenio, 2008).

En 1996 se aplica la primera remediación por medio de la aplicación de 5 ton ha⁻¹ de yeso, seguido por una siembra de maíz con la cual se obtuvo un rendimiento que el productor calificó como deficiente.

En el 2005 se inicia la construcción de la autopista circuito mexiquense la cual divide a la laguna de la parcela y empieza la compactación del suelo, lo cual conlleva al cese de las infiltraciones de agua.

En febrero del 2006 se realiza la segunda remediación aplicando 150 camiones de abono vacuno del establo del dueño, después se procedió a sembrar avena obteniendo del 30-40 % del rendimiento que las parcelas vecinas obtienen.

En agosto del 2009 el productor se acerca a la FES Cuautitlán buscando ayuda para su problema, por lo cual en ese mismo mes se realizó la primera visita a su parcela con fines de exploración de la problemática que presentaba. En septiembre de ese mismo año se realizó la segunda visita en la cual ya se llevaba un diseño de muestreo, todos los materiales necesarios para éste y su posterior traslado al laboratorio de Química Ambiental y Agrícola para su análisis y la consecuente propuesta de un método de rehabilitación.

1.3 Descripción de la zona de estudio

1.3.1 Geográfica

Teoloyucan (Figura 1) se localiza al norte del Distrito Federal, al noreste del Estado de México, en las coordenadas $19^{\circ} 45' 11''\text{N}$ y $99^{\circ} 11' 15''\text{O}$, a una altura de 2280 msnm. Limita al norte con los municipios de Coyotepec y Zumpango; al sur con Tepotzotlán, Cuautitlán Izcalli, Cuautitlán y Melchor Ocampo; al oriente con los municipios de Jaltenco, Nextlalpan y Melchor Ocampo y al poniente con los municipios de Coyotepec y Tepotzotlán (Estado de México, 2010).



Figura 1. Localización del municipio de Teoloyucan

1.3.2 Climática

Clima templado subhúmedo con lluvias en el verano, la temperatura media anual es de 15°C, la máxima es de 30°C, la mínima extrema es de 5°C. La precipitación pluvial máxima en 24 horas es de 46.2 mm, con un total de 598.8 mm. anual (Servicio Meteorológico Nacional, 2010).

1.3.3 Económica

El ganado predominante es el vacuno, se producen alimentos derivados de la leche. También existe la producción de ganado ovino. La industria en el municipio en 1986 era incipiente; actualmente presenta un panorama diferente. Se fabrican productos alimenticios, textiles, de papel, celulosa y cartón; derivados del petróleo, productos de caucho y plástico, productos minerales, no metálicos y metálicos, maquinaria y equipos y la industria del tabique. La industria de carrocerías y adaptaciones automotrices, tanques metálicos para el acarreo de fluidos, carrocerías de ambulancias, minibuses, autobuses urbanos, camiones de redilas y camiones para extinción de incendios. El municipio cuenta con un tianguis permanente y un mercado, ambos en la cabecera además de una gran cantidad de establecimientos comerciales que satisfacen las necesidades de la población (Estado de México, 2010).

1.3.4 Agrícola

El tipo de suelo de Teoloyucan es apto para la agricultura, en su mayoría la población se dedican a las labores del campo. Hay agricultura de temporal y de riego. Los principales cultivos son Maíz (*Zea mays*), Avena (*Avena sativa*), Trigo (*Triticum aestivum*) y Alfalfa (*Medicago sativa*), esto se da por la gran demanda que se tiene de alimento forrajero para el ganado existente en la zona y sus alrededores, también cuenta con la producción de algunas hortalizas y flores, la mayoría para su venta en el mercado local (Estado de México, 2010).

1.4 Definición de suelo

El suelo es un universo dinámico en muchas de sus características, constituyéndose en el hábitat por excelencia para las comunidades de plantas. Dentro de esas características dinámicas, el exceso o escasez de algunos factores, es limitante para el desarrollo de las plantas (Nuñez, 2000).

La composición química del suelo es muy variable de acuerdo con su génesis y su manejo, y está condicionada a la relación que existe entre el pH y los principales elementos químicos que intervienen en la fertilidad como: nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y una serie de microelementos como boro, cobre, fierro, manganeso, zinc, vanadio y selenio etc. Además existen otras propiedades químicas que influyen directamente en la fertilidad del suelo, como son, la conductividad eléctrica, por medio de la cual se pueden detectar problemas de salinidad en el suelo, ya que reduce la calidad y la producción de cultivos; y la capacidad de intercambio catiónico total, característica del suelo que determina la posibilidad de tener un depósito de iones nutritivos en el suelo a largo plazo (INEGI, 1998).

Al ser el suelo un cuerpo natural tridimensional, parte de un ecosistema, su estudio debe iniciarse en el campo, con la observación detallada y precisa, tanto del suelo en su conjunto, como del medio en el que se halla. Desde un punto de vista cartográfico y atendiendo a las aplicaciones agronómicas, ecológicas, medioambientales, en arquitectura del paisaje u otras, deberán seleccionarse y estudiarse suelos representativos de cada una de las unidades en que sea posible subdividirse (Porta, López y Roquero, 2003).

El manejo adecuado de un suelo es necesario para poder preservar su fertilidad, obtener mejores resultados y respetar el medio ambiente. Por otro lado, es necesario analizar un suelo si queremos aprovecharlo adecuadamente y saber si el cultivo deseado se desarrolla en las condiciones actuales o es necesario aplicar algún mejorador, fertilizante o abono (López, 1985).

1.4.1 Definición y caracterización de suelos salinos

La salinización del perfil de un suelo puede ser definida como el incremento en la concentración y la eventual precipitación de sales de la solución del suelo. Pueden distinguirse, además del tipo “zonal” de salinización asociado con las zonas áridas, otras formas de salinización locales o “azonales” como es la salinización costera, cuyas sales provienen del mar, ya sea por inundación directa o por la brisa acarreada tierra adentro por el viento (sales cíclicas) (Aguirre, 1993).

Los suelos en los que se produce una acumulación de sales solubles suficiente para interferir en el crecimiento de la mayoría de los cultivos y otras plantas no especializadas, se denominan suelos salinos. Aquellos suelos que contienen suficiente sodio intercambiable para que afecte adversamente a la producción de los cultivos y la estructura en la mayoría de los suelos, se denominan suelos sódicos. Aquellos que, además de ser salinos, cumplen con esta condición, se conocen como suelos salino-sódicos (Porta et al, 2003).

La incorporación de sales al suelo, además de la influencia en la concentración salina de la solución del suelo, puede alterar la composición del complejo de intercambio, incrementando típicamente el porcentaje intercambiable de los iones Na^+ ya que sus sales son las más solubles en la naturaleza. El incremento gradual de la saturación de Na^+ en el complejo de intercambio es llamado “sodicación”. La tasa con la que ocurre este proceso depende de la composición y concentración del agua añadida al perfil, de la cantidad de agua aportada anualmente y de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo. La concentración excesiva de sales solubles en la solución del suelo puede inhibir severamente el crecimiento de las plantas una vez que sus límites de tolerancia son rebasados. El mantenimiento de una producción agrícola sostenida en estas regiones requiere de un conjunto de medidas adecuadas de manejo de sales y de agua (Aguirre, 1993).

1.4.2 Efectos de la salinidad

La salinidad afecta muchos aspectos del metabolismo de las plantas, induciendo cambios en su anatomía y morfología, los cuales a menudo se consideran como adaptaciones que incrementan las oportunidades de las plantas para sobrevivir al estrés salino, aunque también son considerados signos del daño y perturbación de la fisiología normal de la planta. La salinidad afecta el periodo y tasa de germinación, la talla, ramificación, tamaño foliar y toda la anatomía de la planta. Sin embargo, el tiempo de exposición a diferentes niveles de salinidad también es importante para evaluar el efecto sobre el crecimiento y anatomía de los vegetales (Poljakooff y Gale, 1988).

La presencia de las sales solubles en el medio nutritivo puede afectar el crecimiento de dos maneras. En primer lugar, las altas concentraciones de iones específicos pueden ser tóxicas e inducir desórdenes fisiológicos. En segundo lugar, las sales solubles disminuyen el potencial osmótico del agua del medio nutritivo restringiendo así la asimilación de agua por las raíces de las planta. Este segundo efecto es menos importante ya que en cierta medida es contrarrestado debido a que las altas concentraciones salinas conducen a un incremento de la velocidad de absorción de iones, lo que disminuye el potencial del agua en las raíces de la planta, estimulando así la absorción de agua. Esto produce una mayor turgencia de las células y de los tejidos de las planta. Esta operación de mantener un balance positivo de agua es conocida con el nombre de ajuste osmótico (Aguirre, 1993).

La salinidad puede afectar diferentes procesos metabólicos, tales como la asimilación de CO₂, síntesis de proteínas, respiración, metabolismo fitohormonal, etc. Sin embargo, es difícil acertar si estas sales causan dichos efectos directamente. La toxicidad comienza con un desbalance de iones en los tejidos de la planta frecuentemente asociado con el exceso de iones de Na⁺. La planta puede soportar hasta cierto grado este exceso de Na⁺, regulando su asimilación o excretándolo. Este proceso requiere de una cantidad de energía extra y por esta razón las plantas sujetas a condiciones salinas presentan mayores valores de

respiración y reducen el almacén de azúcares en comparación con las plantas en condiciones no salinas. Bajo situaciones de alta intensidad luminosa las plantas muestran generalmente una mayor capacidad de mantener los balances iónicos en los órganos de la planta. El desbalance iónico puede asociarse a los disturbios causados en la asimilación de CO₂ y a la reducción drástica de la transformación de lípidos. La falta de energía, como una consecuencia de la salinidad, puede afectar varios procesos que requieren de ésta, tales como la asimilación de CO₂, la síntesis de proteínas o la asimilación de N inorgánico. Las condiciones salinas restringen la síntesis de citocininas en las raíces y su translocación hacia las partes superiores de la planta puede ser inhibida y la síntesis de ácido abscísico por otro lado, es promovida. Bajo un estrés severo de salinidad el citoplasma puede ser sobrecargado de iones Na⁺, por lo cual puede afectar las enzimas y los organelos presentes en el citoplasma. La mayoría de las plantas son más sensibles a la salinidad durante la germinación que en cualquier otra etapa de crecimiento (Aguirre, 1993).

1.4.2.1 Germinación

La salinidad puede afectar la germinación en dos formas: a) dificultando la absorción de agua y/o b) favoreciendo la entrada de iones en cantidades tóxicas. Sin embargo, depende del tipo de suelo y estación del año. Las altas temperaturas aceleran la germinación pero simultáneamente incrementan la evaporación y el ascenso capilar de las sales. Las bajas temperaturas pueden retardar en tal medida la germinación que las plántulas quedan atrapadas bajo la costra del suelo, en el momento de la emergencia (Terry y Waldron, 1984).

1.4.2.2 Emergencia y crecimiento

De acuerdo con Ayers (1951) la respuesta de la emergencia a la salinidad es variable entre especies. Las plantas expuestas a la salinidad se enfrentan a cuatro problemas básicos, separados o en combinación:

- 1 La menor disponibilidad de agua, con el consiguiente incremento de la presión osmótica, que las obliga a mantener una relación favorable del agua intracelular.
- 2 La toxicidad del Na^+ y otros iones que pueden interferir en los procesos bioquímicos.
- 3 El desbalance iónico, esto es, la deficiencia de algunos nutrientes y predominancia de otros.
- 4 La absorción y translocación de macronutrientes como el K^+ y Ca^{2+} se reduce abruptamente por el exceso de sales en el sustrato.

La salinidad también puede variar a lo largo de la estación de crecimiento, a menudo incrementándose con el tiempo. En general, las plantas son más sensibles al estrés salino durante los estadios de plántula y vegetativo temprano, y aunque muchos cultivos se hacen más tolerantes en estadios posteriores de crecimiento, hay excepciones (Maas, 1984).

En la mayoría de las especies, los síntomas más comunes por efecto de las sales son la reducción de la altura final de la planta, la disminución de la producción y el retraso en su ritmo de crecimiento. También se presenta la disminución del tamaño de estomas y el aumento en el número de estos, así como el oscurecimiento del color de las hojas. La salinidad dificulta significativamente la conductancia estomatal, provocando el decremento en la tasa de transpiración y el aumento de la temperatura foliar (Martínez, Royo y Aragues, 1987).

1.4.2.3 Clorofila

La clorofila es el pigmento que hace que las hojas se vean verdes, es el pigmento involucrado directamente con la transformación de la energía lumínica en energía química (Allinger, 1984).

La cantidad de clorofila es un indicador del proceso de fotosíntesis. Así, el hecho de que el contenido de clorofila en mg/l disminuya al aumentar la salinidad demuestra que la fotosíntesis es inhibida por incremento de la salinidad del cultivo. La disminución del contenido de clorofila total ha sido atribuido a una

destrucción de la clorofila debida a una debilidad de la unión pigmento-cloroplasto, debilidad que va aumentando por efecto de la sal (Cowan et al., 1992).

La salinidad genera senescencia foliar que va acompañada de una removilización de nutrientes, y una consecuente disminución del contenido de clorofila de la hoja (Quesada y Valpuesta, 2008).

1.4.2.4 *Dispersión de suelos*

La dispersión es un proceso por el cual un suelo se flocula espontáneamente cuando está expuesto al agua que tenga poco o nada de velocidad hidráulica. Se piensa que la dispersión generalmente es causada por la repulsión electrostática entre las partículas de la arcilla, resultando en la formación de una suspensión coloidal estable del suelo. Los elevados contenidos de sales y sodio de cambio influyen en las características físicas del suelo dificultando el desarrollo de los cultivos. El mecanismo de hinchamiento o expansión de los coloides del suelo, causado por el aumento en el sodio intercambiable, afecta a su estructura debido al aumento del grosor de la capa de agua ligada a las partículas, haciendo que las mismas se separen entre sí, provocando la dispersión de las arcillas. Este proceso es el principal responsable de la disminución de la estabilidad estructural, lo que influye en la reducción de las tasas de infiltración y conductividad hidráulica del suelo (Gómez, 2004) y en el encostramiento del mismo.

El alto contenido de sodio de los suelos produce dispersión de los coloides arcillosos y húmicos provocando la destrucción de los agregados del suelo y el taponamiento de poros que puede traer consigo la asfixia radicular. Esto implica la formación de horizontes subsuperficiales muy pesados, generalmente con estructura prismática y muy baja permeabilidad, quedando en la superficie horizontes arenosos, con elementos gruesos, estructuras débiles y baja fertilidad. Además los altos valores de pH limitan la solubilidad de diversos elementos como P, Fe y la mayoría de los oligoelementos. Asimismo reduce a solubilidad y el acceso de compuestos de hierro, manganeso, boro, fosfato de calcio y magnesio. En presencia de sodio, los coloides del suelo se hidratan muy rápido y forman una costra que al secarse el suelo se rompe. Este fenómeno es conocido como

dispersión coloidal del suelo, y destruye la estructura física del suelo y creando un nuevo suelo con menos porosidad, menos penetración del agua y mayor susceptibilidad a la erosión, resultando además en una muy pobre aireación, todo actuando en conjunto y afectando el crecimiento de la raíz. Las consecuencias son: insuficiente agua y penetración de la raíz, problemas de erosión, baja germinación y alto estrés para las plantas (Sherard, Dunnigan y Decker, 1976).

1.5 Rehabilitación de suelos

La rehabilitación de suelos debe ser un proceso completo e integral, con miras a combatir diversos problemas que en ellos presenten; como son, la salinidad, los procesos de acidificación, contaminación con diferentes materiales, etc., para así poder reincorporarlos a una actividad productiva, útil y sustentable, mediante la aplicación de diversos tratamientos.

Una vez determinados los problemas de salinidad en un suelo, mediante observaciones a campo, análisis químico de muestras de suelo y/o a través de la vegetación existente, si esos suelos se van a destinar a la actividad productiva, es necesario prever su recuperación.

Hay una diversa cantidad de opciones para poder generar un tratamiento de rehabilitación entre los cuales se encuentran los lavados, incorporación de materia orgánica, yeso, cal, azufre, etc.

Una vez determinada la zona, el problema y sus características se debe escoger el tratamiento según el costo y las necesidades de cada lugar, por lo que para este trabajo se determinó usar lavado y adición de yeso al suelo, ya que se cuenta con agua suficiente y un proveedor de yeso cercano.

1.5.1 Lavado

El método de recuperación para un suelo salino no-sódico es el lavado de sales del suelo con agua dulce de buena calidad por ejemplo, pH neutro, baja conductividad eléctrica, baja concentración de carbonatos y bicarbonatos, etc.

Debido a la no adsorción de los aniones por el suelo en cantidades significativas la profundidad de penetración del frente de desalinización o frente del lavado (lixiviación) es muy importante. En los suelos agrietados la mayor parte del agua de lixiviación puede pasar a través de la grietas sin recoger cantidades significativas de sales, ya que estas tienen que ser transportadas por el lento proceso de difusión molecular desde la fase de agua estancada dentro de los agregados hasta la fase móvil de agua en las grietas. La eficiencia de lixiviación será reducida aún más si el suelo agrietado se encuentra seco antes del lavado.

En este caso el agua que se infiltra desde las grietas hacia los agregados transportará primero las sales hacia el centro de estos últimos aumentando la distancia de difusión en la fase de agua estancada (Aguirre, 1993). La ecuación que describe el balance hídrico del suelo es dado por los parámetros que representan las entradas de agua al sistema, riego, I, precipitación, P, ascenso y las salidas, Consumo, (evapotranspiración), C, drenaje, D, y H, representa el contenido de humedad actual del suelo,

$$\text{Balance hídrico : } H = (I+P) - (C+D)$$

$$\text{Balance salino: } CE_e \times PS = CE_c \times CC$$

$$CE_e = (CC \times CE_c) / PS = (CC \times I \times CE_i) / (PS \times D)$$

Donde CE_i es la conductividad eléctrica del agua de riego, CE_e, la del extracto de saturación, y CE_c la de capacidad de campo, PS es el porcentaje de saturación. Con estas ecuaciones se plantea el método de remediación expuesto en el apéndice.

1.5.2 Yeso

Para los suelos sódicos los iones Na⁺ adsorbidos tienen que ser intercambiados por iones de Ca²⁺, lo cual es efectuado por lavados con agua de bajos valores de RAS. Con este propósito sales de calcio pueden ser añadidas al agua de lixiviación. Generalmente se usa el yeso debido a su bajo costo como materia prima. La disolución de una cantidad prescrita en cada unidad de agua de riego no puede ser alcanzada en la práctica si, como generalmente se hace, el yeso es

esparcido o arado en la superficie del suelo antes del riego. En ese caso el yeso concentrado localmente en el agua de infiltración dependerá del tipo y frecuencia de riego, del microrrelieve del campo, de la capacidad local infiltrante, de la distribución del tamaño de partícula del yeso, etcétera. Una concentración de yeso más o menos controlable puede obtenerse solamente si el yeso es añadido al agua antes de efectuarse el riego (Aguirre, 1993).

1.5.3 Otros materiales de rehabilitación

Bajo ciertas condiciones la cal puede ser instrumental en el proceso de reducción del valor del PSI de los suelos sódicos. La primera de estas condiciones es que la cal tiene que estar presente en suelo de una forma bien distribuida. A continuación el lavado tiene que llevarse a cabo en un cultivo en crecimiento en ambiente sumergido. Esto es porque la actividad de las raíces puede causar un incremento en la presión parcial del CO_2 . Así parte del Ca^{2+} disuelto se intercambiará con el Na^+ adsorbido, lo cual a su vez causará mayor solubilidad de la cal, particularmente si los carbonatos acumulados son continuamente eliminados por lixiviación (Aguirre, 1993).

Otra situación en la cual la cal podría usarse para reducir el valor de PSI es en caso de los suelos sódicos de reacción ácida. Los iones H^+ presentes en la solución del suelo y en el complejo de cambio liberarán los iones de Ca^{2+} . Los suelos calcáreos sódicos formados por la precipitación de carbonatos de las aguas alcalinas pueden ser rehabilitados por medio de la adición de sustancias que den reacción ácida en el suelo. Como azufre, piritita y las sales de Al^{3+} . También el yeso fosforado usualmente contiene grandes cantidades de ácido, mientras algunos de los fertilizantes de reacción ácida como sulfato de amonio pueden ser usados para reducir la sodicidad y alcalinidad (Aguirre, 1993).

1.6 Importancia de las propiedades analizadas

1.6.1 pH

La evaluación electrométrica del pH (Tabla 1) se basa en la determinación de la actividad del ion H^+ mediante el uso de un electrodo cuya membrana sensitiva al H^+ . En el caso de los suelos el pH se mide potenciométricamente en el extracto de pasta de saturación. El pH es una de las mediciones más comunes e importantes en los análisis químicos rutinarios de suelo, ya que controla reacciones químicas y biológicas en el suelo. La determinación del pH es afectada por varios factores tales como: la disponibilidad nutrimental, tipo y cantidad de constituyentes orgánicos e inorgánicos que constituyen a la acidez del suelo, la concentración de sales en la solución, la relación suelo: solución, la presión parcial de bióxido de carbono y el efecto de la suspensión asociado con el potencial de unión, etc. (SEMARNAT, 2000).

Tabla 1 Interpretación de clasificación de pH

Clasificación	pH
Fuertemente ácido	< 5.0
Moderadamente ácido	5.1 – 6.5
Neutro	6.6 – 7.3
Medianamente alcalino	7.4 – 8.5
Fuertemente alcalino	> 8.5

1.6.2 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica (Tabla 2) es una medida de la capacidad de un material para transportar la corriente eléctrica. Una solución acuosa que contiene iones tiene esta habilidad. La conductividad de una solución electrolítica depende de la concentración total de iones presentes en agua, de la movilidad de cada uno de

los iones disueltos, su valencia y de la temperatura a la que se hace la determinación (SEMARNAT, 2000).

El agua pura es una muy mala conductora de corriente eléctrica, mientras que el agua que contiene sales disueltas como la de los suelos conduce la corriente eléctrica aproximadamente en proporción a la cantidad de sales presentes. Tomando como base este principio, las mediciones de la conductividad eléctrica de un extracto dan una indicación casi exacta de la concentración total de constituyentes ionizados (Rodríguez y Rodríguez 2002).

Tabla 2 Interpretación de clasificación de Conductividad eléctrica

dS m ⁻¹	Efectos
< 1.0	Efectos despreciables de la salinidad
1.1-2.0	Muy ligeramente salino
2.1-4.0	Moderadamente salino
4.1-8.0	Suelo salino
8.1-16.0	Fuertemente salino
>16.0	Muy fuertemente salino

La Conductividad Eléctrica se encuentra asociada con la concentración de sales a través de una relación aritmética del tipo: $CE \text{ (dS m}^{-1}\text{)} \approx 10 C \text{ (mmol}_c \text{ L}^{-1}\text{)}$, dónde además se debe cumplir con la relación aproximada de $10 \times CE = \sum An^- = \sum Cat^+$. An⁻ responde por la sumatoria de los aniones más comunes, como son Cl⁻, SO₄²⁻ y HCO₃⁻. O del lado de los cationes estos son Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ y K⁺.

1.6.3 *Materia orgánica*

El contenido de materia orgánica del suelo (Tabla 3) es un buen indicador de su fertilidad, principalmente de su capacidad potencial para proporcionar nutrimentos como nitrógeno, fósforo y azufre a los cultivos. Además, tal contenido indica la capacidad relativa del suelo para retener agua y nutrimentos contra pérdidas por lixiviación; la estabilidad de su estructura y susceptibilidad a la erosión; el movimiento de agua y aireación; la capacidad amortiguadora del suelo para resistir variaciones de pH o salinidad y las condiciones de laboreo y manejo del suelo (Rodríguez y Rodríguez 2002).

El contenido de materia orgánica de los suelos está en función, entre otros factores, del clima, de la vegetación original del suelo, de los cultivos, drenaje y manejo. Los factores ecológicos influyen en la productividad de restos vegetales y animales que se incorporan al suelo, así como su velocidad de mineralización. Por otra parte se indica que los contenidos de materia orgánica y nitrógeno de los suelos determinan el clima y la vegetación, que a su vez los afectan otros factores locales como el relieve, el material parenteral, el tipo y la duración de la explotación de los suelos y algunas de sus características químicas, físicas y microbiológicas (Rodríguez y Rodríguez 2002).

La determinación de la materia orgánica del suelo se evalúa a través del contenido de carbono orgánico del suelo por medio de una disolución de dicromato de potasio y el calor de reacción que se genera al mezclarla con ácido sulfúrico concentrado. Después de un cierto tiempo de espera la mezcla se diluye, se adiciona ácido fosfórico para evitar interferencias de Fe^{3+} y el dicromato de potasio residual es valorado con sulfato ferroso. Con este procedimiento se detecta entre un 70 y 85 % del carbono orgánico total por lo que es necesario introducir un factor de corrección, el cual puede variar entre suelo y suelo. En los suelos de México se recomienda utilizar el factor 1.298 (SEMARNAT, 2000).

Tabla 3 Interpretación de porcentaje de Materia Orgánica

Clase	% Materia Orgánica
Muy bajo	< 4.0
Bajo	4.1 – 6.0
Medio	6.1 – 10.9
Alto	11.0 – 16.0
Muy alto	> 16.1

1.6.4 Calcio más magnesio

El magnesio después del calcio es el catión divalente intercambiable más abundante en la gran mayoría de los suelos, es un elemento esencial para las plantas ya que forma parte de la molécula de clorofila y además interviene en el

metabolismo de hidratos de carbono. Ambos cationes se encuentran unidos al complejo de intercambio y en la solución del suelo donde principalmente se presentan en forma de bi-carbonatos, sulfatos y nitratos (Aguirre, Del Carmen y Delgadillo, 1985).

1.6.5 Capacidad de intercambio catiónico

Es la suma de cationes intercambiables adsorbidos por un suelo, expresados en mmoles carga, mmol_c , por kg de suelo (antiguamente miliequivalentes por cada 100 g), secado al horno y actualmente se reporta en $\text{cmol}^+ \text{Kg}^{-1}$. Los materiales minerales menores de 2 micras forman con la materia orgánica humificada una micela coloidal que actúa como ácido, con cargas negativas que le confieren la propiedad de adsorber cationes (Castellanos et al, 2000). Estos procesos pueden ser reversibles y los cationes pueden remplazarse por los que se encuentran en la solución de suelo. Existen dos aspectos que se deben considerar dentro de esta propiedad: la capacidad de intercambio catiónico, CIC, que depende fundamentalmente de la naturaleza de la materia orgánica y minerales arcillosos que forman parte del suelo, de su naturaleza y tamaño de las partículas; y las propiedades de los cationes de intercambio específico, cuya adsorción está en función de la valencia del ion, los radios iónicos hidratados, la concentración de la solución y el porcentaje de posiciones iónicas ocupadas (Rodríguez y Rodríguez, 2002).

1.6.6 Carbonatos en suelo

El ion carbonato se encuentra en los suelos (Tabla 4) formando compuestos con elementos alcalino-térreos, principalmente con el calcio y el magnesio en la calcita CaCO_3 , la magnesita MgCO_3 y la dolomita $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. Generalmente la calcita es el compuesto dominante en la mayoría de los suelos. Los mayores contenidos de calcita se encuentran en los suelos de regiones áridas y en general en suelos de naturaleza calcárea o alcalina. (Rodríguez y Rodríguez, 2002).

Es conveniente conocer su contenido ya que altos contenidos pueden inducir deficiencias de fósforo, zinc, hierro y/o magnesio en los cultivos (Aguilar et al, 1987).

Tabla 4 Interpretación de porcentaje de carbonatos en suelo

Clase	% CaCO ₃
Muy bajo	< 0.5
Bajo	0.5 – 2.0
Medio	2.1 – 15
Alto	16 – 40
Muy alto	> 40

1.6.7 Porcentaje de saturación

El porcentaje de saturación, PS ($\text{g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{g}_{\text{suelo-seco}}$), es la cantidad de agua que un suelo retiene a saturación. Este indica los gramos de agua que existen en un suelo a saturación, por cada 100 gramos de sólidos secos (SEMARNAT, 2000).

1.6.8 Densidad aparente

La densidad aparente del suelo (Tabla 5) es la relación entre masa por unidad de volumen de un suelo, incluyendo el espacio poroso, que se ha secado a un peso constante de 105 °C. Comúnmente se expresa en gramos por centímetro cúbico. El peso corresponde a la fase sólida, ya que el agua se eliminó en el secado en la estufa. En el volumen total del suelo queda incluido el volumen de la parte sólida más el volumen de los poros del suelo. La densidad aparente es afectada por factores como: tipo de mineral predominante en el suelo, materia orgánica, textura, estructura, posición en el perfil y labores culturales. La densidad aparente es un factor de crecimiento edáfico indirecto, ya que afecta la aireación del suelo y por lo tanto el crecimiento radicular. Esta propiedad del suelo se puede modificar solo a través de aportaciones de materia orgánica, y mediante labores culturales adecuadas que mantengan y/o mejoren una estructura favorable (Rodríguez y Rodríguez, 2002).

Tabla 5 Interpretación de densidad aparente

Tipos de suelos	g/cm ³
-----------------	-------------------

Orgánicos y volcánicos	< 1
Arcillosos	1.2 – 1.19
Francos	1.20 – 1.32
Arenosos	>1.32

1.6.9 Textura

La textura del suelo se define como la proporción relativa de grupos dimensionales de partículas. Proporciona una idea general de las propiedades físicas del suelo. Es la proporción relativa por tamaños de partículas de arena, limo y arcilla, los cuales al combinarse genera, las clases texturales (SEMARNAT, 2000).

La distribución del tamaño de partícula representa quizá la característica del suelo más importante relacionada con su actividad física y química. Existe también una relación directa entre el tamaño de partícula y la cantidad de área superficial presente en un peso de suelo dado. Puesto que la mayoría de las propiedades físicas y químicas están asociadas con la actividad superficial, la distribución del tamaño de partículas ha sido una forma estándar de caracterizar y clasificar las partículas sólidas del suelo, lo cual sirve como base para la clasificación textural. La textura del suelo está relacionada con la aireación, el movimiento del agua, la retención de humedad, la retención de cationes y aniones, y la disponibilidad de nutrientes, lo que determina en gran parte la productividad, uso y manejo de los suelos. La textura es una característica del suelo que no puede cambiarse con el manejo bajo condiciones de campo, solo puede cambiarse adicionando al suelo material que tenga un tamaño de partícula diferente, aunque esto es improbable de realizar (Rodríguez y Rodríguez, 2002).

II MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Condiciones de experimentación

Para poder llevar a cabo esta investigación se estableció un plan de trabajo dividido en dos partes:

1.- Se realizó el muestreo de suelos y todos los análisis físicos y químicos pertinentes para su caracterización, llevados a cabo dentro del laboratorio 15 de la Unidad de Investigación Multidisciplinaria de FES-Cuautitlán, UNAM, Laboratorio de Suelos, Aguas y Nutrición Vegetal.

2.- Se realizaron diferentes propuestas de rehabilitación las cuales se llevaron a cabo en invernadero, posteriormente se analizaron los resultados y se determinó cual fue la propuesta con mejores resultados.

2.2 Muestreo de suelo

La toma del suelo de estudio se realizó mediante un muestreo en rejilla de la parcela obteniendo 20 muestras compuestas y 20 núcleos. En la Figura 2 se puede observar la manera en la que se dividió la parcela y los puntos de muestreo que se establecieron, para su posterior análisis.



Figura 2. Ubicación de los puntos de muestreo.

Materiales:

- 1) Pala recta.
- 2) Bolsas de plástico de 3 kg.
- 3) Marcadores indelebles.
- 4) Cuerdas.
- 5) Flexómetro.
- 6) Tubos de aluminio de 30 cm de largo y 10 cm de diámetro.
- 7) Cinta.
- 8) Estacas.

Procedimiento:

- 1) Se midió el terreno a muestrear.
- 2) Se parceló el terreno con divisiones cinco de norte- sur y cuatro de este-oeste.
- 3) Se tomaron dos tipos de muestra de cada intersección: muestra compuesta y núcleos de 30 cm.
- 4) Se introdujo el tubo de aluminio y se selló la parte superior permitiendo el ingreso de suelo a través de él.
- 5) Se excavó alrededor del tubo y se extrajo el tubo con el núcleo de suelo sellándolo por la parte inferior y evitando que la muestra salga del mismo.
- 6) Se tomó una muestra homogénea de 30 cm de profundidad quitando la capa superficial.
- 7) Se etiquetó cada muestra y se almacenaron todas a la sombra.

2.3 Manejo de las muestras

Una vez obtenidas las muestras de suelo se trasladaron al laboratorio de Química Agrícola en FES-Cuautitlán Campo 4 en donde se prepararon, para posteriormente someterlas a los análisis correspondientes.

2.3.1 Secado

Las muestras de suelo se secaron a la sombra y a temperatura ambiente durante 15 días, eliminando raíces, hojarasca, y rompiendo manualmente los agregados grandes.

2.3.2 Molido

Se colocaron las muestras dentro de un recipiente de plástico amplio para poder proseguir a molerlas con un martillo de madera, el suelo se golpeo hasta que se destruyeron todos los terrones y agregados grandes.

2.3.3 Tamizado

El suelo molido se hizo pasar por un tamiz con abertura de 2 mm de diámetro de acero inoxidable.

2.3.4 Homogeneizado

Esta etapa se llevó a cabo extendiendo sobre una lona de plástico una porción de la muestra a cada punta de la lona, después se levantó cada punta para regresar el suelo al centro empezando por la esquina superior derecha y tirando de las puntas de manera diagonal hacia el centro, las esquinas se fueron levantando en sentido de las manecillas del reloj, esto se realizó cuatro veces para garantizar la homogeneización de la muestra.

2.3.5 Almacenamiento

Una vez realizados: el secado, molienda, tamizado y homogeneizado se guardaron las muestras en bolsas de plástico con sus respectivas etiquetas, colocándolos en un mueble para su almacenamiento en un lugar seco, fresco y sombreado, listas para el análisis.

2.4 Caracterización química y física de las muestras de suelo

El análisis de cada una de las muestras se realizó por triplicado de acuerdo con la norma mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, excepto el análisis de aniones que fue realizado por cromatografía de iones y calcio más magnesio soluble y capacidad de intercambio catiónico que fueron realizados según los procedimientos del manual de suelos salinos y sódicos (Kamphorst y Vens, 1980), los análisis de las muestras fueron los siguientes:

- Obtención de pasta y extracto de saturación.
- pH.
- Conductividad eléctrica.
- Concentración carbonatos en suelo.
- Concentración de aniones en extracto de saturación (cloruro, sulfato y fosfato).
- Porcentaje de materia orgánica.
- Concentración de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ solubles.
- Determinación de capacidad de intercambio catiónico.
- Porcentaje de saturación.
- Densidad aparente.
- Textura.

2.4.1 Pasta y extracto de saturación

El punto de saturación se obtuvo agregando agua destilada al suelo hasta que adquirió la propiedad de reflejar la luz, fluir la muestra y unirse cuando es cortada con una espátula. El extracto de saturación se obtuvo a través de la pasta del suelo saturado o pasta de saturación. Una vez preparada la pasta de saturación

se dejó reposar 24 horas, al término de estas se verificó la pasta y se agregó más agua si era necesario hasta cumplir con las propiedades antes mencionadas, se dejó reposar 1 hora más y se procedió a extraer el agua por medio de vacío (SEMARNAT, 2000).

2.4.2 pH

Materiales:

- 1) Potenciómetro digital.
- 2) Vaso de precipitado.
- 3) Electrodo para pH.

Procedimiento:

- 1) Obtención del extracto de pasta de saturación.
- 2) Se colocó el extracto de pasta de saturación en un vaso de precipitado.
- 3) Se introdujo el electrodo en el extracto.
- 4) Se registro el pH en el momento que la lectura se estabilizó.

2.4.3 Conductividad eléctrica (CE)

Materiales:

- 1) Conductímetro.
- 2) Vaso de precipitado.
- 3) Electrodo para conductividad eléctrica.

Procedimiento:

- 1) Obtención del extracto de pasta de saturación.
- 2) Se colocó el extracto de pasta de saturación en un vaso de precipitado.
- 3) Se introdujo el electrodo en el extracto.
- 4) Se registró la conductividad eléctrica en el momento que la lectura se estabilizó.

2.4.4 Porcentaje de materia orgánica

Materiales:

- 1) Dicromato de potasio 1 N.

- 2) Ácido sulfúrico concentrado.
- 3) Ácido fosfórico concentrado.
- 4) Indicador de difenilamina.
- 5) Sulfato ferroso 1.0 M.
- 6) Matraz Erlenmeyer 500 mL.
- 7) Dos buretas de 50 mL.
- 8) Pipeta volumétrica de 10 mL.
- 9) Probeta de vidrio de 25 mL.

Procedimiento:

- 1) Se pesó 0.5 g de suelo y se colocó en un matraz Erlenmeyer de 500 mL.
- 2) Se adicionaron 10.0 mL de dicromato de potasio y se agitó suavemente el matraz para que quedara en contacto con todo el suelo.
- 3) Se agregaron 20 mL de ácido sulfúrico concentrado y se giró suavemente el matraz por un minuto.
- 4) Se dejó reposar por 30 minutos.
- 5) Se añadió 200 mL de agua destilada.
- 6) Se adicionaron 5 gotas de difenilamina.
- 7) Se tituló con sulfato ferroso hasta el punto final verde claro y al mismo tiempo se llevó potenciometricamente.

2.4.5 Concentración de calcio más magnesio solubles

Materiales:

- 1) Solución buffer se disolvieron 67.5 g de cloruro de amonio en 570 mL de hidróxido de amonio concentrado y aforó a 1 L.
- 2) Indicador de negro de eriocromo T.
- 3) EDTA 0.01 N.

Procedimiento:

Se realizaron las siguientes diluciones de extracto de saturación respecto a su conductividad eléctrica para su mejor manejo (Tabla 6).

Tabla 6. Diluciones de extracto de saturación.

Conductividad eléctrica	mL
<20	0.4
20-40	0.3

40-80	0.2
>80	0.1

- 1) Se realizaron muestras compuestas aforándose a 10.0 mL.
- 2) Se tomó 1 alícuota respecto a la tabla 6 para su dilución y se aforó a 25.0 mL.
- 3) Se agregaron 10 gotas de solución buffer.
- 4) Se agregaron 3 gotas de indicador.
- 5) Se tituló con EDTA hasta que el último color rojo desapareció.

2.4.6 Capacidad de intercambio catiónico

Materiales:

- 1) Solución de extracción: Se mezclaron partes iguales de solución de Trietanolamina y solución de cloruro de bario.
- 2) Sulfato de magnesio 0.025 M.
- 3) Ácido clorhídrico 2 M.
- 4) Buffer: 54 g de cloruro de amonio se agregaron 350 mL de hidróxido de amonio y se aforó a 1 L.
- 5) Indicador negro de eriocromo T.
- 6) EDTA 0.01 N.

Procedimiento:

- 1) Se pesaron 1.25 g de suelo.
- 2) Se agregaron 12.5 mL de solución de extracción y se agitó una hora.
- 3) Se centrifugó 10 minutos a 2000 rpm.
- 4) Se desechó el sobrenadante.
- 5) Se agregaron 12.5 mL de solución de extracción y se agitó 30 minutos.
- 6) Se dejó reposar toda la noche.
- 7) Se centrifugó 10 minutos a 2000 rpm.
- 8) Se desechó el sobrenadante.
- 9) Se agregaron 15 mL de agua destilada.
- 10) Se agitó con la mano.
- 11) Se centrifugó 10 minutos a 2000 rpm.

- 12) Se tiró el sobrenadante.
- 13) Se pesó el contenido.
- 14) Se agregaron 15 mL de sulfato de magnesio.
- 15) Se agitó por 2 horas.
- 16) Se centrifugó 10 minutos a 2000 rpm.
- 17) Se almacenó la solución.
- 18) Se tomó una alícuota de 2.5 mL de la solución.
- 19) Se agregaron 0.5 mL de buffer.
- 20) Se agregaron 12.5 mL de agua destilada.
- 21) Se agregaron 3 gotas de indicador.
- 22) Se tituló con EDTA hasta que el color del indicador cambió de rojo a azul.

2.4.7 Concentración de carbonatos en suelo

Materiales:

- 1) Ácido clorhídrico 0.2 M.
- 2) Ácido clorhídrico 0.1 M.
- 3) Hidróxido de sodio 0.1 M.
- 4) Fenolftaleína 0.1 %.
- 5) Bureta.
- 6) Botellas para agitación.
- 7) Agitador mecánico reciprocante.

Procedimiento:

- 1) Se pesaron 5 g de suelo.
- 2) Se agregó 100 mL de ácido clorhídrico 0.2 M.
- 3) Se agitó ocasionalmente durante una hora y se dejó reposar toda la noche.
- 4) Se agitó durante 2 horas.
- 5) Una vez asentada la solución se pipetearon 10 mL dentro de un matraz Erlenmeyer y se agregaron 25 mL de agua destilada.
- 6) Se agregaron 3 gotas de indicador de fenolftaleína y se tituló con hidróxido de sodio 0.1 M.

2.4.8 Concentración de aniones en extracto de saturación (cloruro, sulfato y fosfato)

La cuantificación de aniones solubles (cloruros, sulfatos y fosfatos) en el extracto de saturación se realizó por medio de una curva de calibración directa utilizando cromatografía de iones.

Para inyectar las muestras en el cromatógrafo se realizaron las siguientes diluciones (Tabla 7).

Tabla 7 diluciones de extractos de saturación

Conductividad eléctrica (ms)	Dilución
< 80	1/100/100
80-40	1/100/50
40-20	1/100/25
>20	1/100/10

2.4.9 Porcentaje de saturación

Material:

- 1) Estufa.
- 2) Vidrio de reloj.
- 3) Termómetro.
- 4) Espátula.
- 5) Pesa analítica.

Procedimiento:

- 1) Se tomó una muestra de aproximadamente 5 g de la pasta de saturación.
- 2) Se colocó en un vidrio de reloj.
- 3) Se llevó a peso constante dentro de la estufa a 105 °C.

2.4.10 Densidad aparente

Materiales:

- 1) Terrones de suelo con un diámetro máximo de 2 cm.
- 2) Hilo de algodón para coser ropa.
- 3) Parafina punto de fusión (56-60 °C).
- 4) Vaso de precipitados de 500 mL.
- 5) Termómetro.
- 6) Estufa.
- 7) Balanza analítica.

Procedimiento:

- 1) Se secaron los terrones a la estufa a 105 °C hasta peso constante.
- 2) Se tomaron los terrones y se ataron con hilos.
- 3) Una vez atado el terrón se pesó en la balanza.
- 4) Se prosiguió a sumergir el terrón en la parafina derretida de manera uniforme y con una capa delgada.
- 5) Se secó el terrón al aire.
- 6) Se pesó el terrón parafinado sumergido en agua.

2.4.11 Textura

Para llevar a cabo este análisis se dividió el terreno en tres partes respecto a sus anteriores análisis, obteniendo muestras compuestas como se menciona a continuación:

Zona A muestras A, B, C y D con repetición 1,2, 3 y 4.

Zona B muestras A y B con repetición 3,4 y 5.

Zona C muestras C y D con repetición 3,4 y 5.

Materiales:

- 1) Agua oxigenada 30%.
- 2) Oxalato de sodio saturado.
- 3) Metasilicato de sodio.
- 4) Hexametafosfato de sodio.
- 5) Hidrómetro de Bouyoucos.
- 6) Probeta de 1000 cm³.
- 7) Cilindro de Bouyoucos.
- 8) Agitador de mano.
- 9) Termómetro.

Procedimiento:

- 1) Se pesaron 60 g de suelo en un vaso de precipitado, se agregaron 20 mL de agua oxigenada y se puso a evaporar hasta sequedad; se repitió hasta que no se presentó efervescencia al agregar el agua oxigenada.
- 2) Se pesaron 50 g del suelo sin materia orgánica y se colocaron en un vaso de precipitado; se adicionó agua hasta que se cubrió la superficie con una lámina de 2 cm, se agregaron 5 mL de oxalato de sodio y 5 mL de metasilicato de sodio y se dejó reposar por 15 minutos.
- 3) Se pasó la muestra a la copa del agitador y se puso a dispersar por 5 minutos, al finalizar se pasó el contenido a la probeta.
- 4) Se agregó agua hasta completar 1 L con el hidrómetro dentro, se sacó el hidrómetro y se agitó durante 1 minuto.
- 5) Se tomó la lectura con el hidrómetro a los 40 segundos y a las 2 horas.

2.5 Diseño experimental

2.5.1 *Tratamientos de rehabilitación*

Se definieron cuatro tratamientos para disminuir el PSI del suelo de 54 a valores de 10, 20, 30 y 40 respectivamente (cálculos en anexos) y dos testigos, uno con suelo no salino y el otro solo con suelo salino para comparar su desarrollo, con diez repeticiones cada uno de ellos y dos plantas por repetición, dando un total de 60 contenedores y 120 plantas, en un diseño experimental tipo parcela dividida.

Con este fin se prepararon los contenedores con capacidad de 120 g, con suelo tamizado, homogenizado y mezclado con la cantidad de yeso necesaria para cada uno de los tratamientos, que se describe a continuación.

Tamizado

Para este proceso todo el suelo fue pasado por un tamiz de 1.6 (Figura 3) y 0.002 mm (Figura 4), del cual solo se usó el que fue recolectado de en medio de los tamices



Figura 3. Tamiz 1.6 mm.



Figura 4. Tamiz 0.002 mm.

Pesado y cuarteado

Después de recolectado el suelo se pesaron 350 g de suelo (Figura 5) de cada una de las muestras de suelo obtenidas, después se prosiguió a preparar la mezcla de todas las muestras por el método de cuarteo.

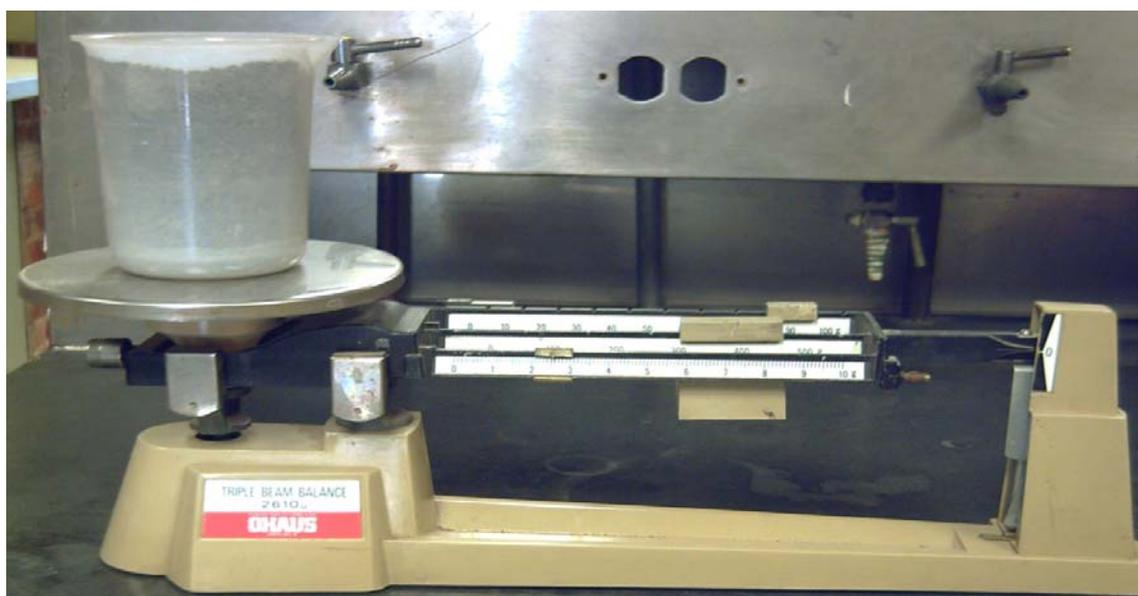


Figura 5. Pesado del suelo recolectado.

Tratamientos con yeso y blancos

Una vez obtenida la mezcla homogénea se pesaron 1,400 g de suelo para cada uno de los tratamientos y se pesó la cantidad de yeso necesaria para cada tratamiento (Figura 6), se prosiguió a hacer la mezcla del suelo con el yeso específico de cada tratamiento, la realización de esta muestra también fue por el método de cuarteo.



Figura 6. Cantidad de yeso usada para cada tratamiento.

Para el testigo de suelo no salino ($\text{pH}=6.8$ $\text{CE}=0.9$ ds m^{-1}) se tomó suelo de la parcela n°10 de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, para tener una referencia del desarrollo de las plantas en un suelo no salino.

Para el testigo de suelo salino solo se llenaron los respectivos cartuchos con el suelo salino sin nada de yeso ni lavado.

Para el tratamiento 1 (PSI 10) se agregaron 167.32 g (251 ton ha^{-1}) de yeso, se mezclaron con 1,400 g de suelo (Figura 7) y se llenaron los cartuchos.

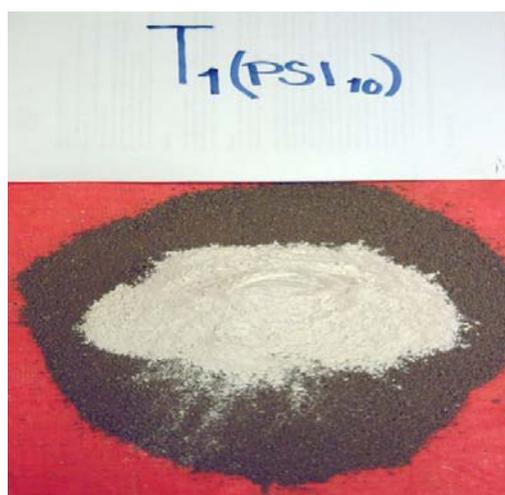


Figura 7. Adición de yeso a suelo tratamiento 1.

Para el tratamiento 2 (PSI 20) se agregaron 32.66 g (49 ton ha^{-1}) de yeso, se mezclaron con 1,400 g de suelo (Figura 8) y se llenaron los cartuchos.

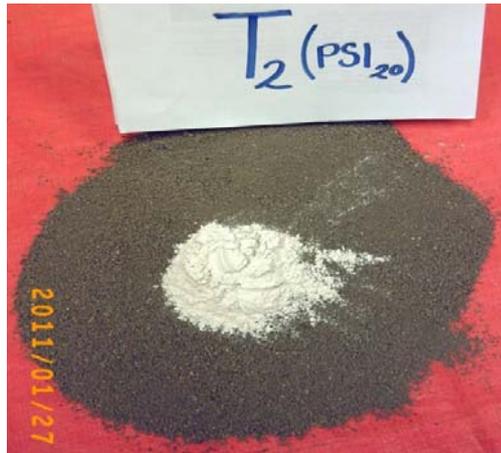


Figura 8. Adición de yeso a suelo tratamiento 2.

Para el tratamiento 3 (PSI 30) se agregaron 9.99 g (15 ton ha^{-1}) de yeso, se mezclaron con 1,400 g de suelo (Figura 9) y se llenaron los cartuchos.

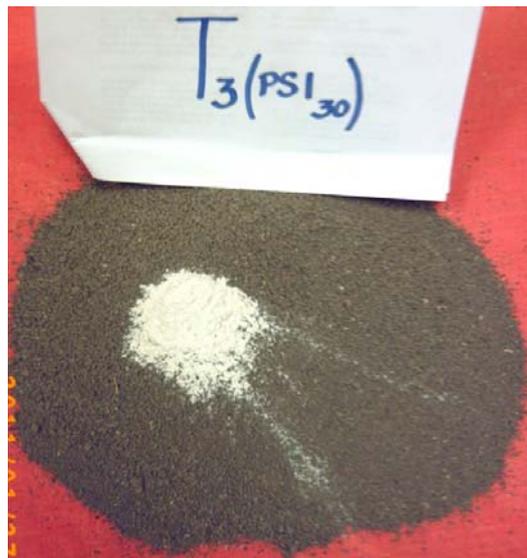


Figura 9. Adición de yeso a suelo tratamiento 3.

Para el tratamiento 4 (PSI 40) se agregaron 3.33 g (5 ton ha^{-1}) de yeso, se mezclaron con 1,400 g de suelo (Figura 10) y se llenaron los cartuchos.

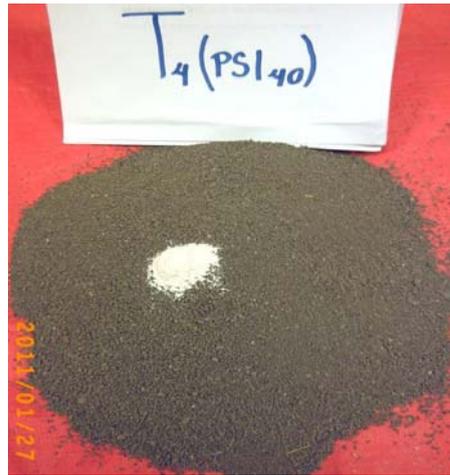


Figura 10. Adición de yeso a suelo tratamiento 4.

Una vez llenos los cartuchos se humectó el suelo con agua corriente (Figura 11) y en el momento en el cual drenó la primera gota de agua se selló la parte posterior de los cartuchos (Figura 12) y se mantuvo así durante 8 días cuidando que el suelo siempre se encontrara humectado, con la finalidad de que el yeso reaccionara con el agua y el suelo.

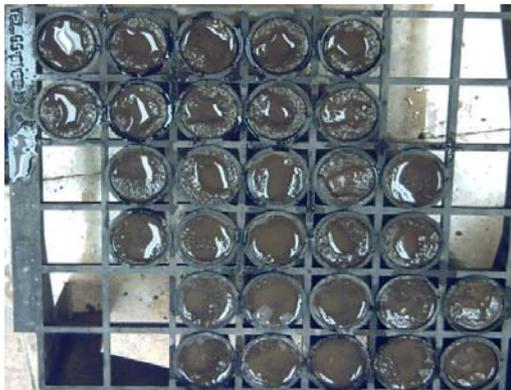


Figura 11. Suelo humectado



Figura 12. Cartuchos sellados

Lavados

Una vez pasados los 8 días se procedió a quitar el sello y realizar el lavado del suelo con agua corriente (Figura 13), de acuerdo al cálculo reportado en la sección de resultados.

Testigo suelo no salino sin tratamiento.

Testigo suelo salino sin tratamiento.

Tratamiento 1 105 ml por cartucho.

Tratamiento 2 109 ml por cartucho.

Tratamiento 3 114 ml por cartucho.

Tratamiento 4 118 ml por cartucho.

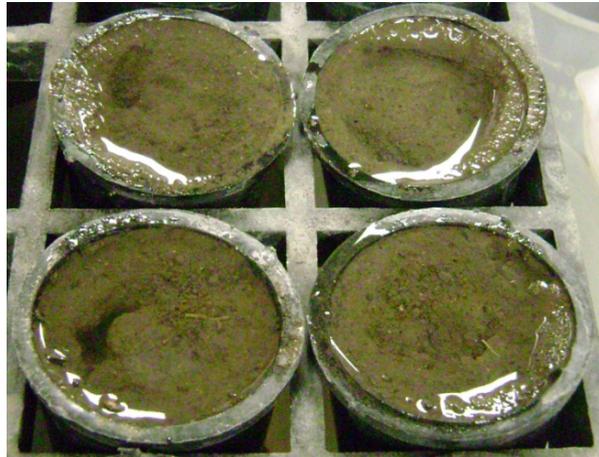


Figura 13 Lavado del suelo

2.5.2 Bioensayos

Una vez realizado el lavado del suelo se prosiguió con la siembra del maíz puma 1076 colocando dos semillas en cada cartucho (Figura 14), posteriormente se taparon agregando 0.5 cm de suelo, se mantuvieron 15 días las plantas a partir de la emergencia, manteniendo el suelo en todo momento húmedo, por medio de ligeros riegos diarios.

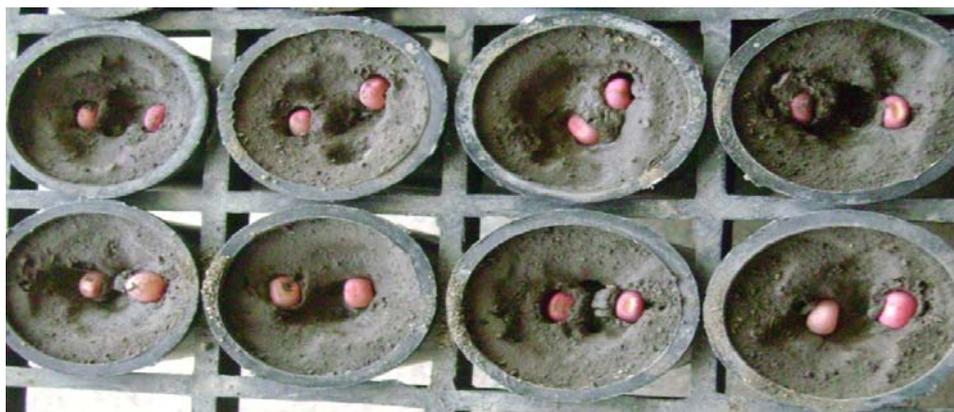


Figura 14. Colocación de semillas por cartucho.

Una vez germinada la semilla se procedió a medir los siguientes parámetros:

∂ Porcentaje de germinación

- ∂ Altura del tallo
- ∂ Grosor de tallo
- ∂ Clorofila
- ∂ Largo de raíz
- ∂ Materia fresca de planta
- ∂ Materia seca de planta

Para los bioensayos se utilizó maíz como planta de referencia cuya variedad es descrita a continuación.

2.5.2.1 Variedad Puma 1076

Híbrido de ciclo vegetativo intermedio de 150 días, conformado por tres líneas; una de ellas es la línea *IA Tolsol* que participa como progenitor masculino común. La cruza para este híbrido es *CML244XCML349*, generada en el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT).

La altura de la planta y mazorca es de 245-153 cm y 248-161 cm respectivamente. La floración masculina se presenta a los 83 días y la femenina a los 84 días, la madurez fisiológica se logra a los 156 días, en sitios y en altitudes de 2240 m. Las mazorcas son cónicas y constan de 16 hileras con 16 cm.

La espiga se encuentra libre y abierta, con pocas ramas laterales y sin ramas secundarias. Puede cosecharse en máquina ya que tiene una uniformidad aceptable. También tiene tolerancia la acame y menor incidencia de las enfermedades virales Rayado Fino y Achaparramiento, que en los últimos años han sido en aumento en los Valles Altos.

El rendimiento en los años 1996-1999 fue de 9 ton ha⁻¹. El rendimiento potencial experimental es de 12 ton ha⁻¹ en el Valle de México, Cuautitlán, Mex., Valle de

Puebla, Tlaxcoapan y Apan, Hgo., y en Tlaxcala. Prospera en condiciones de buen temporal o seco, en humedad residual y en punta de riego (Tadeo y Espinosa, 2004).

III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados del análisis químico y físico del suelo

3.1.2 pH y acidez

En la tabla 8 se puede observar que se encuentran los valores del pH de suelo por cada punto de muestreo y su clasificación se puede observar en la tabla 9, la cual nos indica que el 25 % de las muestras corresponden a medianamente alcalino y el 75 % restante a fuertemente alcalino, correspondiendo los valores más bajos a las muestras: A1, D2 y D3 y los más altos a las muestras: B3, C5 y C1.

Tabla 8. Resultados de pH por punto de muestreo.

	A	B	C	D
1	8.39	8.62	8.75	8.57
2	8.57	8.45	8.33	8.27
3	8.48	8.80	8.70	8.19
4	8.53	8.63	8.57	8.62

5 8.59 8.55 8.77 8.63

Tabla 9. Clasificación de pH según SEMARNAT (2000).

Clasificación	pH
Fuertemente ácido	< 5.0
Moderadamente ácido	5.1 – 6.5
Neutro	6.6 – 7.3
Medianamente alcalino	7.4 – 8.5
Fuertemente alcalino	> 8.5

En la figura 15 se muestra el mapa de distribución espacial de pH en la parcela que va en un intervalo de 8.15 a 8.80 identificando las zonas con suelos medianamente alcalinos y fuertemente alcalinos.

También puede observarse que las mayores concentraciones de álcalis y por lo tanto los valores más alcalinos de pH se encuentran en la parte noroeste del mapa y las concentraciones más bajas en la parte sureste, con tres zonas de mayor concentración de álcalis con cifras que van desde 8.19 a 8.80.

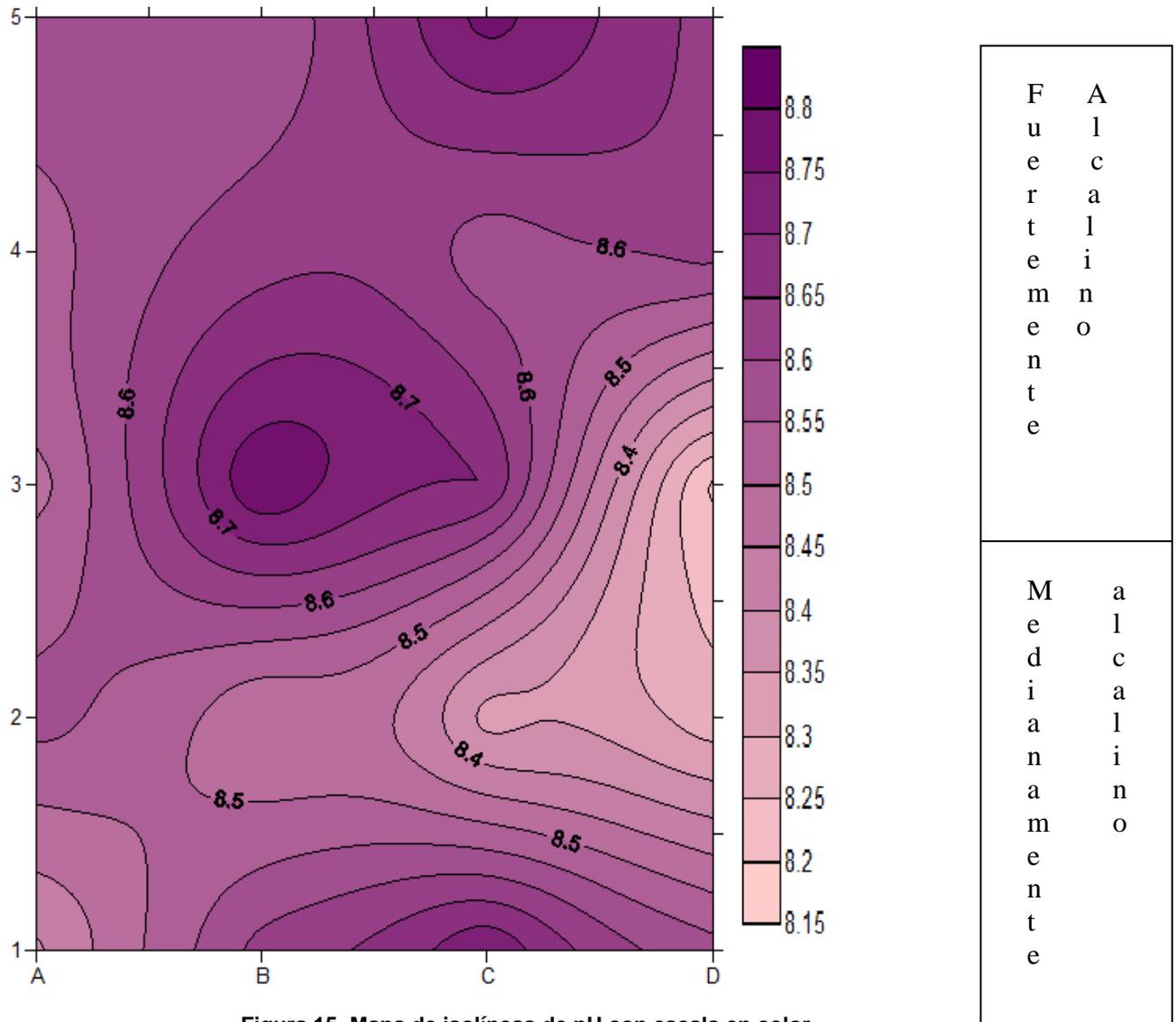


Figura 15. Mapa de isóneas de pH con escala en color.

Cabe agregar que existe una mayor posibilidad de rehabilitación a pH menores, ya que el Ca^{2+} se encuentra más soluble.

3.1.2 Conductividad eléctrica

En la tabla 10 se pueden observar los valores de conductividad eléctrica (dS m^{-1}) del suelo a cada punto de muestreo y respecto a la tabla 11, su clasificación. La distribución de las sales en el terreno de muy fuertemente salino para el 95 % de las muestras y de 5 % es de fuertemente salino, con mayores concentraciones en la parte occidental del terreno. Todas las muestras resultaron ser clasificadas como muy fuertemente salinas.

Independientemente de la clasificación los valores más bajos de las muestras son B3, C1, C2 y D1 y los más altos son A5, B2 y B5.

Tabla 10. Resultados de CE (dS m^{-1}) por puntos de muestreo.

	A	B	C	D
1	59.9	42.6	15.4	26.6
2	66.9	74.6	27.2	37.3
3	40.2	27.7	46.7	40.9
4	65.1	37.7	55.8	57.1
5	100.7	65.1	35.3	26.3

Tabla 11. Interpretación de conductividad eléctrica (ds m^{-1}) según SEMARNAT (2000).

dS m^{-1}	Efectos
< 1.0	Efectos despreciables de la salinidad
1.1-2.0	Muy ligeramente salino
2.1-4.0	Moderadamente salino
4.1-8.0	Suelo salino
8.1-16.0	Fuertemente salino
>16.0	Muy fuertemente salino

En la figura 16 se muestra el mapa de distribución espacial de conductividad eléctrica que cuenta con un intervalo que va de 15.4 a 100.7 (dS m^{-1}) lo que corresponde con una clasificación de fuertemente salino a muy fuertemente salino.

Independientemente que la clasificación del 95 % de la parcela sea muy fuertemente salino, se puede observar que en la parte noroeste y suroeste se encuentra la mayor concentración de sales, y en la parte sureste y central se encuentran las concentraciones más bajas de sales.

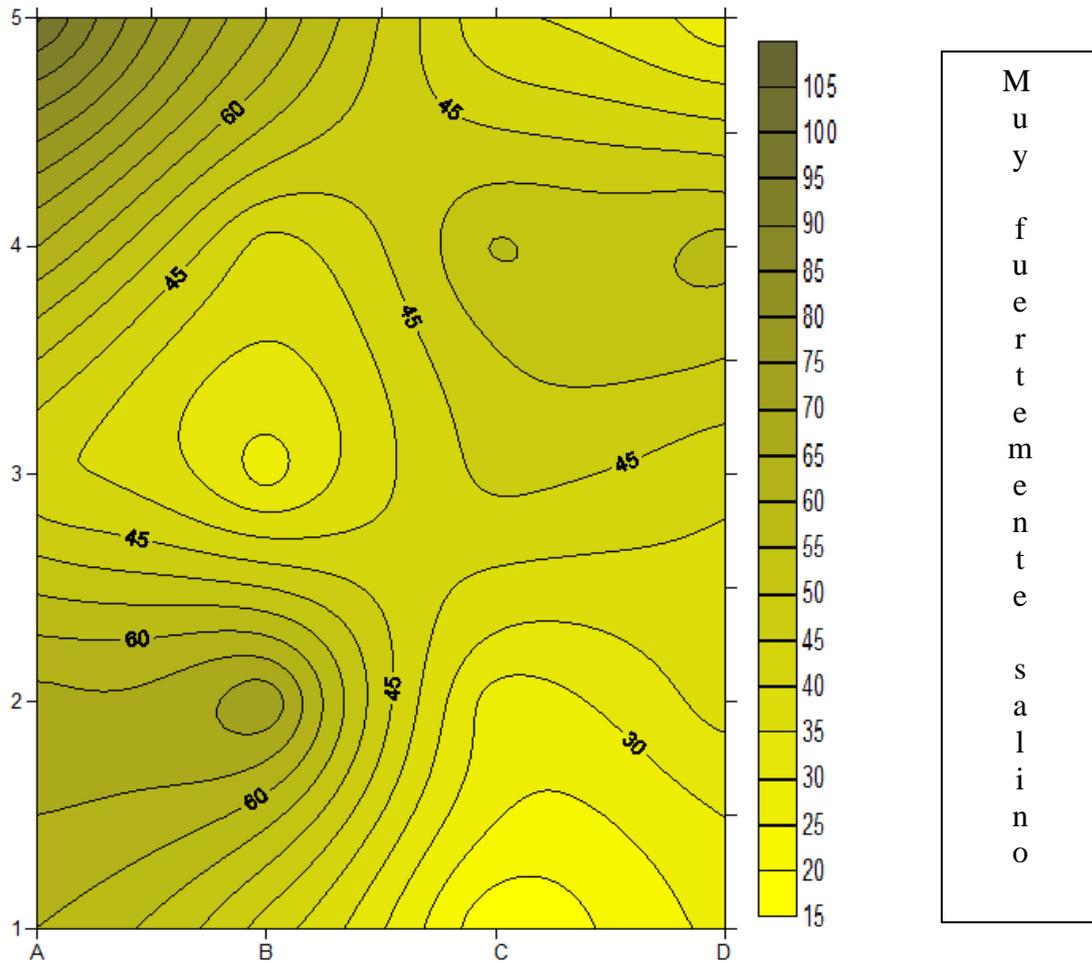


Figura 16. Mapa de isolíneas de CE (dS m^{-1}) con escala en color.

Esto explica la posibilidad de llevar a cabo un tratamiento diferencial de desalinización, con lavados con agua de buena calidad. En contraste con la distribución espacial de pH hay coincidencia importante en la zona de baja acumulación de sales y altos valores de pH.

3.1.3 Porcentaje de materia orgánica

En la tabla 12 se pueden observar los valores de porcentaje de materia orgánica del suelo por cada punto de muestreo y respecto a la tabla 13 su clasificación es: para el 45% de las muestras es de muy bajo, para el 40% bajo y para el 5% restante medio.

Independientemente de la clasificación los valores más bajos de las muestras son B2, D1 y D2 y los más altos son A1, B1, C5 Y D5.

Tabla 12. Resultados de M.O (%) por puntos de muestreo.

	A	B	C	D
1	4.74	5.23	4.79	3.07
2	3.57	2.55	4.22	3.23
3	3.40	4.92	4.79	4.71
4	3.87	3.87	3.66	4.71
5	3.70	4.22	6.45	4.95

Tabla 13. Clasificación materia orgánica (%) según SEMARNAT (2000).

Clase	% Materia Orgánica
Muy bajo	< 4.0
Bajo	4.1 – 6.0
Medio	6.1 – 10.9
Alto	11.0 – 16.0
Muy alto	> 16.1

En la figura 17 se muestra el mapa de variabilidad espacial del porcentaje de materia orgánica de la parcela, donde aproximadamente en el 85 % del terreno, se encuentra en una clasificación baja.

También se puede ver que el mapa cuenta con un intervalo de 1.6 a 6.6% de los cuales el 45% del terreno corresponde con la clasificación de muy bajo, el 40% siguiente corresponden a bajo y el 5% restante a medio.

En el mapa se puede identificar que el sureste y noreste corresponden a los puntos más altos de acumulación y contenido, y al suroeste el punto más bajo de concentración.

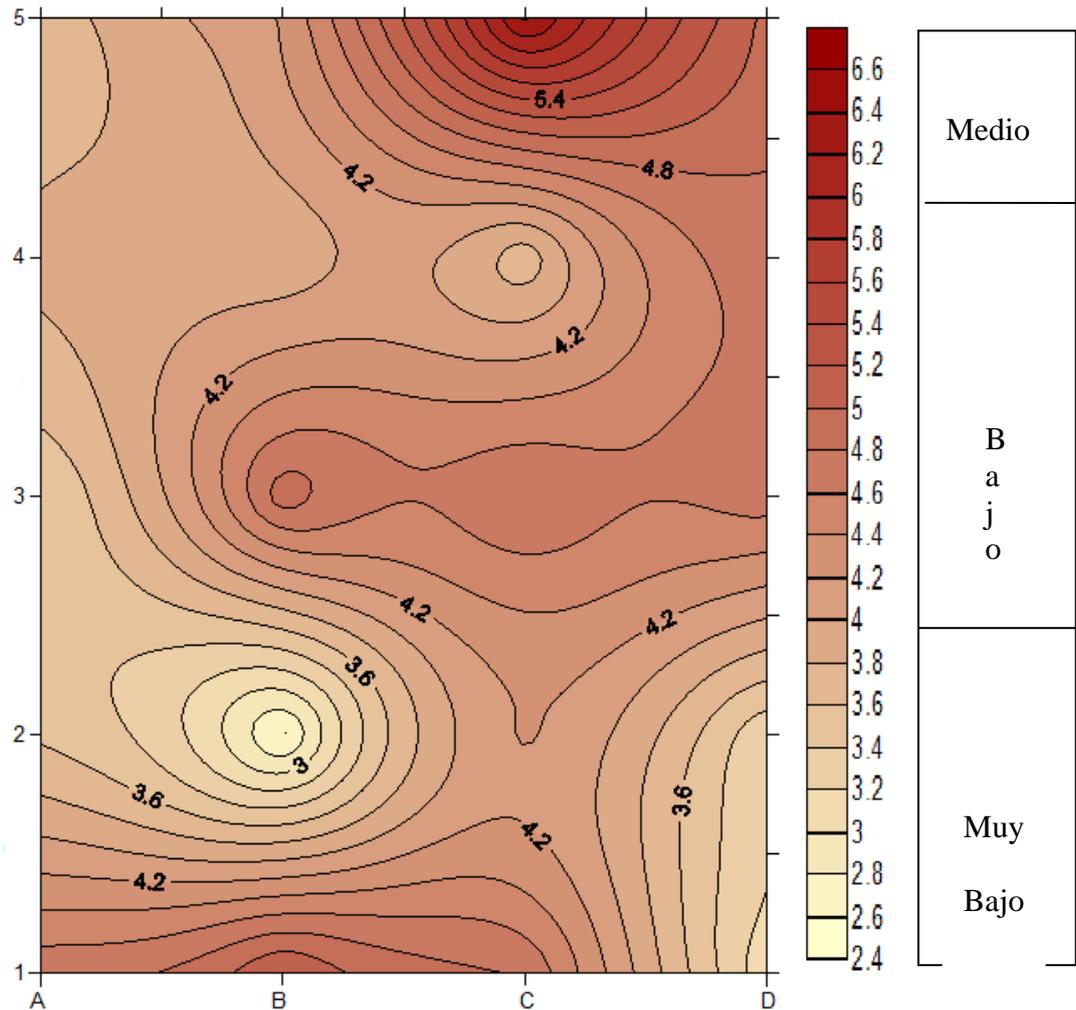


Figura 17. Mapa de isolíneas de M.O. (%) con escala en color.

La figura 17 además contrasta con la figura 15 de pH donde existe coincidencia entre los valores altos de pH y los valores bajos de contenido de MO. Los puntos específicos del mapa de variabilidad espacial de pH y conductividad eléctrica, indican las zonas con menor porcentaje de materia orgánica, zonas en las que se tendrá que realizar una aplicación mayor de la misma.

3.1.4 Calcio más magnesio

En la tabla 14 se pueden observar los valores de calcio más magnesio solubles del suelo por cada punto de muestreo y respecto a la tabla 15 su clasificación, que es de 100% de las muestras presentan valores muy altos.

Independientemente de la clasificación, los valores más bajos de las muestras son A5, C1 y C4 y los más altos son A1, A2 y C5.

Tabla 14. Resultados de ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$) en $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$, por puntos de muestreo

	A	B	C	D
1	130.0	91.7	nd	17.5
2	117.5	92.5	105.0	92.5
3	45.0	46.7	17.5	82.5
4	55.0	41.7	nd	45.0
5	nd	70.0	141.7	25.0

nd= No detectable

Tabla 15 Clasificación calcio más magnesio ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$) según Ilaco (1981)

$\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$	Clasificación
>12	Muy alto
12-6	Alto
6-3.5	Moderadamente alto
3.5-2.5	Moderadamente bajo
2.5-1.5	Bajo
< 1.5	Muy bajo

La figura 18 presenta el mapa de variabilidad espacial de calcio más magnesio, donde podemos decir que esta cantidad en la parcela es muy favorable ya que el terreno se encuentra en una clasificación de muy alto, pensando en que la rehabilitación de este tipo de terrenos siempre requiere suficiente cantidad de cationes divalentes disponibles para el reemplazo del sodio intercambiable.

Se puede observar que el mapa cuenta con un intervalo de 5 a 145 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ de los cuales el 85% del terreno corresponden a la clasificación de muy alto, también se puede observar que en la parte norte y en el suroeste se encuentran los puntos más altos de concentración y la parte sureste, central y noroeste los puntos más bajos de concentración.

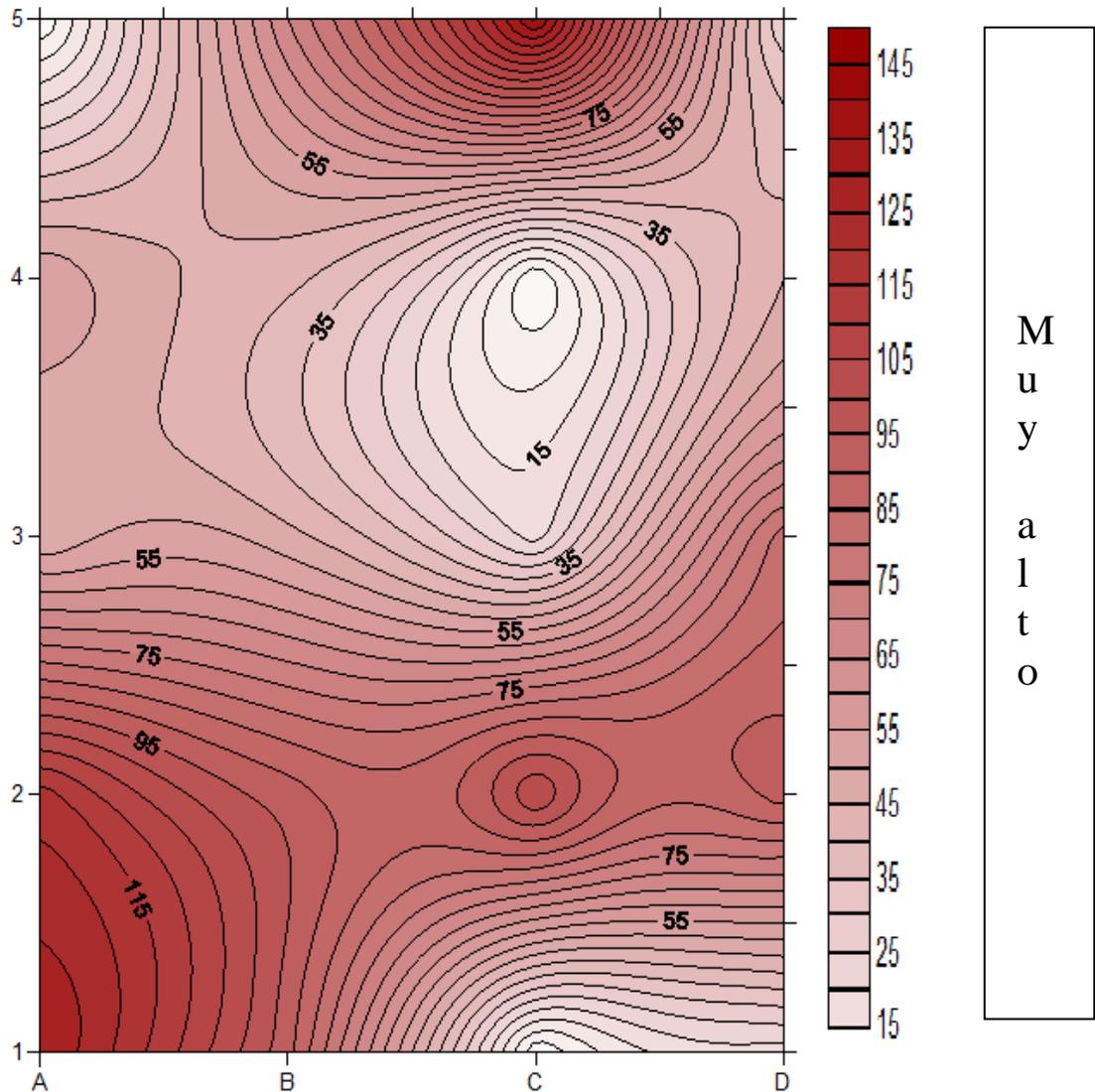


Figura 18. Mapa de isótopos de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$) solubles, con escala en color.

En contraste con los mapas de variabilidad espacial de pH, conductividad eléctrica y materia orgánica no se distingue un patrón tan claro de variabilidad espacial con los parámetros analizados, excepto que se diferencian zonas con diferente acumulación de Ca^{2+} y Mg^{2+} disponibles lo que ciertamente genera diferentes estrategias y concentraciones de los mejoradores químicos.

3.1.5 Capacidad de intercambio catiónico

En la tabla 16 se observan los valores de capacidad de intercambio catiónico del suelo por cada punto de muestreo y respecto a la tabla 17 su clasificación, que

corresponde con el 10% de las muestras presentando valores medios, 15% a muy alto y el 75% restante alta.

Independientemente de la clasificación, los valores más bajos de las muestras son B1, B2 y B3 y los más altos son A2, C5 y B1.

Tabla 16. Resultados de CIC ($\text{Cmol}_c \text{Kg}^{-1}$) por puntos de muestreo.

	A	B	C	D
1	37.0	23.2	33.3	45.0
2	42.1	24.2	30.8	35.3
3	32.8	25.5	31.8	34.0
4	30.5	26.6	33.2	29.6
5	38.9	27.	41.9	30.8

Tabla 17. Interpretación de CIC ($\text{Cmol}_c \text{Kg}^{-1}$) según SEMARNAT (2000).

Clase	CIC ($\text{Cmol}_c \text{Kg}^{-1}$)
Muy alta	> 40
Alta	25 – 40
Media	15 – 25
Baja	5 – 15
Muy baja	< 5

En la figura 19 se presenta el mapa de variabilidad espacial de capacidad de intercambio catiónico que cuenta con una escala de interpretación de la parcela que va de 23 a 46 $\text{cmol}_c \text{Kg}^{-1}$ de suelo, lo que indica ser media, alta y muy alta en la escala de interpretación. Predominando el intervalo alto, que va de 25 a 40 $\text{cmol}_c \text{Kg}^{-1}$, se muestra que el 10% del terreno corresponde con la clasificación de media, el 75% con la clasificación de alta y el 15% restante con la clasificación de muy alta.

Se puede observar una franja que atraviesa la parcela de norte a sur, donde se encuentran los valores de CIC más bajos y en la parte noreste, suroeste y sureste los puntos de concentraciones más altas.

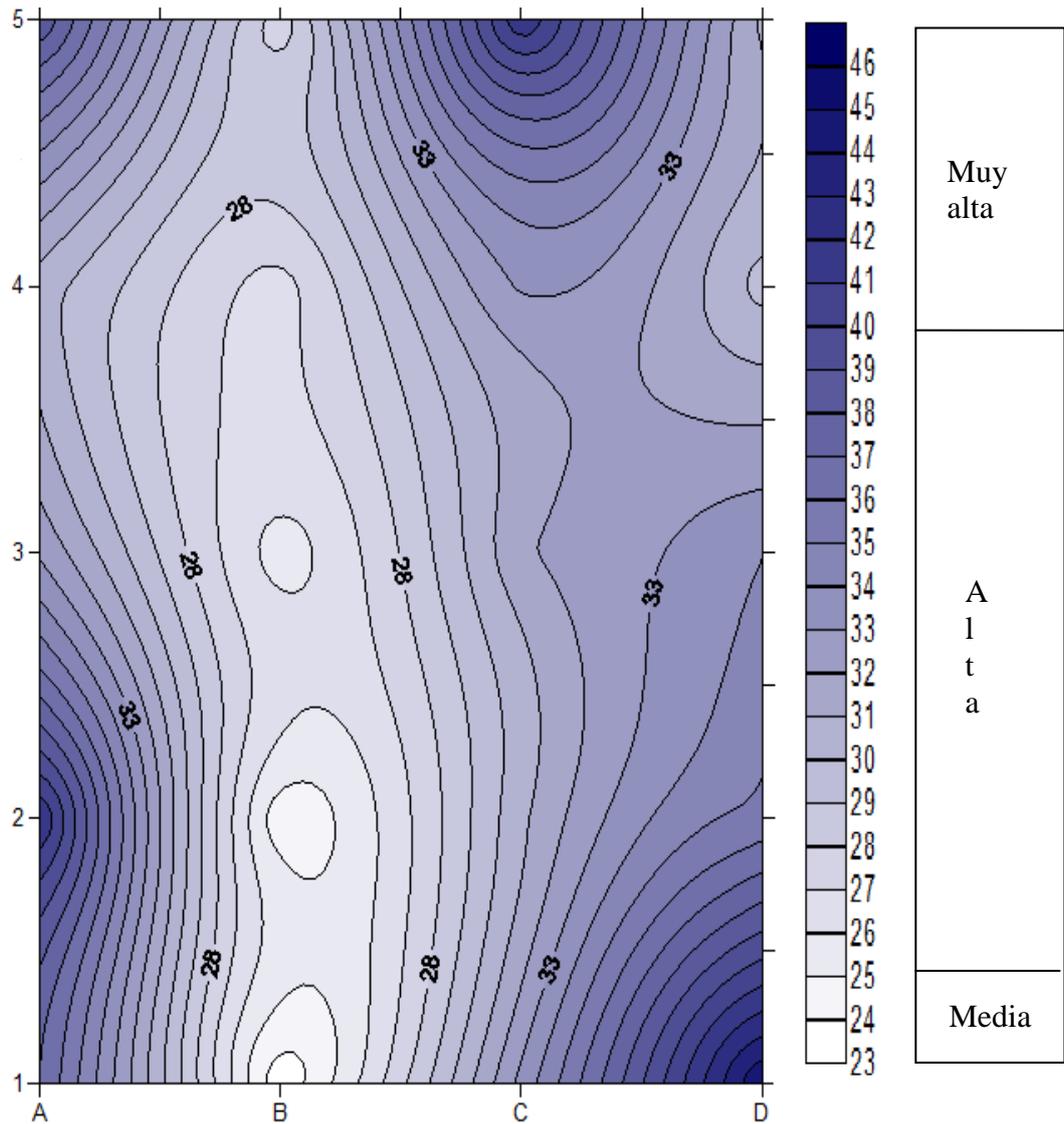


Figura 19. Mapa de isolíneas de CIC ($\text{Cmol}^+ \text{Kg}^{-1}$) con escala en color.

Esto tiene implicaciones prácticas, ya que donde hay valores más altos de CIC mayor es la posibilidad de poseer ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$), al tiempo de disolverse el Na^+ , lo que ayudaría al procedimiento de rehabilitación, cabe mencionar que no se observa ningún patrón con respecto al pH, la conductividad eléctrica, la materia orgánica, y/o los contenidos de calcio más magnesio

3.1.6 Carbonatos en suelo

En la tabla 18 se pueden observar los valores de porcentaje de carbonatos en suelo por cada punto de muestreo y respecto a la tabla 19 su clasificación, donde el 100% de las muestras resultaron con valores medios.

Independientemente de la clasificación los valores más bajos de las muestras son A2, A4 y B4 y los más altos son A1 y C3.

Tabla 18. Resultados de carbonatos (%) en suelo por puntos de muestreo.

	A	B	C	D
1	10.1	7.3	6.5	6.5
2	6.5	5.4	6.2	5.5
3	6.2	7.0	8.3	5.5
4	5.4	6.5	7.5	5.1
5	6.0	7.0	6.2	5.7

Tabla 19. Interpretación de carbonatos en suelo (%) según SEMARNAT (2000).

Clase	% CaCO ₃
Muy bajo	< 0.5
Bajo	0.5 – 2.0
Medio	2.1 – 15
Alto	16 – 40
Muy alto	> 40

En la figura 20 se muestra el mapa de variabilidad espacial de porcentaje de carbonatos en suelo que cuenta con un intervalo que va de 5 a 10.1 lo que corresponde a una clasificación de mediano.

Independientemente de que la clasificación del 100% de la parcela sea de mediano, se puede observar que en la parte central y en la suroeste se encuentran las mayores concentraciones y en la parte noroeste y noreste las más bajas concentraciones, indicando dónde se localizan principalmente los carbonatos precipitados y posiblemente la evaporación inicial y concentraciones de sales.

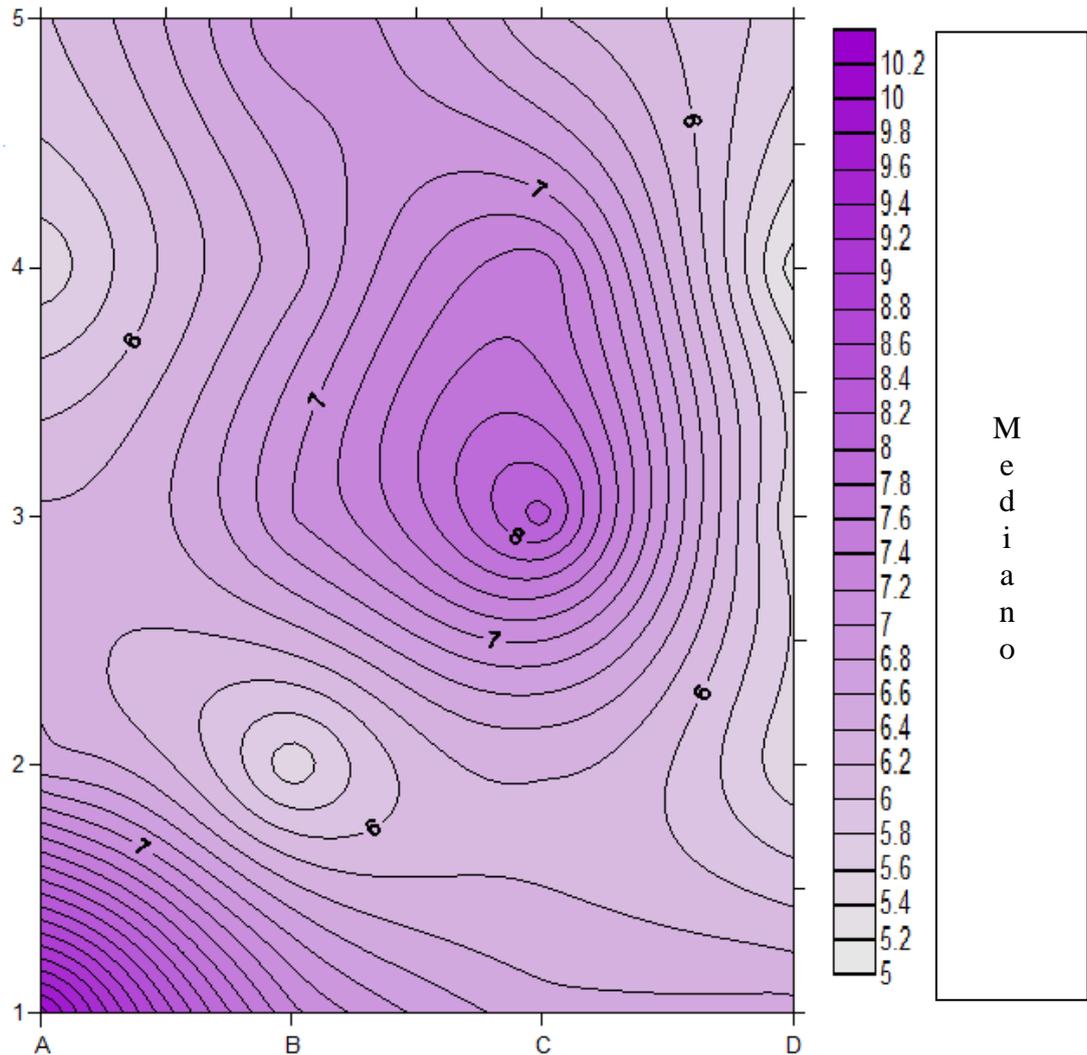


Figura 20. Mapa de isótopos de carbonatos en suelo (%) con escala en color.

No se presenta contraste con los otros mapas de variabilidad espacial, sin embargo es sabido que a mayor alcalinidad, mayor dificultad de rehabilitación, ya que esto implica un procedimiento extra de acidificación. Por el contrario si la alcalinidad es menor, mayor oportunidad de disponibilizar iones Ca^{2+} del suelo para competir y desplazar a los iones Na^+ .

3.1.7 Porcentaje de Sodio Intercambiable, PSI

En la tabla 20 se pueden observar los valores de PSI en suelo por cada punto de muestreo, y respecto a la tabla 21 su clasificación resultó en un 85% de las muestras con valores que sitúan al terreno entre los extremadamente sódicos, el 15% restante resultó en suelos no sódicos, muy probablemente debido a la diferencial de acumulación de agua en zonas específicas del terreno y los

procesos diferenciales de evapo-transpiración, que permiten una variabilidad espacial muy profusa.

Independientemente de la clasificación los valores más bajos de las muestras son C2, C5 y D2 y los más altos son A3, A4 y C3.

Tabla 20. Resultados de PSI (%).

	A	B	C	D
1	64.3	63.7	nd	71.48
2	66.6	77.3	60.1	50.9
3	80.2	75.8	85.7	62.5
4	81.1	66.0	nd	70.2
5	nd	70.3	53.5	65.3

nd= No detectable

Tabla 21. Interpretación de PSI (%) según Ilaco (1981).

Clase de Sodicidad	PSI	Reducción del rendimiento
No sódicos	<7	0-20%
Ligeramente sódicos	7-14	20-40%
Moderadamente sódicos	15-20	40-60%
Fuertemente sódicos	21-30	60-80%
Extremadamente sódicos	>30	>80%

En la figura 21 se presenta el mapa de variabilidad espacial el porcentaje de sodio intercambiable que cuenta con un intervalo que varía de prácticamente 0 a 90, lo que corresponde con una clasificación para los suelos que va desde los no sódicos, a los extremadamente sódicos. Independientemente que la clasificación del 85% de la parcela sea de extremadamente sódicos, se puede observar que en la parte noroeste, noreste y sureste se encuentran manchones con niveles muy

bajos de acumulación de sodio, y el resto del terreno se comporta constante en extremadamente sódicos.

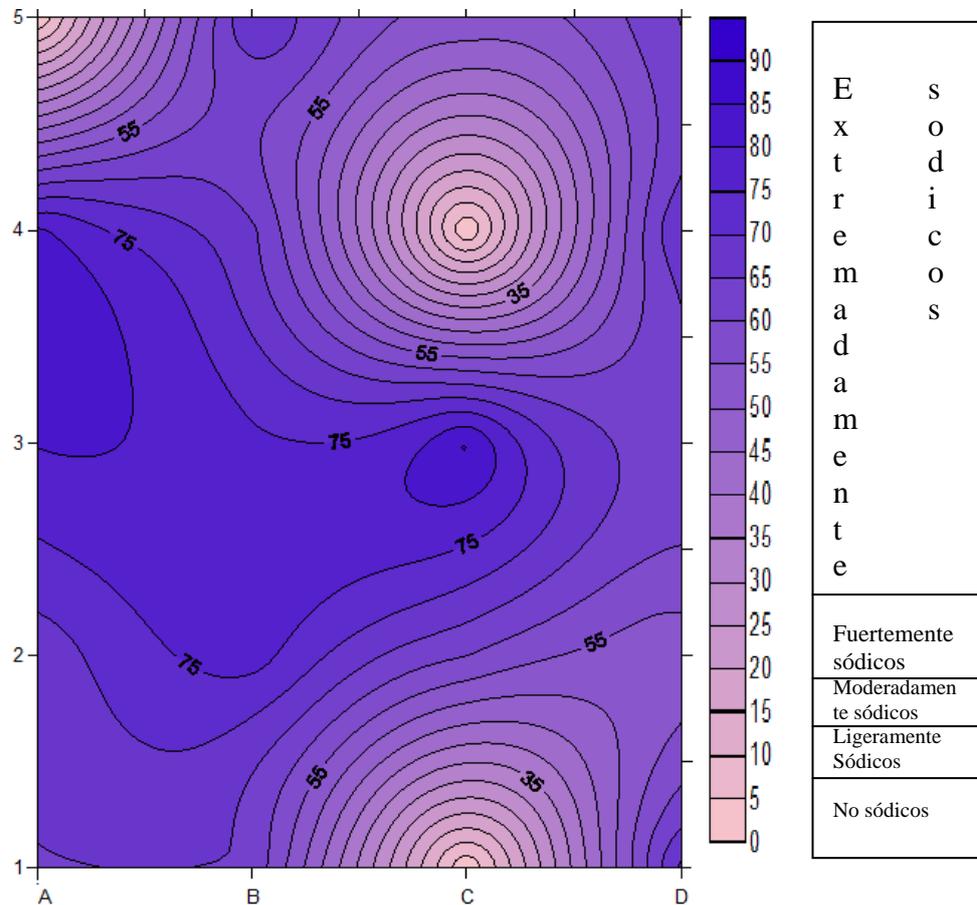


Figura 21. Mapa de isolíneas de PSI (%) con escala en color.

Se puede observar que este mapa de variabilidad espacial tiene una correspondencia con los niveles de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$, que indica que el 85% del terreno puede presentar una reducción del crecimiento mayor al 80%. Cabe mencionar que para fines prácticos se determinó el promedio de PSI, mismo que resultó ser de 54, valor a partir del cual se instrumentó la metodología de cálculos aplicable en campo.

3.1.8 Aniones solubles

3.1.8.1 Cloruros

En la tabla 22 se pueden observar los valores de concentración de cloruros en el suelo por cada punto de muestreo y respecto a la tabla 23 su clasificación, que fue del 100% de las muestras mostrando clorosidad muy mala.

Independientemente de la clasificación los valores más bajos de las muestras son B4, C1 y D5 y los más altos son A5, B2 y C4.

Tabla 22. Resultados de cloruros (meq l^{-1}) por puntos de muestreo.

	A	B	C	D
1	219	132	78	137
2	201	240	161	184
3	183	139	252	213
4	251	111	267	211
5	342	288	181	111

Tabla 23. Interpretación de cloruros ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$) según Ilaco (1981).

Calidad	Cl^-
Excelente	< 7
Buena	7 – 14
Media	15 – 20
Mala	21 – 30
Muy mala	> 30

En la figura 22 se muestra el mapa de variabilidad espacial de cloruros que cuenta con un intervalo que va de 70 a 350 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ lo que corresponde a una clasificación de muy mala.

Independientemente que la clasificación del 100% de la parcela sea de muy mala, se puede observar que en la parte noreste y en la central se encuentran las mayores concentraciones y en la parte central y sureste las más bajas concentraciones.

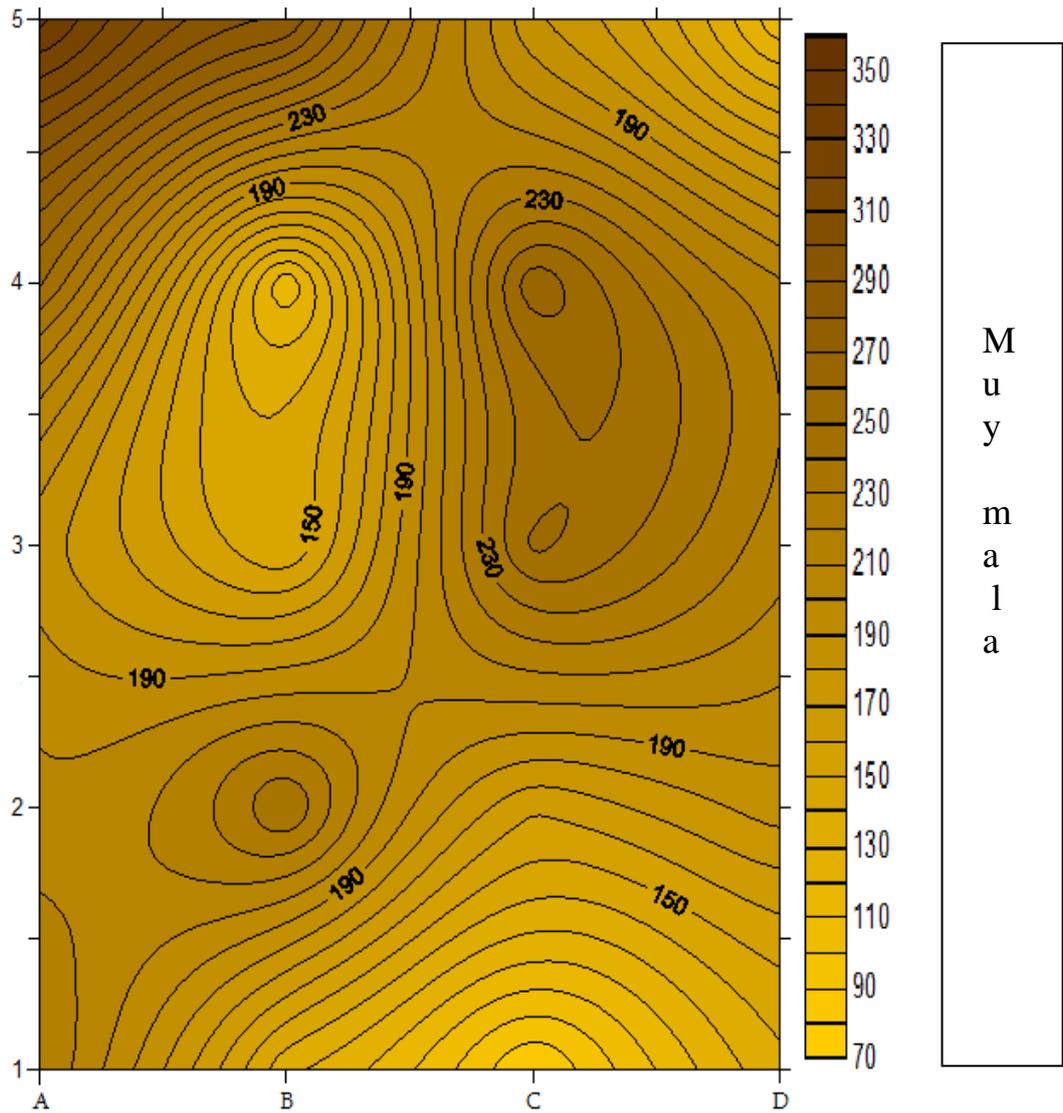


Figura 22. Mapa de isolíneas de cloruros ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$) con escala en color.

El terreno presenta una gran cantidad de cloruros, los cuales en bajos niveles son nutrimentales para las plantas, pero las concentraciones que se presentan en la parcela resultan extremadamente tóxicas para las plantas, especialmente debido al efecto osmótico sobre las raíces..

3.1.8.2 Sulfatos

En la tabla 24 se puede observar los valores de concentración de sulfatos son irregulares, correspondiendo los más bajos a las muestras A1, B4 y C1 y los valores más altos a las muestras A2, A3 Y B3.

Tabla 24. Resultados de sulfatos ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$) por puntos de muestreo.

	A	B	C	D
1	284.1	291.1	31.8	nd
2	447.2	921.4	271.9	nd
3	448.9	335.0	379.6	nd
4	401.2	136.7	nd	nd
5	373.6	nd	nd	nd

Nd = no detectable

En la Figura 23 se muestra el mapa de variabilidad espacial de sulfatos, que cuenta con un intervalo que va de 50 a 950 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$, además en la parte suroeste se encuentran las mayores concentraciones y en el resto de la parcela se mantienen concentraciones constantes, siendo las más bajas en el noreste.

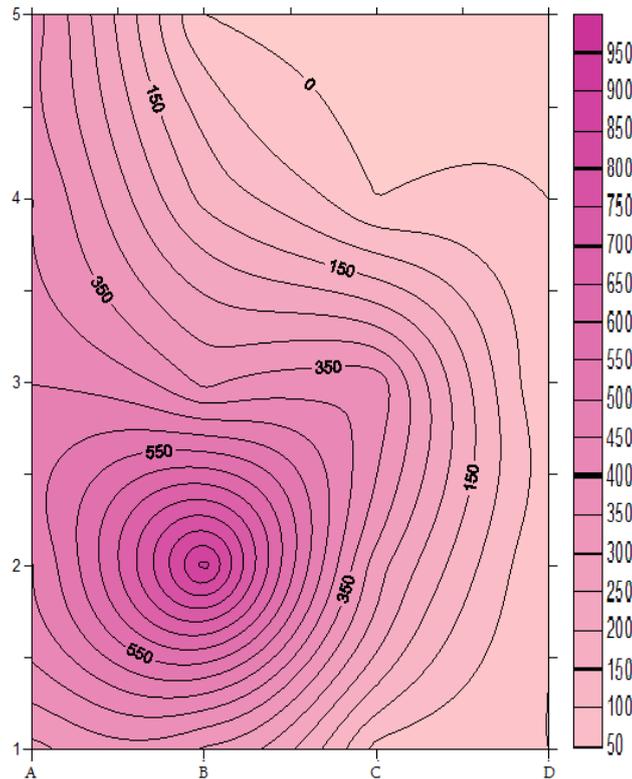


Figura 23. Mapa de isolíneas de sulfatos ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$) con escala en color.

3.1.8.3 Clasificación salina con base en relaciones aniónicas

Con base a los apartados 3.1.8.1 y 3.1.8.2 se realizaron los cálculos necesarios para obtener las relaciones aniónicas que existen en la parcela.

En la Tabla 25 se pueden observar los valores de relaciones aniónicas por cada punto de muestreo y respecto a la Tabla 26 su clasificación es del 95% de las muestras clorhídrico-sulfáticos y el 5% restante de sulfato-clorhídrico.

Independientemente de la clasificación los valores más bajos de las muestras son A2, A3 y B2 y los más altos son A5, B4 y C1.

Tabla 25. Resultados de relaciones aniónicas.

	A	B	C	D
1	0.8	0.4	2.5	nd
2	0.4	0.3	0.6	nd
3	0.4	0.4	0.7	nd
4	0.6	0.8	nd	nd
5	0.9	nd	nd	0.9

nd =valor de cero o indeterminada

Tabla 26. Clasificación salina con base en relaciones aniónicas según Ilaco (1981).

Clasificación	Relación	mmol _e L ⁻¹
Sulfáticos	Cl ⁻¹ /SO ₄ ²⁻	<0.2
Clorhídrico-sulfáticos	Cl ⁻¹ /SO ₄ ²⁻	0.2-1
Sulfato-clorhídricos	Cl ⁻¹ /SO ₄ ²⁻	1-2.5
clorhídricos	Cl ⁻¹ /SO ₄ ²⁻	>2.5

3.1.8.4 Fosfatos

En la tabla 27 se pueden observar los valores de concentración de fosfatos en el suelo por cada punto de muestreo y respecto a la tabla 28 su clasificación es del 100% de las muestras de muy alto.

Independientemente de la clasificación los valores más bajos de las muestras son B4, C1 y D5 y los más altos A4, A5 Y B5.

Tabla 27. Resultados de fosfatos ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$) por puntos de muestreo.

	A	B	C	D
1	513	396	226	346
2	415	383	354	351
3	600	478	504	543
4	826	331	523	452
5	995	651	550	326

Tabla 28. Interpretación de fosfatos ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$) calculados por el método de Olsen, según Castellanos (2000)

Clasificación	Rango
Muy Bajo	0-0.13
Bajo	0.16-0.29
Moderadamente Bajo	0.33-0.49
Medio	0.52-0.66
Moderadamente Alto	0.69-0.82
Alto	0.85-1.14
Muy Alto	>1.18

En la figura 24 se muestra el mapa de variabilidad espacial de fosfatos, y se cuenta con un intervalo que va de 200 a $1000 \text{ mmol}_c \text{L}^{-1}$ lo que corresponde a una clasificación de muy alto.

Independientemente que la clasificación del 100% de la parcela sea de muy alto, se puede observar que en la parte noroeste se encuentran las mayores

concentraciones de fosfatos y en el resto de la parcela se mantienen concentraciones constantes, siendo las más bajas en la parte noreste, central y sureste.

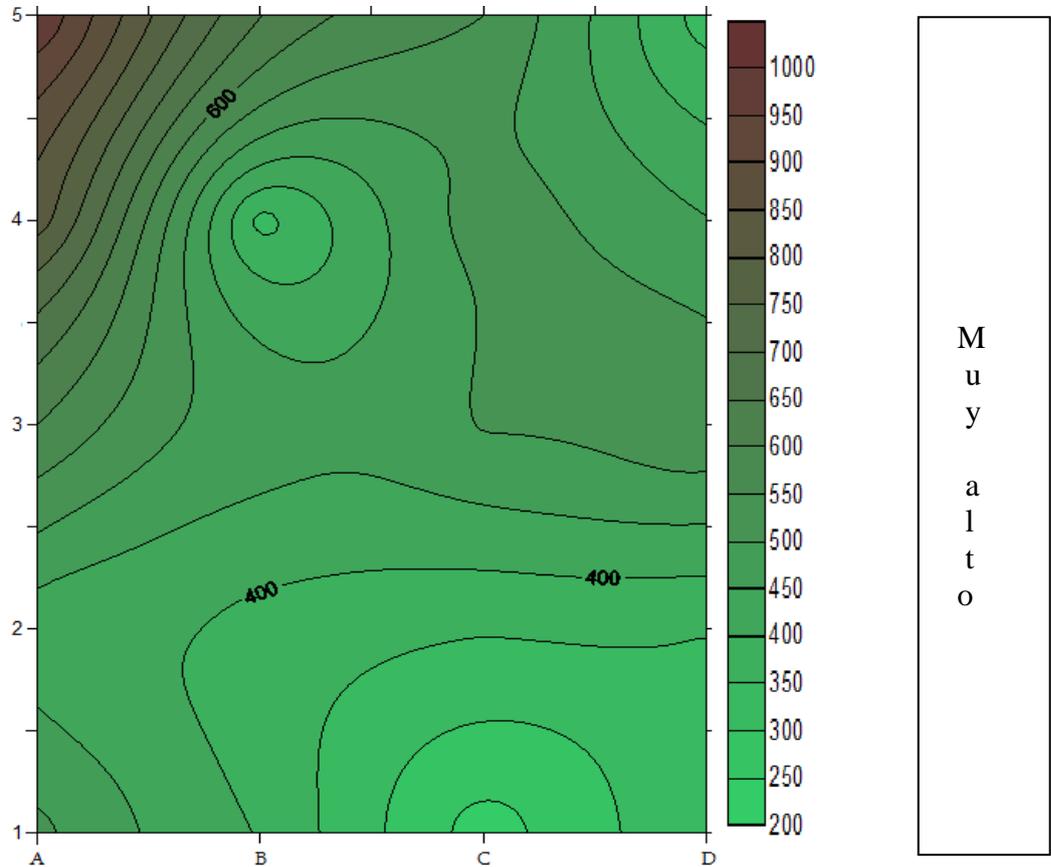


Figura 24. Mapa de isolíneas de fosfatos (mmolc L^{-1}) con escala en color.

La alta concentración de fosfatos en la parcela se puede deber al uso del agua de riego que proviene de la laguna de Zumpango la cual contiene desechos domésticos urbanos, lo que genera un incremento en los niveles de fosfatos, muy documentado en la literatura estándar de tratamiento de aguas residuales. Existe una zona de mayor acumulación en la parte noroeste, no mostrando un patrón similar a ninguna otra propiedad o característica de los suelos analizados.

3.1.9 Porcentaje de saturación

En la tabla 29 se puede observar que los valores de porcentaje de saturación del suelo son homogéneos, correspondiendo los valores más bajos a las muestras A2, A3 y A5 y los valores más altos corresponden a las muestras C4, D1 y D4.

Tabla 29. Resultados de porcentaje de saturación (%) por puntos de muestreo.

	A	B	C	D
1	38.2	38.2	41.2	41.6
2	36.8	38.4	39.8	41.0
3	37.1	39.4	41.2	41.3
4	38.1	39.7	42.4	41.6
5	37.4	40.0	41.4	41.4

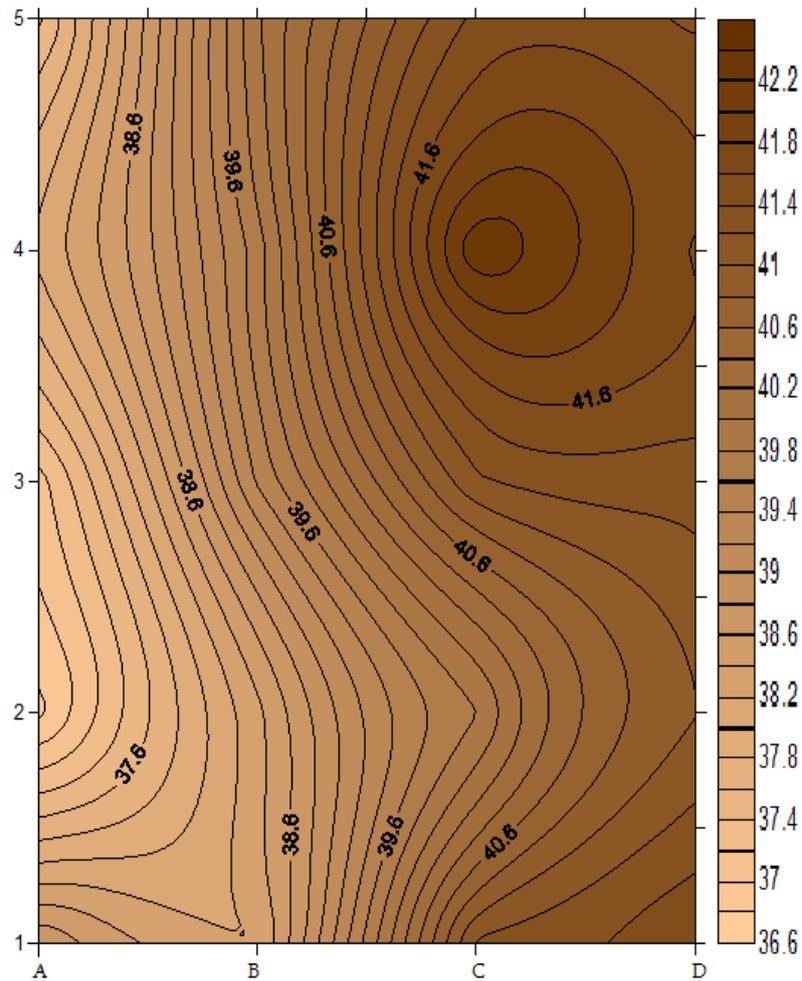


Figura 25. Mapa de isolíneas de porcentaje de saturación (%) con escala en color.

En la figura 25 se muestra el mapa de variabilidad espacial de porcentaje de saturación que cuenta con un intervalo que va de 36.6 a 42.2. En el mapa también podemos observar que todo el lado oeste del mismo es donde se encuentra en menor porcentaje y siendo todo el lado este el mayor porcentaje, lo que directamente tiene implicaciones sobre la susceptibilidad a la compactación, en combinación con los valores de densidad aparente, de retención de humedad y de

posible saturación y encharcamiento, uno de los principales problemas del terreno en estudio.

3.1.10 Densidad aparente

En la tabla 30 se muestran los valores de densidad aparente en el suelo por cada punto de muestreo. Aunque los simples valores de densidad aparente no permiten comparaciones de unos suelos con otros, pues los suelos con texturas más livianas suelen dar valores más altos. Pueden considerarse altos aquellos superiores a 1.3 en suelos de textura fina (arcillosos o franco arcillosos), a 1.4 en suelos de textura media (francos a franco limosos), y a 1.6 en suelos de textura gruesa (franco arenosos). Al respecto y toda vez que en promedio la textura del suelo (siguiente sección) clasifican al suelo como franco-arcilloso, se considera al respecto que el suelo se encuentra compactado en un 70% de su extensión ($d_s > 1.3$). Independientemente de la clasificación los valores más bajos de las muestras son A5, C4 y D4 y los más altos son A1, A2 y B2.

Tabla 30. Resultados de densidad aparente (g cm^{-3}) por puntos de muestreo.

	A	B	C	D
1	1.77	1.38	1.27	1.38
2	2.05	1.68	1.49	1.28
3	1.47	1.40	1.57	1.39
4	1.35	1.51	1.24	1.06
5	1.22	1.27	1.45	1.44

En la figura 26 se muestra el mapa de variabilidad espacial de densidad aparente con una escala que va de 1.05 a 2.05 g/cm^3 de suelo.

Se puede observar que en la parte sureste se encuentra las más alta compactación y en la parte noroeste los valores más bajos.

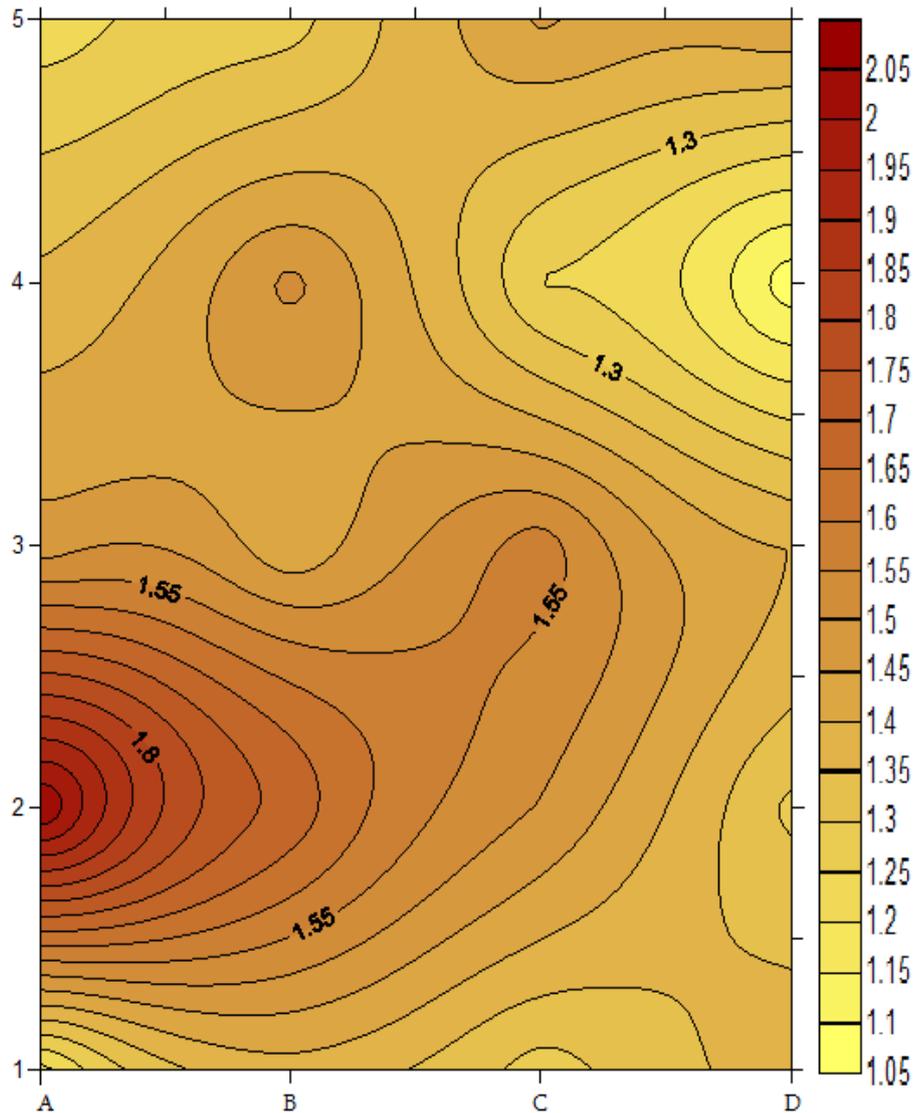


Figura 26. Mapa de isótopos de densidad aparente (g cm^{-3}) con escala en color.

En este mapa se puede observar que sigue el mismo patrón que los mapas de variabilidad espacial de pH, materia orgánica y conductividad eléctrica lo que indica que entre mayor densidad aparente se presenta mayor compactación que da como resultado mayor sodicidad y menor salinidad.

2.3.11 Textura

En la Figura 27 se observa la proporción promedio de todos los suelos, analizados en una muestra compuesta. La cantidad de limos, arenas y arcillas en el suelo determinan la textura, del cual el valor determinado es de : suelo franco arcilloso (Tabla 32).

Tabla 32 Resultados de textura del suelo promedio (%)

Propiedad	Porcentaje %
Arena	43.9
Limo	25.6
Arcilla	30.5

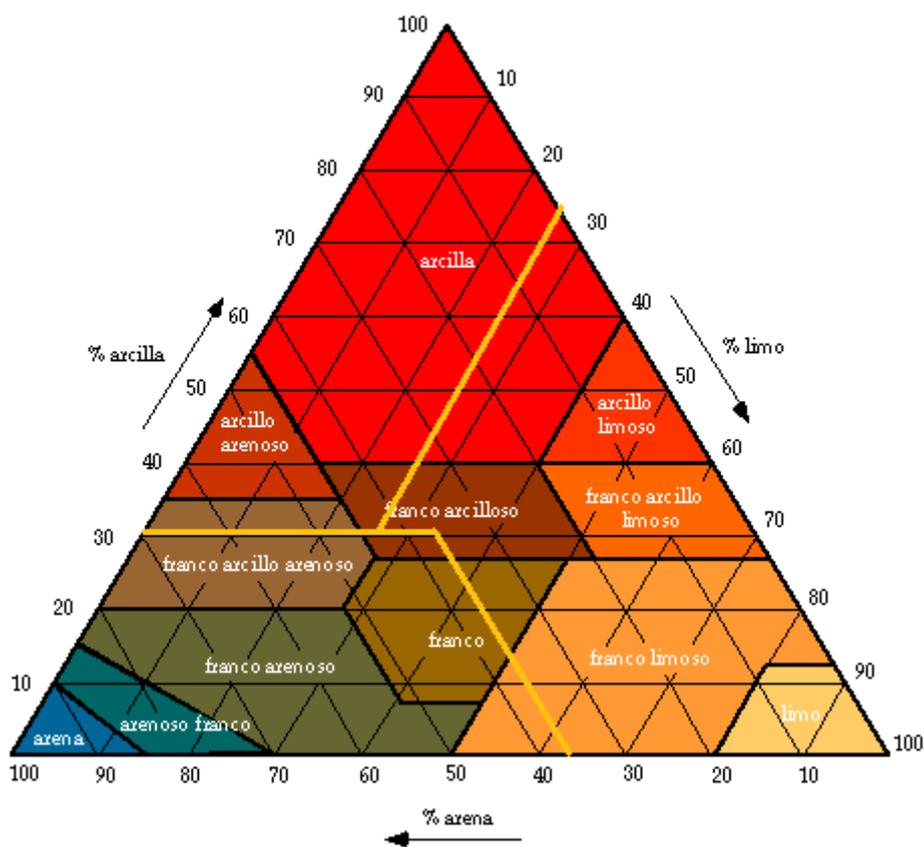


Figura 27 Triángulo de Texturas

3.2 Pruebas biológicas vs rehabilitación

3.2.1 Porcentaje de germinación

El porcentaje de germinación de la semilla de maíz puma 1076 fue del 99 % lo cual según Tadeo y Espinosa (2004) significa que la semilla cuenta con la calidad

biológica necesaria para su germinación, emergencia y desarrollo; también se obtuvieron los requerimientos edafoclimáticos necesarios para la expresión de su calidad, lo cual es muy importante en una semilla comercial y certificada.

3.2.2 Altura de la planta

De acuerdo con los datos experimentales se observa que, a proporción decreciente de yeso y creciente de lavado, la altura de la planta es menor con respecto al tiempo (Figura 28). Esta variación en el crecimiento se debe a que entre más iones Na^+ se encuentren adsorbidos y no sustituidos por iones Ca^{2+} , es decir, a mayor PSI, los primeros impiden el desarrollo óptimo de las plantas porque representan toxicidad hacia ellas, lo cual explica la diferencia entre las alturas de los individuos experimentales para cada tratamiento.

También se puede observar que el control es el que tiene un mayor crecimiento y esto es a consecuencia de que es un suelo no salino, lo cual genera un mejor desarrollo fisiológico. Los datos con estadísticos univariantes pueden consultarse en el anexo 3.

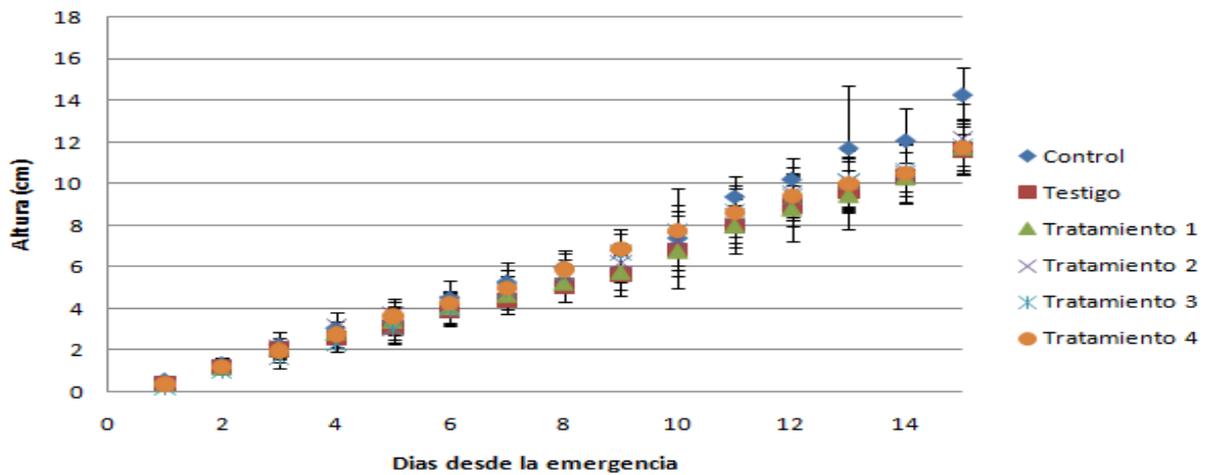


Figura 28 Altura de la planta contra tiempo desde la emergencia

El análisis de varianza (Anexo 4) revela que las diferencias significativas se presentan en los días 1,4,9,14 y 15 de modo que el valor de p es mayor a 0.05 para los días anteriores, y mostrando que el suelo control, es el que presenta una diferencia significativa respecto a todos los demás tratamientos.

3.2.3 Grosor de tallo

Nuevamente, se puede observar la tendencia de los individuos a desarrollarse de mejor manera en el control y en el tratamiento 1 siendo el que contiene mayor cantidad de yeso y menor lavado y de manera decreciente hacia los siguientes tratamientos, siendo el más bajo el testigo, seguido por el tratamiento 4.

Se puede distinguir a partir de sexto día las diferencias en el grosor del tallo de cada tratamiento, alterándose de mayor manera a partir del día 13 en el cual se alcanza su mayor engrosamiento. (Figura 29). Los datos con estadísticos univariantes pueden consultarse en el anexo 5.

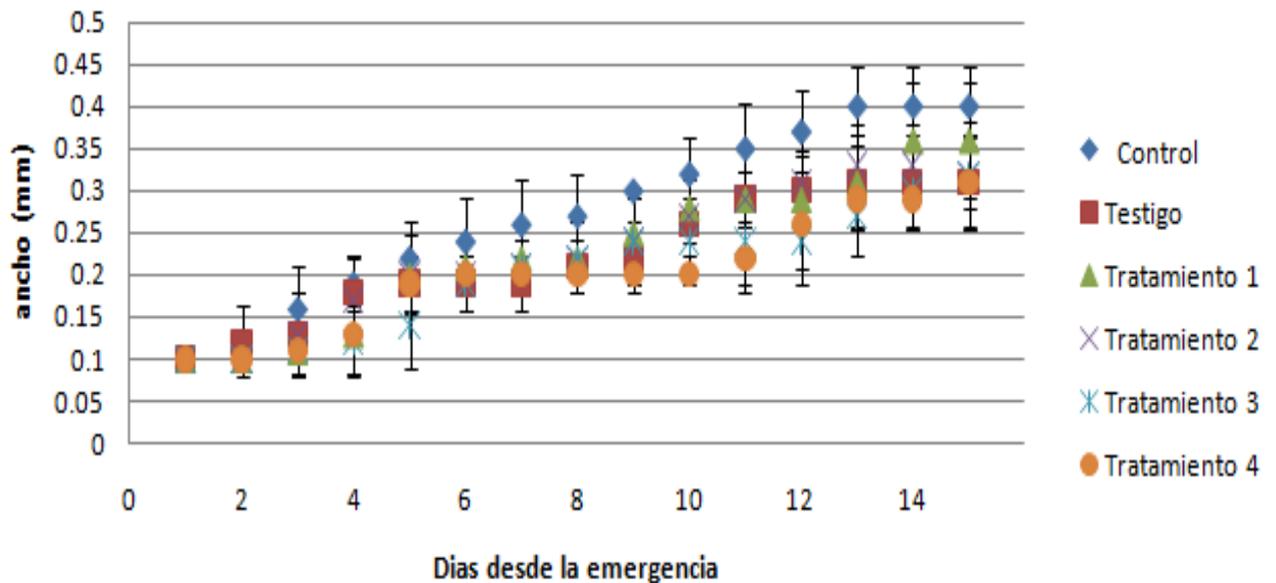


Figura 29 Grosor de tallo contra tiempo desde la emergencia

El análisis de varianza (Anexo 6) revela que las diferencias significativas se presentan a partir del cuarto día, de modo que el valor de p es mayor a 0.05 para los días anteriores, y mostrando nuevamente que el testigo suelo no salino es el que presenta una mayor diferencia significativa respecto a todos los demás tratamientos.

3.2.4 Clorofila

La tendencia general de la cantidad de clorofilas en unidades SPAD establece mayores diferencias con el paso del tiempo, teniendo menores valores, nuevamente lo tratamientos con menor cantidad de yeso y mayores lavados. Solo es inusual que el control presenta las mayores concentraciones de clorofilas, lo cual puede ser explicado de tal manera que a su menor altura y grosor, tiene hojas más pequeñas lo cual da una menor área foliar y lo que podría dar mayor concentración en menor espacio. La otra posible explicación es que en estos estadios de las plantas, aun la cantidad de nutrientes es suficiente como para mostrar

La tendencia a la disminución de clorofila en el ultimo día se debe al mayor desarrollo de las raíces que se encuentran dentro de los cartuchos, los cuales no aportan el suficiente espacio para su desarrollo, por lo que al no contar con más volumen para el desarrollo de raíces, comienza a generar el así denominado estrés radicular, lo cual se puede ver reflejado en una deficiencia nutrimental y a su vez en una menor producción de clorofila (Figura 30).

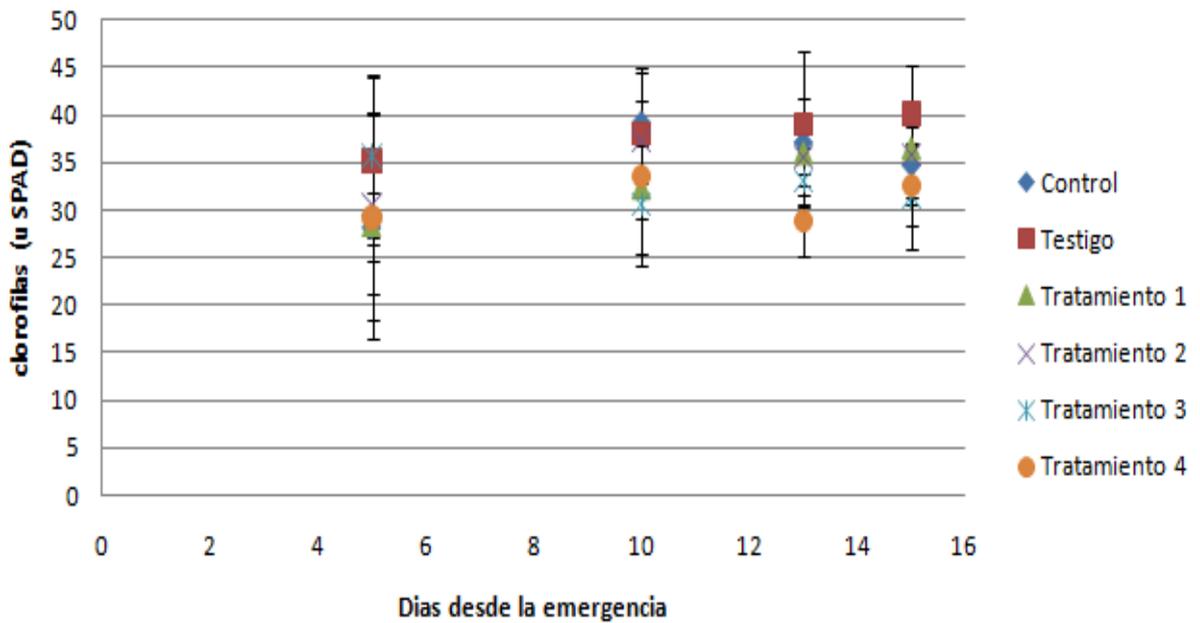


Figura 31 Cantidad de clorofilas en hojas viejas

El análisis de varianza (Anexo 7) revela que las diferencias significativas se presentan en los días 10, 14 y 15 de modo que el valor de p es mayor a 0.05 para el día anterior, mostrando que la cantidad de clorofila de cada tratamiento no es igual entre ellos mismos.

3.2.5 Longitud de raíz

De acuerdo con los datos experimentales se puede observar que el testigo de suelo salino sin modificación presenta el menor crecimiento de raíz, esto como resultado de la cantidad de sales presentes en el suelo que impiden que la planta realice su ajuste osmótico por lo cual hay una baja absorción de nutrimentos lo que genera un pobre desarrollo radicular y aéreo (Otegui y Slafer, 2000). El resto de los tratamientos y el testigo suelo no salino presentan una longitud en la que estadísticamente no se presentan diferencias con altos valores de significancia, independientemente de que a la vista sean distintos, lo que lleva a pensar que tuvieron un buen ajuste osmótico y absorción de nutrientes por lo que se presentó un buen desarrollo radicular y aéreo de la planta (Figura 31)

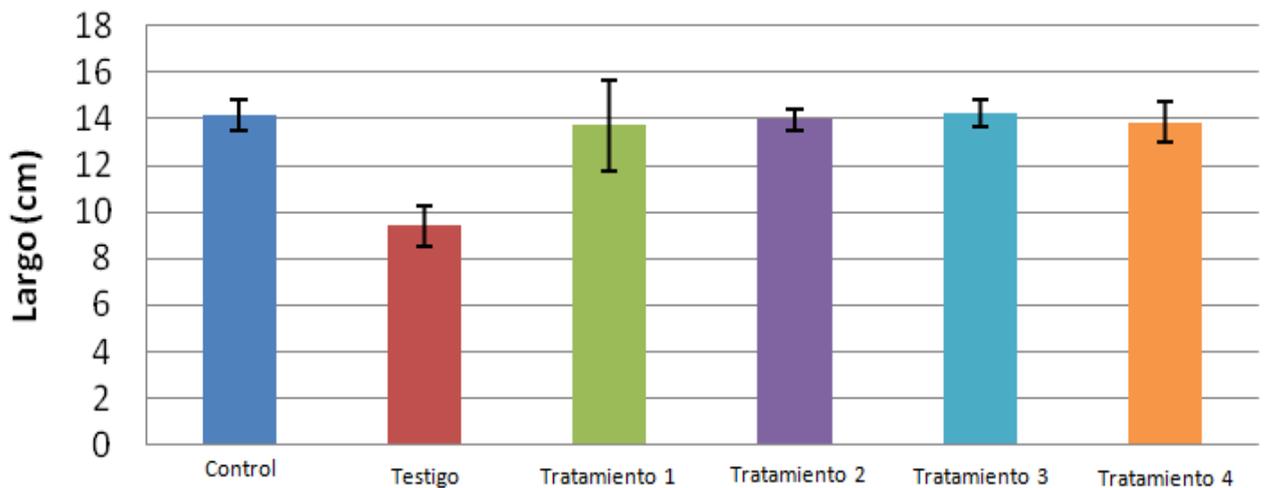


Figura 31 Longitud de raíz a los 15 días de emergencia

El análisis de varianza (Anexo 8) revela que no se presenta una diferencia significativa para todas las plantas, siendo el control el que presenta una mayor diferencia respecto a los demás tratamientos.

3.2.6 Masa fresca y masa seca

Respecto a la masa en seco, el porcentaje aprovechable es el siguiente:

Control: 22%

Testigo:	21%
Tratamiento 1:	23%
Tratamiento 2:	17%
Tratamiento 3:	19%
Tratamiento 4:	18%

El tratamiento 1 y el tratamiento 2 muestran la mayor cantidad de materia seca y fresca aprovechable, respectivamente.

El análisis de varianza (Anexo 9) presenta una diferencia significativa para la masa fresca y no se encuentran diferencias significativa para la masa en seco.

3.2.7 Análisis cualitativo de los individuos experimentales

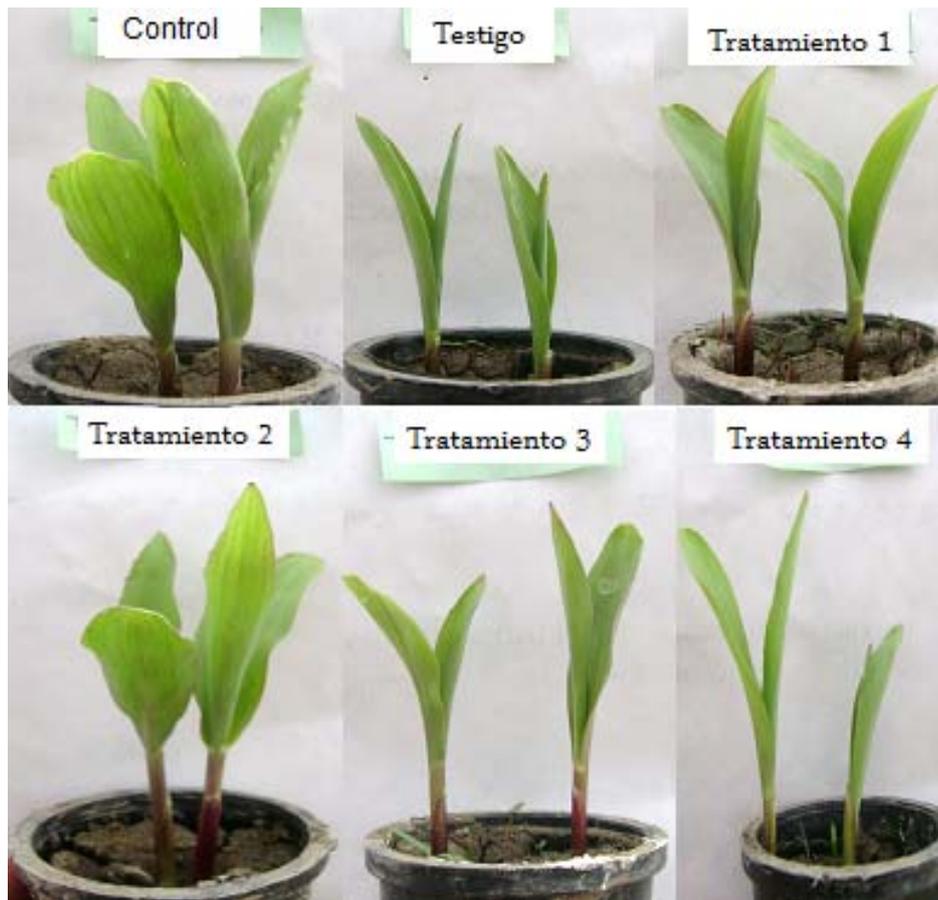


Figura 31 Fotografía de crecimiento a los 10 días desde la siembra

En la figura 31 se puede observar el desarrollo aéreo de las plantas a los diez días posteriores a la siembra, en ella se puede distinguir que el control, tiene un mayor desarrollo fisiológico, mientras el testigo es el que presenta el menor desarrollo, referente a los cuatro tratamientos se pueden observar similitudes en el tamaño de la planta, pero diferencias en el grosor de las hojas.



Figura 32 Fotografía comparativa de crecimiento a los 15 días desde la emergencia

La figura 32 muestra la comparación del crecimiento final de las plantas; se puede observar que el testigo es el que menor desarrollo radicular y aéreo tuvo, por lo que presenta una planta con pocas y cortas raíces y según William (1958) esto puede provocar una falta de adsorción de nutrimentos y agua, lo que lleva a un pobre desarrollo fisiológico, poco sostén y poco crecimiento.

Referente al resto de los tratamientos se puede observar un desarrollo fisiológico muy similar al del control, lo cual significa que dichas plantas mostraron un mayor aprovechamiento nutrimental y de agua.

3.2.8 Transferencia a campo

De acuerdo con la investigación realizada, el escalamiento de las cantidades de yeso para su aplicación en parcela revela que los costos para la implementación de los distintos tratamientos son los que se presentan en la tabla 33, tomando en cuenta el precio de la tonelada de yeso ofertado por el distribuidor ubicado en Tula, Hidalgo, fue de \$ 1,000 por tonelada de yeso.

Tabla 33. Costo total por hectárea.

Tratamientos	Ton/ha	Costo \$
Tratamiento 1 (PSI 10)	251	25,000
Tratamiento 2 (PSI 20)	49	49,000
Tratamiento 3 (PSI 30)	15	15,000
Tratamiento 4 (PSI 409)	5	5,000

La necesidad de yeso por hectárea está disponible en el Anexo 10.

Según FAO (1983), el PSI límite para los cultivos más importantes del mundo es de 22, con lo cual se puede sugerir que el tratamiento 2 es el más indicado para su aplicación al campo, ya que el costo total para la aplicación del yeso sería de \$49,000, generando un PSI de 20, pudiendo de esa manera realizar la siembra de diferentes cultivos para el aprovechamiento del productor y al igual dando un resultado positivo para la rehabilitación de la parcela.

El uso del tratamiento 1 generaría una inversión excesiva para el productor, independientemente de poder otorgar un PSI excelente para los cultivos, y el uso de los tratamientos 3 y 4, generarían una inversión mucho más baja pero un PSI muy alto para poder tener una parcela productiva.

3.2.9 Resumen de resultados

Con referencia a los análisis presentados en las secciones anteriores, se puede resumir que se trata de un terreno con problemas de manejo agrícola, ya que por un lado si bien es cierto que en la historia del terreno se advierten procesos externos que han alterado la calidad del suelo, el manejo errático y la escasa asesoría técnica recibida por los agricultores de la zona han generado la aplicación empírica y descontrolada de mejoradores agrícolas, de los cuales apenas se guarda registro histórico de las adiciones pero no de las cantidades.

Además, de considerar que el estudio arrojó que se trata de un suelo salino, alcalino y sódico, con problemas de encharcamiento, baja productividad, y mal manejo, además de compactación y acumulación de carbonatos y sulfatos de calcio, aun es posible plantear una rehabilitación integral del terreno, a lo que habrá que dar seguimiento a la aplicación de las recomendaciones aquí generadas, pues se tiene la experiencia de una pobre aplicación del agricultor.

IV CONCLUSIONES

1. De acuerdo con los objetivos planteados al inicio de esta investigación, la clasificación física y química del suelo usado en ese trabajo es la siguiente: Tiene un pH fuertemente alcalino, con una conductividad eléctrica que indica que es un suelo fuertemente salino, un alto porcentaje de materia orgánica, al igual que una concentración muy alta de calcio y magnesio solubles, también se concluye que su capacidad de intercambio catiónico es muy alta, la concentración de carbonatos en el suelo es mediana, cuenta con una concentración muy alta de cloruros, sulfatos, fosfatos, un porcentaje de saturación del 39.82, su densidad aparente es arcillosa y su textura es franco arcillosa.
2. Al contar con un suelo con estas características, es entendible que presente un bajo aprovechamiento para la agricultura, por lo que se tornó necesario el desarrollo de tratamientos de rehabilitación para el mismo.
3. De acuerdo con las estrategias de rehabilitación diseñadas se observó que el tratamiento 1 es el que obtuvo mejores valores de los parámetros fisiológicos de (*Zea mays* L.): altura de planta, ancho de tallo, clorofilas, longitud de raíz, peso seco y peso fresco y van disminuyendo conforme disminuye el PSI buscado con cada tratamiento, aunque cabe destacar que estadísticamente los únicos parámetros con una diferencia significativa completa son para largo de raíz y peso fresco.
4. Se debe tomar en cuenta que todos de los tratamientos tuvieron un desarrollo fisiológico mayor que el testigo, el cual fue solo suelo salino, por lo tanto esta investigación presentó resultados positivos, los cuales pueden ser transferidos al campo mexicano realizando los cálculos necesarios para cada caso en específico, utilizando los cálculos realizados de cantidad de yeso por hectárea y el volumen de agua necesario para el lavado, esperando así generar la rehabilitación necesaria para un mejor aprovechamiento del suelo y explotarlo al máximo.

V BIBLIOGRAFÍA

1. Aguilar, S.A., Etchevers, B.J., Castellanos, R.J., 1987. Análisis químico para evaluar la fertilidad del suelo. Sociedad Mexicana de la ciencia del suelo, México. 217pp.
2. Aguirre, G.A., 1993. Química de los suelos salinos y sódicos. FESC/UNAM. México. 130pp.
3. Aguirre, G.A., Del Carmen, C.Ma., Delgadillo, G.G., Leon, R.F., 1985. Manual de laboratorio química FESC/UNAM. México. 170pp.
4. Allinger, L.M., 1984., Química organica., Worth Publishers. E.U.A. 1478pp.
5. Ayers, A.D., 1952. Seed germination as affected by soil moisture and salinity. E.U.A. 84pp.
6. Castellanos, J.Z., Uvalle-Bueno, J.X., Aguilar-Santelises, A., 2000 ., Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas., Segunda edición., Intagri., México. 201pp.
7. Cowan A.K., Rose P.D. & Horne L.G. 1992. Dunaliella salina: a model system for studying the response of plant cell to stress. Journal of Experimental Botany n°43. 1535- 1547pp
8. Driessen., P.M., 1986., A first introduction to quantified evaluation procedures., Agricultural University Wageningen Centre for world food studies., The Netherlands.
9. Ilaco B., 1981 Agricultural Compendium for rural development in the tropics and subtropics, Elsevier, The Netherlands. 739pp.
10. El Universal (a), 2010. Aguas negras matan peces en la laguna de Zumpango. Periódico diario, Versión digital. México. <http://www.eluniversal.com.mx/notas/686306.html>
11. El Universal (b). 2010. Acusan a Conagua de extraer agua de la laguna de Zumpango . Periódico diario, Versión digital. México. <http://www.eluniversal.com.mx/notas/686607.html>
12. El Universal (c). 2009. Entérate ¿Qué es el emisor poniente?. Periódico diario, Versión digital. México. <http://www.eluniversal.com.mx/notas/625216.html>

13. Estado de México., Municipio de Teoloyucan. Versión digital consultada Agosto 2010:
www.estadodemexico.com.mx/portal/teoloyucan/index.php?id=7
14. Evans, L.T., 1983. Fisiología de los cultivos. Traducción González H., Editorial Hemisferio sur, Argentina. 402pp.
15. Fitzpatrick. E., 1981. Suelos su información, clasificación y distribución. Ed. Compañía Editorial Continental S.A. México. 392pp.
16. Food and Alimentation Organization [FAO]. 2004. Carbon Sequestration in Dryland Soils. World Soil Resources Reports. No. 102. Rome.
17. Gómez, O.D., 2004. Recuperación de espacios degradados. Mundi-Prensa. España. 583pp.
18. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática [INEGI]. 1998. Sistema Nacional de Información Geográfica. México
19. Jugenheimer, R.W., 1959. Obtención del maíz híbrido y producción de semilla. FAO. Roma. 458pp.
20. Kamphorst, A., Vens, T., 1980., Analysis of saline and sodic soils., Bodemkunde en bemestingsleer., Wageningen. 49pp.
21. López R., 1985. El diagnostico de suelos y plantas: Métodos de campo y laboratorio. Mundiprensa. España. 288pp.
22. Maas E., 1984. Crop tolerance. Mudison. EUA, 522pp.
23. Milenio, 2008. Agoniza la laguna de Zumpango. Periódico diario, versión digital. México. <http://impreso.milenio.com/node/7013685>
24. Martínez., C.A., Royo, A.R., 1987. Tolerancia de la cebada a la salinidad. Comunicaciones INIA, serie: producción vegetal No. 68, España. 20pp.
25. Nuñez, S.J., 2000., Fundamentos de edafología., Segunda edición., EUNED., Costa Rica. 185pp.
26. Otegui, M.E., Slafer, G.A., 2000. Physiological Bases for Maize Improvement. Food products press., E.U.A. 217pp.
27. Poelhman M., 1976. Mejoramiento Genético de las cosechas., Traducción al español Sánchez D., 5° reimpresión., Editorial Limusa S.A de C.V., México. 453pp.
28. Poljakooff-Mayber, A., y Gale J., 1988., Plants in saline environments. Springer-Verlang, Germany. 213 pp.

29. Porta J., López M., y Roquero C., 2003. Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente. 3ª Edición. Ediciones Mundi-Prensa. España. 929pp.
30. Quesada M A, V Valpuesta (2008) Senescencia y abscisión. *In*: Fundamentos de Fisiología Vegetal. McGraw-Hill Interamericana. España. pp 559-576
31. Reyes, C.P., 1990. El maíz y su cultivo. Editorial. AGT. México. 267pp.
32. Rodríguez, F.H., Rodríguez, A.J., 2002. Métodos de análisis de suelos y plantas. Trillas. México. 196pp.
33. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT]. 2000. NOM-021-RECNAT-2000. Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. México.
34. Servicio Meteorológico Nacional. 2010. Revisión en línea. http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=42&Itemid=75
35. Shainberg, I., Rhoades J., Suarez., and Prather R., 1981. Effect of mineral weathering on clay dispersion and hydraulic conductivity of sodic soils. E.U.A. 929pp.
36. Sherard.L., Dunnigan P., y Decker S., 1976. Identification and Nature of Dispersive Soils, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 102, Germany. 287-301pp.
37. Tadeo, R.M., Espinosa, C.A., 2004., Puma 1075 y Puma 1076, híbridos de maíz de temporal para los valles altos de México (2200 a 2600 msnm)., Revista fitotecnia mexicana., abril-junio., vol.27., numero 002., México. <http://redalyc.uaemex.mx/pdf/610/61027212.pdf>
38. Tadeo, R.M., y Espinoza, C.A., 2004 Producción y Tecnología de Semillas., FESC-UNAM., México. 105pp.
39. Terry N y Waldron L., 1984. Salinity, photosynthesis, and leaf growth. CA. E.U.A. 150pp.
40. William H., 1984., El maíz: Estudio botánico y económico., Secretaria de fomento., E.U.A. 164pp.

VI ANEXOS

Anexo 1 Descripción de Maíz (*Zea mays* L.)

Origen

México es el centro primario de origen, domesticación y dispersión del maíz; que ocurrió hace más de 6 mil años y las migraciones humanas lo llevaron a Sudamérica, en donde tuvo lugar el centro secundario, hace más de 5 mil años, de México se dispersó hacia el norte del continente y posteriormente hacia Europa y Asia. Los indígenas domesticaron e iniciaron la selección del maíz, contribuyendo de manera relevante en la formación de variedades y razas; los agricultores las han conservado por siglos y los científicos las han estudiado y clasificado para su conservación, mantenimiento y mejoramiento (Reyes, 1990).

Descripción Botánica

De acuerdo con Jugenheimer (1990) el maíz es una planta herbácea que pertenece a la familia de Gramineae. Pertenece a la tribu Maydeae, la cual incluye ocho géneros: de los cuales los tres géneros americanos son:

- 1 *Zea*, el cual es de suma importancia.
- 2 *Tripsacum*, el cual posee cierto valor como cultivo forrajero, pero ninguno como cultivo de grano.
- 3 *Euchlaena* (teosintle), que parece ser el pariente silvestre más cercano del maíz.

Utilización e importancia

El maíz es una de las plantas más útiles al hombre: su importancia puede analizarse en diversos aspectos como son: académico, científico, social y económico (Reyes, 1990).

De una perspectiva académica es una planta de amplio espectro en su utilidad para múltiples ejemplos y medios de ayuda en cursos de biología, química y agronomía. Son escasas las especies de plantas que compiten con el maíz. Su importancia biológica radica en su uso como recurso biológico para explicar teorías, principios y leyes que han contribuido en los avances de las ciencias biológicas y sus aplicaciones en agronomía; en la creación de nuevas tecnologías que se aplican en fitotecnia y conocimiento de causas que explican los efectos en diversos caracteres de plantas y animales (Evans, 1983). De acuerdo con Reyes (1990), el maíz en la sociedad significa trabajo, moneda, pan y religión para grandes conglomerados humanos. El maíz representa un bienestar social en y entre los pueblos que lo producen, evitando así, la dependencia del extranjero y resguardando su soberanía al no tener que importar este producto básico.

El maíz tiene múltiples usos que se pueden agrupar en los siguientes rubros:

- 1 Grano: alimentación humana, alimentación del ganado, materia prima en la industria y semilla.
- 2 Planta: forraje verde, ensilado, rastrojo, forraje tosco, materia orgánica al suelo.
- 3 Mazorca: elote (alimento humano), forraje tosco y olote (combustible).

La importancia del maíz en el mundo y en México se manifiesta por los siguientes rubros: significa bienestar económico para los países autosuficientes y/o exportadores; los múltiples usos como alimento humano directo o transformado en carne, huevo, leche y derivados; como insumo en la industria; por su amplia área geográfica de cultivo, que se encuentra en 134 países dispersos en el mundo (82 % de los países del mundo lo producen) y por su alto volumen de producción (Poelhman, 1976).

Anexo 2 Cálculos para utilización de yeso y agua por cada tratamiento

A continuación se presentan los cálculos realizados para la aplicación de los tratamientos de rehabilitación de los suelos estudiados.

Interpretación de formulas:

PSI= Porcentaje de sodio intercambiable.

k_G = Constante de Gapón según bibliografía = 0.5 (Aguirre, 1993).

C^+ = concentración de sodio.

$Ca^{2+}+Mg^{2+}$ = Calcio más magnesio media de la parcela.

Δq^{2+} = Cationes divalentes adsorbidos.

PSI_i= Porcentaje de sodio intercambiable inicial.

PSI_r= Porcentaje de sodio intercambiable recuperado.

CIC= Capacidad de intercambio catiónico.

d_a = Densidad aparente.

Δc^{2+} = Incremento de concentración de cationes divalentes.

V= Volumen de agua necesario.

x= Profundidad a rehabilitar.

\square = Capacidad de campo.

Y= Necesidad de yeso necesaria.

a) Tratamiento 1 PSI 10:

$$\frac{PSI}{100 - PSI} = \frac{KG}{\sqrt{1000}} * \frac{C^+}{\sqrt{\frac{Ca^{+2} + Mg^{+2}}{2}}} = \frac{10\sqrt{1000}}{(100 - 10) * 0.5} = 49.38$$

$$g = \frac{2 * (C^+)^2}{\#} - (Ca^{+2} + Mg^{+2}) = \frac{2(293)^2}{49.38} - 37 = 3440 \text{ msq/L}$$

$$\Delta q^2 = (PSI_i - PSI_r)(CIC) \left(\frac{f_a}{100} \right) = (54 - 10)(32.7) \left(\frac{1.4}{100} \right) = \frac{20.14}{1000} = 0.020 \text{ sq/L}$$

$$\Delta c^2 k = \left(g + (Ca^{+2} + Mg^{+2}) \right) = (3440 + 37) = \frac{3477}{1000} = 3.48 \text{ sq/L}$$

$$V = x\theta\left(1 + \frac{\Delta q^2}{(\theta)(\Delta c^2 k)}\right) = (15 * 0.56)\left(1 + \frac{0.020}{(0.56)(3.48)}\right) = 8.49 \text{ cm}$$

$$y = Vr * \frac{g}{1000} = \left(8.49 * \frac{3440}{1000}\right) = 29.20 \text{ msq/cm}^2$$

$$29.20 \frac{\text{msq}}{\text{cm}^2} * \frac{86.08}{1 \text{ msq}} * \frac{1 \text{ kg}}{10^6} * \frac{100 \text{ cm}^2}{1 \text{ m}^2} * \frac{10000 \text{ m}^2}{1 \text{ ha}} = 251 \text{ ton/ha}$$

$$251000 \frac{\text{kg}}{\text{ha}} * \frac{1 \text{ ha}}{10000 \text{ m}^2} * \frac{1 \text{ m}^2}{.15 \text{ m}} * \frac{1 \text{ m}^2}{1400 \text{ g}} = .1195 * \frac{1000 \text{ g}}{\text{kg}} = 119.52 \frac{\text{g}}{\text{kg/suelo}}$$

b) Tratamiento 2 PSI 20:

$$\frac{PSI}{100 - PSI} = \frac{KG}{\sqrt{1000}} * \frac{C^+}{\sqrt{\frac{Ca^{+2} + Mg^{+2}}{2}}} = \frac{20\sqrt{1000}}{(100 - 20) * 0.5} = 250$$

$$g = \frac{2 * (C^+)^2}{\#} - (Ca^{+2} + Mg^{+2}) = \frac{2(293)^2}{250} - 37 = 649.8 \text{ msq/l}$$

$$\Delta q^2 = (PSH - PSIr)(CIC) \left(\frac{f_a}{100}\right) = (54 - 20)(32.7) \left(\frac{1.4}{100}\right) = \frac{15.56}{1000} = 0.016 \text{ sq/L}$$

$$\Delta c^2 k = \left(g + (Ca^{+2} + Mg^{+2})\right) = (649.8 + 37) = \frac{686.8}{1000} = 0.687 \text{ sq/L}$$

$$V = x\theta \left(1 + \frac{\Delta q^2}{(\theta)(\Delta c^2 k)}\right) = (15 * 0.56) \left(1 + \frac{0.016}{(0.56)(0.687)}\right) = 8.75 \text{ cm}$$

$$y = Vr * \frac{g}{1000} = \left(8.75 * \frac{649.8}{1000}\right) = 5.68 \text{ meq/cm}^2$$

$$5.68 \frac{\text{meq}}{\text{cm}^2} * \frac{86.08}{1 \text{ meq}} * \frac{1 \text{ kg}}{10^6} * \frac{100 \text{ cm}^2}{1 \text{ m}^2} * \frac{10000 \text{ m}^2}{1 \text{ ha}} = 49 \text{ ton/ha}$$

$$49000 \frac{\text{kg}}{\text{ha}} * \frac{1 \text{ ha}}{10000 \text{ m}^2} * \frac{1 \text{ m}^2}{.15 \text{ m}} * \frac{1000 \text{ g}}{1400 \text{ g}} = 0.0233 * \frac{1000 \text{ g}}{\text{kg}} = 23.33 \frac{\text{g}}{\text{kg/suslo}}$$

c) Tratamiento 3 PSI 30:

$$\frac{PSI}{100 - PSI} = \frac{KG}{\sqrt{1000}} * \frac{C^+}{\sqrt{\frac{Ca^{+2} + Mg^{+2}}{2}}} = \frac{30\sqrt{1000}}{(100 - 30) * 0.5} = 734.7$$

$$g = \frac{2 * (C^+)^2}{\#} - (Ca^{+2} + Mg^{+2}) = \frac{2(293)^2}{734.7} - 37 = 196.7 \text{ meq/l}$$

$$\Delta q^2 = (PSH - PSIr)(CIC) \left(\frac{f_a}{100}\right) = (54 - 30)(32.7) \left(\frac{1.4}{100}\right) = \frac{10.98}{1000} = 0.011 \text{ eq/L}$$

$$\Delta c^2 k = \left(g + (Ca^{+2} + Mg^{+2})\right) = (196.7 + 37) = \frac{233.7}{1000} = 0.23 \text{ eq/L}$$

$$V = x\theta \left(1 + \frac{\Delta q^2}{(\theta)(\Delta c^2 k)}\right) = (15 * 0.56) \left(1 + \frac{0.011}{(0.56)(0.23)}\right) = 9.11 \text{ cm}$$

$$y = Vr * \frac{g}{1000} = \left(9.11 * \frac{196.7}{1000}\right) = 1.8 \text{ msq/cm}^2$$

$$1.8 \frac{\text{msq}}{\text{cm}^2} * \frac{86.08}{1 \text{ msq}} * \frac{1 \text{ kg}}{10^6} * \frac{100 \text{ cm}^2}{1 \text{ m}^2} * \frac{10000 \text{ m}^2}{1 \text{ ha}} = 15 \text{ ton/ha}$$

$$15000 \frac{\text{kg}}{\text{ha}} * \frac{1 \text{ ha}}{10000 \text{ m}^2} * \frac{1 \text{ m}^2}{.15 \text{ m}} * \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} = 0.00714 * \frac{1000 \text{ g}}{\text{kg}} = 7.14 \frac{\text{g}}{\text{kg/suelo}}$$

d) Tratamiento 4 PSI 40:

$$\frac{PSI}{100 - PSI} = \frac{KG}{\sqrt{1000}} * \frac{C^+}{\sqrt{\frac{Ca^{+2} + Mg^{+2}}{2}}} = \frac{40\sqrt{1000}}{(100 - 40) * 0.5} = 1777.8$$

$$g = \frac{2 * (C^+)^2}{\#} - (Ca^{+2} + Mg^{+2}) = \frac{2(293)^2}{1777.8} - 37 = 59.6 \text{ msq/l}$$

$$\Delta q^2 = (PSH - PSIr)(CIC) \left(\frac{f_a}{100} \right) = (54 - 40)(32.7) \left(\frac{1.4}{100} \right) = \frac{6.40}{1000} = 0.0064 \text{ eq/L}$$

$$\Delta c^2 k = (g + (Ca^{+2} + Mg^{+2})) = (59.6 + 37) = \frac{96.6}{1000} = 0.096 \text{ eq/L}$$

$$V = x\theta \left(1 + \frac{\Delta q^2}{(\theta)(\Delta c^2 k)} \right) = (15 * 0.56) \left(1 + \frac{0.0064}{(0.56)(0.0966)} \right) = 9.4 \text{ cm}$$

$$y = Vr * \frac{g}{1000} = \left(9.4 * \frac{59.6}{1000} \right) = 0.56 \text{ msq/cm}^2$$

$$0.56 \frac{\text{msq}}{\text{cm}^2} * \frac{86.08}{1 \text{ msq}} * \frac{1 \text{ kg}}{10^6} * \frac{100 \text{ cm}^2}{1 \text{ m}^2} * \frac{10000 \text{ m}^2}{1 \text{ ha}} = 5 \text{ ton/ha}$$

$$5000 \frac{\text{kg}}{\text{ha}} * \frac{1 \text{ ha}}{10000 \text{ m}^2} * \frac{1 \text{ m}^2}{.15 \text{ m}} * \frac{1 \text{ m}^2}{1400 \text{ g}} = 0.00238 * \frac{1000 \text{ g}}{\text{kg}} = 2.38 \frac{\text{g}}{\text{kg/suelo}}$$

Anexo 3 Análisis estadístico de altura de planta

Test of Homogeneity of Variances			
Levene Statistic	df1	df2	Sig.
1.755	5	54	0.138

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	51.739	5	10.348	6.275	0.000
Within Groups	89.044	54	1.649		
Total	140.783	59			

Multiple Comparisons

	(I)	(J)	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
1	2	3	2.63000 [*]	0.57428	0.000	1.4786	3.7814
		4	2.56000 [*]	0.57428	0.000	1.4086	3.7114
		5	2.11000 [*]	0.57428	0.001	.9586	3.2614
		6	2.45000 [*]	0.57428	0.000	1.2986	3.6014
		6	2.51000 [*]	0.57428	0.000	1.3586	3.6614
2	1	3	-2.63000 [*]	0.57428	0.000	-3.7814	-1.4786
		4	-0.07000	0.57428	0.903	-1.2214	1.0814
		5	-0.52000	0.57428	0.369	-1.6714	0.6314
		6	-0.18000	0.57428	0.755	-1.3314	0.9714
		6	-0.12000	0.57428	0.835	-1.2714	1.0314
3	1	2	-2.56000 [*]	0.57428	0.000	-3.7114	-1.4086
		4	0.07000	0.57428	0.903	-1.0814	1.2214
		5	-0.45000	0.57428	0.437	-1.6014	0.7014
		6	-0.11000	0.57428	0.849	-1.2614	1.0414
		6	-0.05000	0.57428	0.931	-1.2014	1.1014
4	1	2	-2.11000 [*]	0.57428	0.001	-3.2614	-0.9586
		3	0.52000	0.57428	0.369	-0.6314	1.6714
		5	0.45000	0.57428	0.437	-0.7014	1.6014
		6	0.34000	0.57428	0.556	-0.8114	1.4914
		6	0.40000	0.57428	0.489	-0.7514	1.5514
5	1	2	-2.45000 [*]	0.57428	0.000	-3.6014	-1.2986
		3	0.18000	0.57428	0.755	-0.9714	1.3314
		4	0.11000	0.57428	0.849	-1.0414	1.2614
		6	-0.34000	0.57428	0.556	-1.4914	0.8114
		6	0.06000	0.57428	0.917	-1.0914	1.2114
6	1	-2.51000 [*]	0.57428	0.000	-3.6614	-1.3586	

2	0.12000	0.57428	0.835	-1.0314	1.2714
3	0.05000	0.57428	0.931	-1.1014	1.2014
4	-0.40000	0.57428	0.489	-1.5514	0.7514
5	-0.06000	0.57428	0.917	-1.2114	1.0914

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

Anexo 4 Altura de planta (cm) y estadísticos univariantes relacionados para individuos de maíz (*Zea mays* var. *Puma 1076*)

tratamiento	Día	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Test. 0	Promedio	0.52	1.31	2.23	3.02	3.4	4.47	5.25	5.97	6.74	7.36	9.35	10.19	11.69	12.06	14.26
	Desvest	0.20	0.35	0.64	0.76	1.07	0.86	0.94	0.85	0.87	2.39	1.01	1.00	3.00	1.55	1.33
	% D.E.R	39.22	26.55	28.91	25.06	31.34	19.25	17.87	14.24	12.92	32.43	10.80	9.84	25.64	12.82	9.31
Test.	Promedio	0.39	1.2	2.04	2.59	3.06	3.9	4.39	5.08	5.65	6.79	7.97	8.94	9.67	10.31	11.63
	Desvest	0.15	0.24	0.36	0.47	0.54	0.77	0.63	0.76	1.01	0.93	1.00	0.98	0.94	0.68	0.75
	% D.E.R	39.07	20.41	17.48	18.06	17.51	19.86	14.26	14.87	17.88	13.70	12.55	10.95	9.71	6.59	6.44
T 1	Promedio	0.35	1.17	2.10	2.83	3.41	4.06	4.66	5.23	5.74	6.75	7.96	8.78	9.44	10.27	11.70
	Desvest	0.12	0.19	0.47	0.52	0.72	0.76	0.89	0.92	0.86	1.19	1.33	1.54	1.65	1.26	1.06
	% D.E.R	33.67	16.14	22.45	18.48	21.17	18.73	19.12	17.53	14.95	17.60	16.72	17.53	17.49	12.22	9.04
T 2	Promedio	0.39	1.21	2.12	3.11	3.69	4.22	4.82	5.54	6.20	7.26	8.46	9.53	10.09	10.49	12.15
	Desvest	0.26	0.40	0.73	0.70	0.65	0.58	0.73	0.80	0.97	1.23	1.29	1.26	1.47	1.47	1.73
	% D.E.R	65.60	33.39	34.43	22.51	17.68	13.81	15.18	14.47	15.64	16.91	15.26	13.25	14.60	14.01	14.21
T 3	Promedio	0.20	1.01	1.64	2.33	2.99	3.99	4.88	5.69	6.67	7.74	8.69	9.37	10.09	10.62	11.81
	Desvest	0.11	0.19	0.50	0.42	0.69	0.74	0.93	0.97	1.17	1.24	1.26	1.14	1.23	1.24	1.31
	% D.E.R	52.70	18.93	30.58	18.21	23.09	18.55	19.10	16.97	17.54	16.05	14.49	12.21	12.15	11.68	11.07
T 4	Promedio	0.35	1.20	1.96	2.76	3.64	4.23	4.98	5.89	6.88	7.75	8.61	9.42	10.01	10.51	11.75
	Desvest	0.18	0.31	0.21	0.41	0.40	0.55	0.84	0.87	0.95	0.96	0.90	1.03	1.19	1.40	1.33
	% D.E.R	50.84	26.06	10.54	14.81	11.08	12.95	16.93	14.72	13.80	12.44	10.42	10.89	11.85	13.33	11.30

Desvest= Desviación estándar

%D.E.R= Desviación estándar relativa

Anexo 5 Análisis estadístico de Grosor de tallo

Test of Homogeneity of Variances

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
1.077	5	54	0.384

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	0.065	5	0.013	4.055	0.003
Within Groups	0.174	54	0.003		
Total	0.239	59			

Multiple Comparisons

(I)	(J)	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
Tratamiento	Tratamiento				Lower Bound	Upper Bound
1	2	0.09000 [*]	0.02539	0.001	0.0391	0.1409
	3	0.04000	0.02539	0.121	-0.0109	0.0909
	4	0.08000 [*]	0.02539	0.003	0.0291	0.1309
	5	0.08000 [*]	0.02539	0.003	0.0291	0.1309
	6	0.09000 [*]	0.02539	0.001	0.0391	0.1409
2	1	-0.09000 [*]	0.02539	0.001	-0.1409	-0.0391
	3	-0.05000	0.02539	0.054	-0.1009	0.0009
	4	-0.01000	0.02539	0.695	-0.0609	0.0409
	5	-0.01000	0.02539	0.695	-0.0609	0.0409
	6	0.00000	0.02539	1.000	-0.0509	0.0509
3	1	-0.04000	0.02539	0.121	-0.0909	0.0109
	2	0.05000	0.02539	0.054	-0.0009	0.1009
	4	0.04000	0.02539	0.121	-0.0109	0.0909
	5	0.04000	0.02539	0.121	-0.0109	0.0909
	6	0.05000	0.02539	0.054	-0.0009	0.1009
4	1	-0.08000 [*]	0.02539	0.003	-0.1309	-0.0291
	2	.01000	0.02539	0.695	-0.0409	0.0609
	3	-0.04000	0.02539	0.121	-0.0909	0.0109
	5	0.00000	0.02539	1.000	-0.0509	0.0509
	6	0.01000	0.02539	0.695	-0.0409	0.0609
5	1	-0.08000 [*]	0.02539	0.003	-0.1309	-0.0291
	2	0.01000	0.02539	0.695	-0.0409	0.0609
	3	-0.04000	0.02539	0.121	-0.0909	0.0109

	4	0.00000	0.02539	1.000	-0.0509	0.0509
	6	0.01000	0.02539	0.695	-0.0409	0.0609
6	1	-0.09000*	0.02539	0.001	-0.1409	-0.0391
	2	0.00000	0.02539	1.000	-0.0509	0.0509
	3	-0.05000	0.02539	0.054	-0.1009	0.0009
	4	-0.01000	0.02539	0.695	-0.0609	0.0409
	5	-0.01000	0.02539	0.695	-0.0609	0.0409

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

Anexo 6 Grosor de tallo (mm) y estadísticos univariantes relacionados para individuos de maíz (*Zea mays* var. *Puma 1076*)

tratamiento	dia	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Test. 0	Promedio	0.10	0.10	0.16	0.19	0.22	0.24	0.26	0.27	0.30	0.32	0.35	0.37	0.40	0.40	0.40
	Desvest	0.00	0.00	0.05	0.03	0.04	0.05	0.05	0.05	0.00	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	% D.E.R	0.00	0.00	32.27	16.64	19.17	21.52	19.86	17.89	0.00	13.18	15.06	13.06	11.79	11.79	11.79
Test.	Promedio	0.10	0.12	0.13	0.18	0.19	0.19	0.19	0.21	0.22	0.26	0.29	0.30	0.31	0.31	0.31
	Desvest	0.00	0.04	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.06	0.05	0.06	0.06	0.06
	% D.E.R	0.00	35.14	37.16	23.42	16.64	16.64	16.64	15.06	19.17	19.86	19.57	15.71	18.31	18.31	18.31
T 1	Promedio	0.10	0.10	0.11	0.13	0.20	0.21	0.22	0.22	0.25	0.28	0.29	0.29	0.31	0.36	0.36
	Desvest	0.00	0.00	0.03	0.05	0.05	0.03	0.04	0.04	0.05	0.04	0.03	0.03	0.06	0.07	0.07
	% D.E.R	0.00	0.00	28.75	37.16	23.57	15.06	19.17	19.17	21.08	15.06	10.90	10.90	18.31	19.42	19.42
T 2	Promedio	0.10	0.10	0.13	0.17	0.20	0.20	0.21	0.22	0.24	0.27	0.29	0.31	0.33	0.33	0.32
	Desvest	0.00	0.00	0.05	0.05	0.00	0.00	0.03	0.04	0.05	0.05	0.03	0.03	0.05	0.05	0.04
	% D.E.R	0.00	0.00	37.16	28.41	0.00	0.00	15.06	19.17	21.52	17.89	10.90	10.20	14.64	14.64	13.18
T 3	Promedio	0.10	0.10	0.11	0.12	0.14	0.19	0.21	0.22	0.24	0.24	0.24	0.24	0.27	0.30	0.32
	Desvest	0.00	0.00	0.03	0.04	0.05	0.03	0.03	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06
	% D.E.R	0.00	0.00	28.75	35.14	36.89	16.64	15.06	19.17	21.52	21.52	21.52	21.52	17.89	15.71	19.76
T 4	Promedio	0.10	0.10	0.11	0.13	0.19	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.22	0.26	0.29	0.29	0.31
	Desvest	0.00	0.00	0.03	0.05	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.05	0.03	0.03	0.06
	% D.E.R	0.00	0.00	28.75	37.16	16.64	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	19.17	19.86	10.90	10.90	18.31

Desvest= Desviación estándar

%D.E.R= Desviación estándar relativa

Anexo 7 Análisis estadístico de clorofila

Test of Homogeneity of Variances

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
0.302	5	54	0.909

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	476.374	5	95.275	4.284	0.002
Within Groups	1200.962	54	22.240		
Total	1677.336	59			

Multiple Comparisons

(I) Tratamiento	(J) Tratamiento	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	-5.42000 [*]	2.10903	0.013	-9.6484	-1.1916
	3	-1.80000	2.10903	0.397	-6.0284	2.4284
	4	-1.12000	2.10903	0.598	-5.3484	3.1084
	5	3.26000	2.10903	0.128	-0.9684	7.4884
	6	2.14000	2.10903	0.315	-2.0884	6.3684
2	1	5.42000 [*]	2.10903	0.013	1.1916	9.6484
	3	3.62000	2.10903	0.092	-0.6084	7.8484
	4	4.30000 [*]	2.10903	0.046	0.0716	8.5284
	5	8.68000 [*]	2.10903	0.000	4.4516	12.9084
	6	7.56000 [*]	2.10903	0.001	3.3316	11.7884
3	1	1.80000	2.10903	0.397	-2.4284	6.0284
	2	-3.62000	2.10903	0.092	-7.8484	0.6084
	4	.68000	2.10903	0.748	-3.5484	4.9084
	5	5.06000 [*]	2.10903	0.020	0.8316	9.2884
	6	3.94000	2.10903	0.067	-0.2884	8.1684
4	1	1.12000	2.10903	0.598	-3.1084	5.3484
	2	-4.30000 [*]	2.10903	0.046	-8.5284	-0.0716
	3	-.68000	2.10903	0.748	-4.9084	3.5484
	5	4.38000 [*]	2.10903	0.043	0.1516	8.6084
	6	3.26000	2.10903	0.128	-0.9684	7.4884
5	1	-3.26000	2.10903	0.128	-7.4884	0.9684
	2	-8.68000 [*]	2.10903	0.000	-12.9084	-4.4516
	3	-5.06000 [*]	2.10903	0.020	-9.2884	-0.8316
	4	-4.38000 [*]	2.10903	0.043	-8.6084	-0.1516

	6	-1.12000	2.10903	0.598	-5.3484	3.1084
6	1	-2.14000	2.10903	0.315	-6.3684	2.0884
	2	-7.56000 [*]	2.10903	0.001	-11.7884	-3.3316
	3	-3.94000	2.10903	0.067	-8.1684	0.2884
	4	-3.26000	2.10903	0.128	-7.4884	0.9684
	5	1.12000	2.10903	0.598	-3.1084	5.3484

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

Anexo 8 Análisis estadístico de Longitud de raíz.

Test of Homogeneity of Variances

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
1.342	5	54	0.261

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	0.475	5	0.095	1.109	0.366
Within Groups	4.628	54	0.086		
Total	5.103	59			

Multiple Comparisons

(I) Tratamiento	(J) Tratamiento	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	0.11000	0.13092	0.405	-0.1525	0.3725
	3	0.14000	0.13092	0.290	-0.1225	0.4025
	4	0.10000	0.13092	0.448	-0.1625	0.3625
	5	0.30000 [*]	0.13092	0.026	0.0375	0.5625
	6	0.11000	0.13092	0.405	-0.1525	0.3725
2	1	-0.11000	0.13092	0.405	-0.3725	0.1525
	3	0.03000	0.13092	0.820	-0.2325	0.2925
	4	-0.01000	0.13092	0.939	-0.2725	0.2525

	5	0.19000	0.13092	0.152	-0.0725	0.4525
	6	0.00000	0.13092	1.000	-0.2625	0.2625
3	1	-0.14000	0.13092	0.290	-0.4025	0.1225
	2	-0.03000	0.13092	0.820	-0.2925	0.2325
	4	-0.04000	0.13092	0.761	-0.3025	0.2225
	5	0.16000	0.13092	0.227	-0.1025	0.4225
	6	-0.03000	0.13092	0.820	-0.2925	0.2325
4	1	-0.10000	0.13092	0.448	-0.3625	0.1625
	2	0.01000	0.13092	0.939	-0.2525	0.2725
	3	0.04000	0.13092	0.761	-0.2225	0.3025
	5	0.20000	0.13092	0.132	-0.0625	0.4625
	6	0.01000	0.13092	0.939	-0.2525	0.2725
5	1	-0.30000	0.13092	0.026	-0.5625	-0.0375
	2	-0.19000	0.13092	0.152	-0.4525	0.0725
	3	-0.16000	0.13092	0.227	-0.4225	0.1025
	4	-0.20000	0.13092	0.132	-0.4625	0.0625
	6	-0.19000	0.13092	0.152	-0.4525	0.0725
6	1	-0.11000	0.13092	0.405	-0.3725	0.1525
	2	0.00000	0.13092	1.000	-0.2625	0.2625
	3	0.03000	0.13092	0.820	-0.2325	0.2925
	4	-0.01000	0.13092	0.939	-0.2725	0.2525
	5	0.19000	0.13092	0.152	-0.0725	0.4525

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

Anexo 9 Análisis estadístico de Masa seca

Test of Homogeneity of Variances

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
0.163	5	54	0.975

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	0.012	5	0.002	1.458	0.219
Within Groups	0.087	54	0.002		
Total	0.098	59			

Multiple Comparisons

(I) Tratamiento	(J) Tratamiento	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	0.00031	0.01790	0.986	-0.0356	0.0362
	3	0.00114	0.01790	0.949	-0.0348	0.0370
	4	-0.03558	0.01790	0.052	-0.0715	0.0003
	5	0.00519	0.01790	0.773	-0.0307	0.0411
	6	0.00130	0.01790	0.942	-0.0346	0.0372
2	1	-0.00031	0.01790	0.986	-0.0362	0.0356
	3	0.00083	0.01790	0.963	-0.0351	0.0367
	4	-0.03589	0.01790	0.050	-0.0718	0.0000
	5	0.00488	0.01790	0.786	-0.0310	0.0408
	6	0.00099	0.01790	0.956	-0.0349	0.0369
3	1	-0.00114	0.01790	0.949	-0.0370	0.0348
	2	-0.00083	0.01790	0.963	-0.0367	0.0351
	4	-0.03672	0.01790	0.045	-0.0726	-0.0008
	5	0.00405	0.01790	0.822	-0.0318	0.0399
	6	0.00016	0.01790	0.993	-0.0357	0.0361
4	1	0.03558	0.01790	0.052	-0.0003	0.0715

	2	0.03589	0.01790	0.050	0.0000	0.0718
	3	0.03672 [*]	0.01790	0.045	0.0008	0.0726
	5	0.04077 [*]	0.01790	0.027	0.0049	0.0767
	6	0.03688 [*]	0.01790	0.044	0.0010	0.0728
5	1	-0.00519	0.01790	0.773	-0.0411	0.0307
	2	-0.00488	0.01790	0.786	-0.0408	0.0310
	3	-0.00405	0.01790	0.822	-0.0399	0.0318
	4	-0.04077 [*]	0.01790	0.027	-0.0767	-0.0049
	6	-0.00389	0.01790	0.829	-0.0398	0.0320
6	1	-0.00130	0.01790	0.942	-0.0372	0.0346
	2	-0.00099	0.01790	0.956	-0.0369	0.0349
	3	-0.00016	0.01790	0.993	-0.0361	0.0357
	4	-0.03688 [*]	0.01790	0.044	-0.0728	-0.0010
	5	0.00389	0.01790	0.829	-0.0320	0.0398

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

Anexo 10 Análisis estadístico de masa fresca

Test of Homogeneity of Variances

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
0.657	5	54	0.658

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	2.026	5	0.405	2.762	0.027
Within Groups	7.919	54	0.147		
Total	9.945	59			

Multiple Comparisons

(I) Tratamiento	(J) Tratamiento	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	-0.04440	0.17126	0.796	-0.3878	0.2990
	3	0.02754	0.17126	0.873	-0.3158	0.3709
	4	-0.48097*	0.17126	0.007	-0.8243	-0.1376
	5	-0.17469	0.17126	0.312	-0.5180	0.1687
	6	-0.31921	0.17126	0.068	-0.6626	0.0241
2	1	0.04440	0.17126	0.796	-0.2990	0.3878
	3	0.07194	0.17126	0.676	-0.2714	0.4153
	4	-0.43657*	0.17126	0.014	-0.7799	-0.0932
	5	-0.13029	0.17126	0.450	-0.4736	0.2131
	6	-0.27481	0.17126	0.114	-0.6182	0.0685
3	1	-0.02754	0.17126	0.873	-0.3709	0.3158
	2	-0.07194	0.17126	0.676	-0.4153	0.2714
	4	-0.50851*	0.17126	0.004	-0.8519	-0.1652
	5	-0.20223	0.17126	0.243	-0.5456	0.1411
	6	-.34675*	0.17126	0.048	-0.6901	-0.0034
4	1	0.48097*	0.17126	0.007	0.1376	0.8243
	2	0.43657*	0.17126	0.014	0.0932	0.7799
	3	0.50851*	0.17126	0.004	0.1652	0.8519
	5	0.30628	0.17126	0.079	-0.0371	0.6496
	6	0.16176	0.17126	0.349	-0.1816	0.5051
5	1	0.17469	0.17126	0.312	-0.1687	0.5180
	2	0.13029	0.17126	0.450	-0.2131	0.4736
	3	0.20223	0.17126	0.243	-0.1411	0.5456
	4	-0.30628	0.17126	0.079	-0.6496	0.0371
	6	-0.14452	0.17126	0.402	-0.4879	0.1988
6	1	0.31921	0.17126	0.068	-0.0241	0.6626
	2	0.27481	0.17126	0.114	-0.0685	0.6182
	3	0.34675*	0.17126	0.048	0.0034	0.6901
	4	-0.16176	0.17126	0.349	-0.5051	0.1816
	5	0.14452	0.17126	0.402	-0.1988	0.4879

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

Anexo 11. Niveles de depresión del rendimiento por causa de la salinidad o sodicidad del suelo. (Driessen,1986)

Cultivo	Depresión (%) de conductividad eléctrica (ms cm^{-1})					Depresión por PSI
	0%	10%	25%	50%	100%	50%
Maíz	1.7	2.5	3.8	5.9	10	<15
Arroz	3.0	3.8	5.1	7.2	11.5	15-25
Sorgo	4.0	5.1	7.2	11.0	18.0	15-25
Trigo	6.0	7.4	9.5	13.0	20	15-25
Cebolla	1.2	1.8	2.8	4.3	7.5	>35
Caña azúcar	2	3	5	8.5	12	15-25
Frijol	1.0	1.5	2.3	3.6	6.5	<15