



20069
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

ESTUDIO DE LA OXIDACION DE AZUFRE INORGANICO
Y AZUFRE MICROBIOLOGICO COMERCIAL EN SUELOS
BASICOS DE LA CUENCA DE MEXICO



EXAMENES PROFESIONALES
FAC. DE QUIMICA

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
QUIMICO FARMACEUTICO BIOLOGO
P R E S E N T A:
María Concepción José Nuñez

MEXICO, D. F.

1987



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 está 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.

I N D I C E

Capítulo	Página
I. INTRODUCCION	1
II. ANTECEDENTES	
II.1 Composición de un suelo	4
II.2 Mecanismos de adsorción y reacciones de intercambio	12
II.3 Concepto de pH de un suelo	22
II.4 Salinidad y basicidad de los suelos	27
II.4.1 Definición y características de suelos salinos	27
II.4.2 Definición y características de los suelos sódicos, sódicos-salinos y cálcicos	29
II.4.3 Efectos de suelos salinos, sódicos y cálcicos sobre los cultivos agrícolas	34
II.5 Recuperación de suelos sódicos y salinos	37
II.5.1 Métodos físicos	38
II.5.2 Métodos hidrotécnicos	38
II.5.3 Métodos biológicos	38
II.5.4 Métodos eléctricos	39
II.5.5 Métodos químicos	39
II.5.6 Métodos microbiológicos	43
II.5.7 Estudios realizados para la recuperación de suelos sódicos, mediante la adición de azufre y <i>Thiobacillus</i> .	47

Capítulo	Página
III. ETAPA EXPERIMENTAL	
III.1 Diseño del experimento	59
III.2 Procedimiento y control de variables	66
III.2.1 Toma de muestra	66
III.2.2 Control de variables macetas sin dren	66
III.2.3 Control de variables macetas con dren	71
IV. RESULTADOS Y CONCLUSIONES	
IV.1 Análisis de los resultados	72
IV.2 Conclusiones y recomendaciones	78
IV.3 Cuadros y figuras de los resultados analíticos	80
V. BIBLIOGRAFIA	112
APENDICE.- Principios y descripción de las técnicas analíticas utilizadas.	116

C A P I T U L O I

INTRODUCCION

En México existen grandes áreas con problemas de ensalitramiento, más del 50% del territorio nacional presenta este problema. Las zonas áridas y semiáridas ocupan el 75% del área total del país, y la mayoría de los distritos de riego se ubican en tales zonas, estimándose que de un 30 a 40% de las áreas bajo riego presentan este problema en varios grados (Tonchéz. J.P. 1981., p. 11-12).

La recuperación de suelos con este tipo de problemas se realiza mediante la combinación de métodos físicos, hidrotécnicos, biológicos, eléctricos y químicos.

En la rehabilitación de suelos sódicos, o sódicos salinos y

en algunos casos, calcáreos, es necesario el uso de sustancias químicas que se conocen como mejoradores. Los productos más comunmente utilizados, por su bajo costo, son el yeso y el azufre elemental (Richards, 1973, p. 54).

La eficiencia del yeso depende de su solubilidad en el suelo, y la del azufre, de la velocidad de oxidación del mismo a sulfatos. El proceso de oxidación es realizado por microorganismos específicos, que viven en el suelo bajo ciertas condiciones.

Recientemente han empezado a aparecer en el mercado de productos agrícolas, mejoradores de suelos básicos, que contienen azufre y los microorganismos específicos que lo oxidan. Los fabricantes aseguran que este tipo de producto tiene un mayor y más rápido efecto, que el azufre inorgánico, y además recomiendan dosis menores, que a las requeridas cuando se utiliza este último mejorador.

Por la importancia que en la productividad agrícola nacional, tiene el uso de un producto comercial con tales características, las cuales no son fáciles de explicar, ya que el ambiente en este tipo de suelos y las reacciones que ocurren, no favorecen el desarrollo de los microorganismos; resulta de especial interés evaluar su efectividad. Para lo cual, se realizó un experimento de invernadero con suelos

básicos de la Cuenca de México, y se efectuaron las mediciones analíticas necesarias para comparar la velocidad de oxidación del azufre (inorgánico), con el que contiene microorganismos (microbiológico).

C A P I T U L O I I

ANTECEDENTES

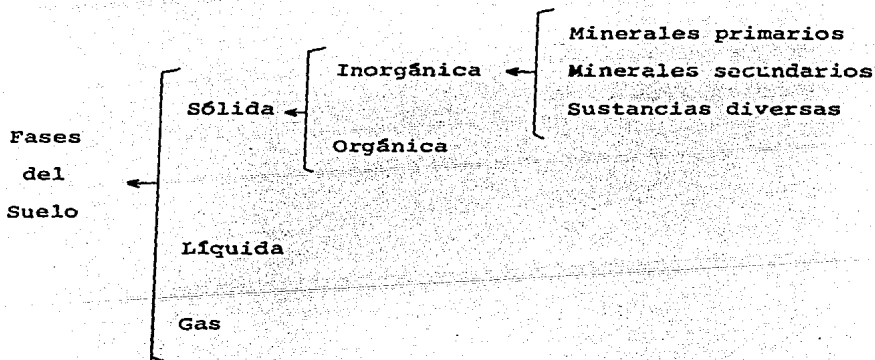
II.1 COMPOSICION DE UN SUELO

El suelo generalmente se refiere a la capa superficial de la tierra, que es útil para el crecimiento de las plantas terrestres (Sornemisza, E. 1982, p.3). Desde un punto de vista químico, está constituido por una gran variedad de componentes, tanto de origen inorgánico como orgánico, que pueden encontrarse en estado sólido, líquido o gaseoso (Bolt, G. 1978, p. 1).

La característica común a todos los suelos es que presentan actividad química, y que están en un continuo proceso dinámico, donde simultáneamente ocurren muchas reacciones, las

cuales solubilizan elementos que son el alimento de las plantas terrestres (Lindsay, en Morvedt, J. 1953, p. 41).

La composición de un suelo es muy variable, depende del material que lo originó (material parental) y de las condiciones bajo las cuales se formó (fenómenos de meteorización, relacionados al clima, relieve, biósfera, etc); sin embargo, en una forma general, se puede clasificar con base en los componentes principales de las diferentes fases (sólida, líquida y gas).



- Componentes de la fase sólida, tipo inorgánico.

Dentro de este tipo se encuentran los minerales primarios, derivados de las rocas ígneas y metamórficas (material

parental); minerales secundarios, como las arcillas; y finalmente sustancias diversas, principalmente óxidos y sales (Bear, F. 1965, p. 3). Estos materiales se clasifican con un criterio físico, con base en su tamaño y químicamente por su composición o su reactividad, la cual se refiere básicamente a su solubilidad y superficie específica.

Los minerales primarios están constituidos por materiales de baja superficie específica y solubilidad mínima. Presentan diámetros mayores de $2\mu\text{m}$, por lo que se encuentran en general en las fracciones más gruesas, es decir en la arena y el limo. El porcentaje de estos materiales en un suelo es variable y suele ser elevado en las zonas de formación reciente. Su importancia radica en que son determinantes para la textura del suelo, ya que controlan su permeabilidad, y por que a través de fenómenos de intemperismo (meteorización), dan origen a sustancias con mayor reactividad, que participen directamente en las reacciones que disponibilizan los nutrientes de las plantas.

Los minerales secundarios comprenden a las sustancias inorgánicas más activas, que son aquellas que presentan una alta superficie específica ($S = 1 \text{ m}^2/\text{g}$). Desde el punto de vista físico se considera que están constituidas por partículas menores a $2\mu\text{m}$, y se les conoce como arcillas.

Las arcillas, son aluminosilicatos que presentan una carga eléctrica, debida a cualquiera de los siguientes fenómenos: sustituciones isomórficas de silicio por aluminio, o de estos por cationes de menor valencia; a rompimientos de enlaces superficiales; y a desplazamiento de iones estructurales.

La neutralidad se logra por la presencia de cargas en el exterior de la partícula, lo que se conoce como procesos de adsorción que por su importancia, se explicarán posteriormente.

Las sustancias inorgánicas diversas, están constituidas principalmente por óxidos e hidróxidos, carbonatos, fosfatos, sulfatos, nitratos, haluros y en ocasiones por sulfuros. Aunque resulta arbitrario, se clasifican con base en su solubilidad*. Los cloruros, sulfatos y nitratos, por ser muy solubles, preferentemente se encuentran en la fase líquida y pueden causar serios problemas al aumentar la presión osmótica (ver sección 2.4.3). El resto de las sustancias, que incluye a óxidos, hidróxidos, carbonatos, etc. se encuentran preferentemente en formas insolubles,

* La solubilidad depende de las condiciones del suelo, y puede variar en función del pH, temperatura, condiciones redox y formación de quelatos. Por lo tanto los valores de las constantes de solubilidad deben ser utilizadas tomando en cuenta, la situación real del suelo.

y únicamente participan como fuente de sus elementos que los componen para la solución del suelo, en las proporciones que fije la constante de solubilidad.

- Componentes de la fase sólida, tipo orgánico

La materia orgánica del suelo, esta constituida por residuos vegetales y animales en diferentes estados de descomposición, tejidos y células de organismos que viven en el suelo, y sus sustancias producidas por éstos. Con base en su peso y complejidad, puede clasificarse en dos grupos: en el primero, se incluyen sustancias bioquímicas comunes que están presentes en los organismos vivos, como son ácidos, fenoles, aminoácidos, péptidos, proteínas, etc; y en el segundo grupo, se incluyen a polímeros complejos que no tienen semejanza con los productos presentes en los organismos, y que se les conoce como ácidos húmicos y fúlvicos (Humus). Estos a su vez, dentro de sus macromoléculas, contienen grupos funcionales simples pertenecientes a la primera clasificación (Stevenson y Ardakani en Morvet, J. 1983, p. 88).

El humus se puede describir como un material amorfo que constituye la parte más estable de la materia orgánica (Bornemisza, E. 1981, p. 21) aunque sufre constantes cambios, de acuerdo a las condiciones del suelo, por lo que no es posible caracterizarlo. Entre los grupos funcionales simples que

contiene, están los ácidos (-COOH), alcoholes (-OH), aldehidos (-CHO), etc. los cuales presentan hidrógenos ionizables, esto es, que pueden reaccionar.

Estos grupos principalmente pueden funcionar como ligantes y formar con los elementos transicionales presentes en el suelo quelatos, o sea compuestos de coordinación en que la macromolécula se une en varias posiciones a un metal; o pueden enlazarse a las arcillas, formando sustancias de alto peso molecular; o pueden presentar reacciones de intercambio, al ser los protones sustituidos por cationes alcalinos y alcalino-térreos. (Ortiz, L. 1986, p. 58).

El humus influye en las características físicas del suelo y regula importantes procesos químicos, a continuación se nombran algunas de sus propiedades más relevantes:

- Suministra elementos nutritivos, en particular libera nitrógeno, fósforo, azufre y micronutrientes (Cu, Zn, Mn, Fe, Mo y Co).
- Estabiliza la acidez del suelo, ya que presenta una gran capacidad amortiguadora.
- Contribuye a la capacidad de intercambio iónico de los suelos.

- Mejora la estructura del suelo, ya que favorece la formación de agregados individuales y reduce la plasticidad.
- Permite la utilización más eficiente del agua, sobre todo en suelos de textura gruesa, ya que regula la infiltración de agua, y reduce la pérdida por evaporación.

Fase líquida

La fase líquida, conocida como solución del suelo, es una dilución de sales, procedentes de iones comunes y muy solubles, como es el caso del sodio, potasio, magnesio, cobre, cloruros, nitratos, sulfatos, etc. Esta fase contiene también, pequeñas cantidades de otros iones, procedentes de sales poco solubles que se encuentran en mayor proporción en la fase sólida, y compuestos solubles de origen orgánico, como quelatos.

Fase gaseosa

La fase gaseosa es de composición parecida a la atmosférica p. ejem puede contener 78% de nitrógeno, 21% de oxígeno, y 1% de gases raros. Sin embargo el consumo de O_2 y la

Producción de CO_2 por los organismos presentes en el suelo, puede variar la composición (Bolt, G. 1978, p. 10-11).

El movimiento de los gases está gobernado por procesos de difusión, y en casos de suelos que están bajo condiciones reductoras, p. ejem suelos inundados, se producen gases metaestables como el H_2S , CH_4 o NH_3 .

II.2 MECANISMO DE ADSORCION Y REACCIONES DE INTERCAMBIO

En los párrafos anteriores, las diferentes fases del suelo se clasificaron y describieron en forma independiente. En realidad estas se hayan en una continua interacción, especialmente ocurren importantes reacciones entre la superficie de los sólidos y la fase acuosa contigua.

El agua es una sustancia muy polar que tiende a debilitar los enlaces de los sólidos, especialmente los de tipo iónico, reacciona con los grupos superficiales, y permite que se desarrolle una superficie activa en el sólido. Adicionalmente también se altera la capa de líquido, adyacente al sólido, la cual presenta un comportamiento diferente a la de la solución libre del suelo.

El tipo de cargas presentes en los sólidos son diferentes, dependiendo de la naturaleza de los enlaces. Las arcillas, que como ya se explicó adquieren carga a través de sustituciones isomórficas, forman enlaces con los cationes de la solución de carácter coulombico y omnidireccionales (no-selectivos). Los óxidos iónicos, en que el oxígeno está unido a un metal, presentan en la superficie deficiencias en el número de enlaces del oxígeno, por lo que éste se une a hidrógenos y forma OH terminales; dependiendo del pH de la solución del suelo, los oxhidrilos pueden unirse a protones y formar

grupos sólidos con carga positiva, o alternativamente perder su protón y formar partículas negativas. Cuando el OH terminal no presenta desbalance en la carga, se le llama punto de carga cero, y es diferente para cada óxido. Los enlaces se forman donde se encuentran los oxhidrilos, y por lo tanto a éste tipo de superficie se le llama selectiva.

Hay que hacer notar que las arcillas pueden presentar también cargas que dependen del pH, es decir posiciones de enlace selectivas, pues los enlaces Si-OH se comportan de forma parecida a los óxidos metálicos. En el intervalo normal de pH de un suelo, la arcilla pierde protones y adquiere carga negativa, mientras que los óxidos de metales forman grupos $M-OH_2^+$ con carga positiva.

El otro tipo de sólido presente en la interfase sólido-líquido, son los polímeros de origen orgánico, que presentan grupos R-OH, en los cuales R, simboliza la cadena, y que son ácidos débiles. El grado de disociación de los diferentes grupos depende del pH de la solución y del contenido salino de la solución. La superficie de la materia orgánica es negativa, con posiciones selectivas de enlace y dependiente del pH.

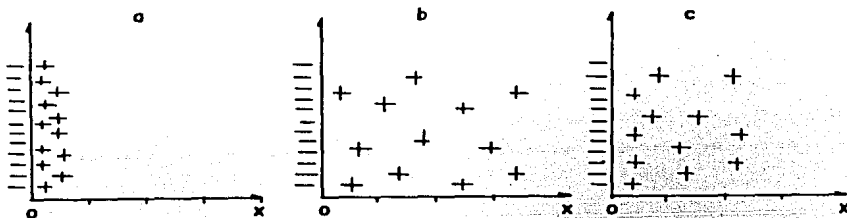
Como muestra la figura II.1, alrededor de la partícula cargada de suelo, los iones de la solución están sujetos a dos

tendencias opuestas, una que es la atracción coulombica hacia la superficie (adsorción H =mínima) y otra es la tendencia a difundirse libremente en la solución (máxima entropía). La distribución resultante corresponde a un valor de mínima energía libre y cumple con la ecuación de Boltzmann. Se le conoce como la doble capa difusa (figura II.2), e imaginarse un panal de abejas, puede resultar una analogía física muy útil. El panal es la partícula sólida y las abejas los contraiones.

Considerando a la doble capa finita, existe una región en la fase líquida que no es influenciada por la carga de la superficie sólida y se le llama solución libre. La extensión de la capa depende principalmente de la densidad de carga del sólido, de la concentración salina de la solución y del tipo de ión presente (relación entre la carga y el radio hidratado), por ejemplo la capa formada por los iones calcio es mucho menor que la de los iones sodio.

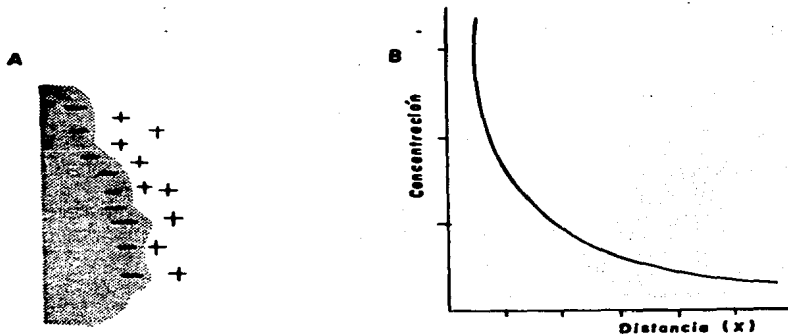
Cuando el contenido de agua del sistema del suelo es muy bajo, la doble capa se trunca y se desarrolla una presión, que es la responsable de la tendencia a absorber líquido, cuando el suelo seco se pone en contacto con agua. Esta presión de hinchamiento corresponde a un decremento del potencial de la solución del suelo que inhibe la absorción de agua por las plantas. Otros fenómenos relacionados con el

FIGURA:II.1 DISTRIBUCION DE CONTRAIONES



- a: condición de mínima energía
- b: condición de máxima entropía
- c: condición de mínima energía libre

Figura II.2 A. Distribución de contraiones alrededor de una partícula de suelo cargada negativamente, formando una capa doble difusa. B. Concentración de cationes en la misma



ensanchamiento de la doble capa se discutirán en la sec. (II.4.2).

Generalmente la mayor parte del complejo de adsorción presenta cargas negativas, por lo tanto se retienen mayor proporción de cationes que de aniones. La magnitud de esta propiedad es llamada capacidad de intercambio catiónico, y es diferente para cada clase de suelo, pues la retención de iones como ya se comentó en párrafos anteriores, depende de varias propiedades asociadas a los diferentes materiales que componen el complejo de adsorción.

Los cationes que comunmente se encuentran en posiciones de intercambio, son el Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ y K^+ . A pH muy bajos, pueden estar presentes H^+ y Al^{3+} . El orden de sustitución de los cationes más comunes es la siguiente:



Los cationes bivalentes ocupan más fácilmente que los monovalentes las posiciones de intercambio. El más abundante en la mayoría de los suelos es el calcio, no hay mucha información sobre los iones trivalentes, el aluminio y hierro, que son los cationes de este tipo más comunes, no participan en los procesos de intercambio, pues en el intervalo de pH

de 4.5 a 8, que es el más frecuente en los suelos, forman hidróxidos y óxidos prácticamente insolubles. El mismo razonamiento puede aplicarse para el caso de los iones transicionales.

El proceso de intercambio es reversible, excepto cuando se trata de iones con radios hidratados pequeños, como es el caso del K^+ , NH_4^+ , Rb^+ y Cs^+ , ya que en parte, estos cationes no pueden ser sustituidos. Este fenómeno se le llama "fijación" y hay poca información al respecto, parece ser que estos iones sustituyen a cationes que sostienen las capas de las arcillas, y que juegan un papel muy importante las moléculas de agua estructurales y la distancia interplana.

La mayor parte de los investigadores, consideran a los fenómenos de intercambio, como reacciones químicas. Hay dos tipos de ecuación que han sido usadas para expresar las reacciones de intercambio catiónico. La primera, se basa en la isoterma de adsorción de Freundlich's que originalmente se desarrolló para explicar la adsorción de un gas por un sólido: $x/m = kp^{1/n}$, donde x/m es la cantidad de cationes adsorbidos respecto a la concentración presente en la solución, "p" es la cantidad de cationes añadida y que permanece en la solución: y finalmente "k" y "n" son constantes.

El segundo tipo de ecuación, explica el fenómeno de intercambio, con base en la ley de acción de masas. Esta ley sólo se puede aplicar, cuando la concentración de iones en la solución y en las posiciones de intercambio para un determinado suelo, puede ser determinada cuantitativamente. La ecuación se representa como sigue:



$$K = \frac{(\text{suelo}-B^+) (A^+)}{(\text{suelo}-A^+) (B^+)}$$

Cuando se adhieren diferentes sustancias a la arcilla, la capacidad de intercambio catiónico cambia, puede aumentar o decrecer, por ejemplo la materia orgánica penetra en la arcilla, la expande y aumenta la capacidad; mientras que los óxidos férricos, al precipitarse sobre las partículas cargadas, disminuyen su capacidad de retener cationes, y las protegen de futuras reacciones.

Aparte de las reacciones de intercambio, suceden otras que permiten mantener la concentración necesaria de nutrientes en la solución del suelo. Cada vez que una planta o un microorganismo absorbe alguna sustancia, ocurren diversas reacciones que liberan cierta cantidad de los elementos utilizados. A continuación se describe en forma general el

equilibrio dinámico del suelo (Figura II.3):

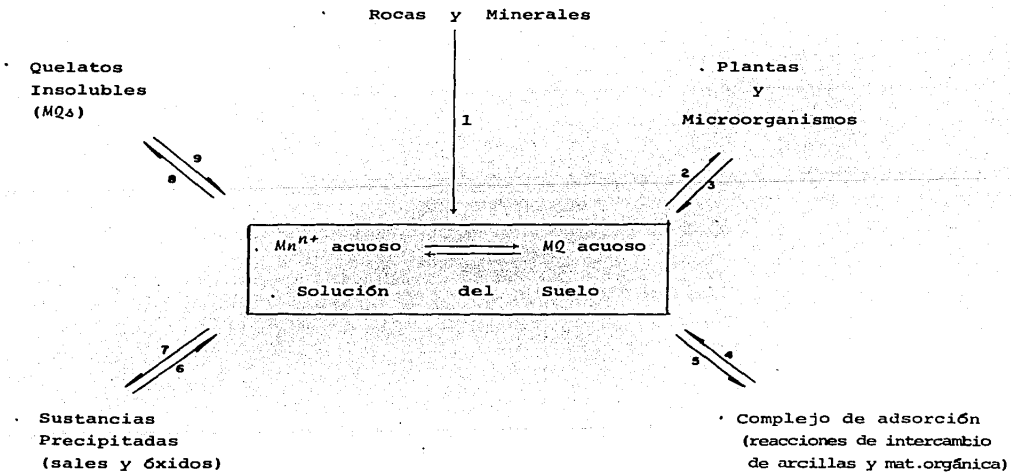
- El material parental, rocas y minerales primarios, a través de procesos de meteorización (reacción 1), libera elementos, principalmente por la acción de la humedad y el CO_2 .
- Las plantas y microorganismos, durante el curso de su metabolismo pueden utilizar o liberar iones de la solución. Asimismo cuando mueren, a través de su descomposición aumentan la concentración de la materia orgánica y de algunos iones de la solución (reacciones 2 y 3).

Cuando las plantas o microorganismos adsorben una cierta cantidad de iones de la solución, se libera una cantidad equivalente del complejo de adsorción y el equilibrio se desplaza hacia la solución (reacción 4). Adicionalmente, o exclusivamente si el ión no era soluble ni se encontraba en posiciones de intercambio, se disuelve una cantidad procedente de las sustancias precipitadas, como son los óxidos y sales, de acuerdo a las condiciones del suelo especialmente en lo que se refiere al pH (reacción 6).

- La materia orgánica, aparte de participar en el complejo de adsorción, juega un papel muy importante solubilizando diversos iones, especialmente los de transición, ya

que forma quelatos (reacciones 8, 9). Estos compuestos pueden ser solubles a pH básico y presentar un comportamiento inverso a los compuestos inorgánicos que en su mayoría son insolubles en un medio básico.

Figura II.3 Material Parental



II. 3 CONCEPTO DE pH DE UN SUELO

Sorenson (1909) introdujo el concepto de potencial hidrógeno que se define como el menos logaritmo de la actividad del ión hidrógeno. En la práctica generalmente en lugar de la actividad se utiliza la concentración, ya que en soluciones diluidas, ambos valores se aproximan:

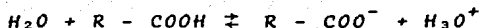
$$pH = - \log (H_3O^+)$$

A pesar de que el concepto de pH fué formulado para sistemas que cumplen con condiciones muy especiales, con algunas modificaciones fué transferido a suspensiones coloidales y a sistemas de suelos. El pH tiene influencia sobre los niveles de nutrimentos, actividad microbiana, composición de la solución y textura del suelo.

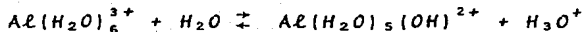
La medición de pH en un suelo, generalmente se realiza por medio de un electrodo de vidrio. Cuando se coloca éste en un sistema acuoso, se produce un potencial eléctrico que es proporcional a la concentración de protones en la solución (ley de Nerst); éste potencial se mide en un potenciómetro calibrado y se relaciona directamente al pH del sistema. (Novozansky, I. et al. en Bolt (1978), p. 32).

* El símbolo H_3O^+ representa a la totalidad de los protones hidratados y el corchete indica concentración.

Los protones presentes en la solución del suelo provienen de diferentes fuentes, entre las más comunes se encuentra la materia orgánica, ya que los grupos funcionales ácidos que contiene liberan iones hidrógeno, proceso que se favorece cuando las macromoléculas orgánicas se quelatan con metales transicionales.



Otra fuente de protones son los elementos anfóteros presentes en el suelo, en la fase sólida o acuosa. Los óxidos e hidróxidos de aluminio y hierro, que se encuentran en la su perficie reaccionan con el agua liberando protones o aceptán dolos, de acuerdo a la acidez del medio:



En las arcillas recién saturadas, los protones son atraídos a posiciones de intercambio catiónico, pasando a formar par te de la doble capa difusa, y con el tiempo estos protones intercambiables favorecen la liberación de iones aluminio que forman parte de la estructura de la arcilla, y a su vez se hidrolizan y liberan protones de la solución del suelo.

Algunas de las sales que están presentes en la solución del

suelo, también pueden hidrolizarse y dar reacción ácida o básica. Por ejemplo el carbonato de sodio presenta hidrólisis básica y aumenta el pH, mientras que el sulfato de hierro lo disminuye:



Por último hay que considerar la disolución de los componentes gaseosos, como el CO_2 , que acidifican el suelo.

La medición del pH en un sistema complejo, como es el suelo, se ve afectada por diferentes factores, entre los más importantes se encuentran: la presencia de sales en la solución, la dilución y el efecto de suspensión.

La presencia de sales neutras, o sea que no se hidrolizan, aumenta la acidez de un suelo, debido a que los cationes de la sal se intercambian con protones que se encontraban en la doble capa difusa, o formando parte de los oxhidrilos terminales, y facilitan su liberación.

Los cationes de la sal, también pueden sustituir a iones aluminio intercambiables, los cuales en la solución se hidrolizan y liberan protones. Si una suspensión de suelo se

diluye, el contenido salino disminuye y consecuentemente se desfavorece la liberación de protones y el pH aumenta.

Por lo tanto cuando se mide el pH de un suelo debe informarse la relación agua-suelo utilizada, o llevar a cabo las mediciones con una solución de 0.1 M de CaCl_2 , para que disminuya la extensión de la doble capa difusa, se liberen los protones y se minimice las variaciones de lecturas.

El efecto de suspensión, se refiere a que al medir el pH de una suspensión agua-suelo, el pH del líquido sobrenadante es diferente al del sedimento, generalmente cambia de un valor mayor a uno menor.

Anteriormente éste efecto se explicaba superficialmente, como resultado de la mayor concentración de protones de la suspensión, que se produce porque más partículas sólidas negativas, retienen a su vez una gran cantidad de hidrógenos intercambiables. Sin embargo en la actualidad éste fenómeno se relaciona a potenciales de contacto que se producen entre la solución y el electrodo de calomel. Esta hipótesis esta apoyada por el hecho de que es irrelevante la posición del electrodo de vidrio, y por que la gran cantidad de cationes presentes en la suspensión facilita la transferencia de mayor carga positiva que negativa hacia el electrodo de calomel, lo que produce un potencial que hace aparecer más

positivo el electrodo de vidrio y el pH leído es menor.

Se aconseja que al realizar las lecturas el electrodo de calomel se coloque en el líquido sobrenadante y el de vidrio en la suspensión, donde es más difícil que se disuelva CO_2 del aire.

II.4 SALINIDAD Y BASICIDAD* DE LOS SUELOS

II.4.1 *Definición y características de los suelos salinos*

El término salino se utiliza en suelos que contienen exceso de sales en la solución. Dependiendo del tipo y grado de hidrólisis que presenten los diferentes iones, los suelos podrán ser neutros, básicos o ácidos. La mayor proporción de los suelos salinos en el mundo, tienden a presentar reacción de neutra a alcalina, pero también existen suelos salinos ácidos (Hesse, P.R. 1971, p. 62).

La definición convencional más utilizada para un suelo salino, es la del Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos de Norteamérica (Richards, L.A. 1973, p.5):

" El término salino se aplica a suelos cuya conductividad del extracto de saturación, a 25°C, es mayor de 4 mmhos/cm, con un porcentaje de sodio intercambiable menor de 15. Generalmente el pH es menor de 8.5. Estos suelos corresponden

* El término basicidad, aunque no es muy utilizado, se seleccionó para definir en forma general a los suelos que presentan un pH mayor de 7, en lugar de alcalinidad, ya que este último se refiere específicamente a la concentración de iones carbonatos y bicarbonatos y al exceso de OH⁻ (Bolt, G.H. 1978 p.175). Además algunos autores lo utilizan como sinónimo de sodicidad.

al tipo descrito por Hilgard (1906) como suelos álcali blanco y a los Solonchaks de los autores rusos. En éstos suelos el establecimiento de un drenaje adecuado, permite eliminar por lavado las sales solubles volviendo nuevamente a ser suelos normales".

En los suelos salinos se acumulan principalmente los cationes sodio, calcio, magnesio y los aniones sulfato y cloruro: el sodio rara vez representa más de la mitad del total de los cationes solubles, y por lo tanto no es adsorbido en forma significativa. A veces se encuentran en pequeñas cantidades los iones potasio, bicarbonato, carbonato y nitrato, y más raramente se ha detectado la presencia del ión borato, el cual por ser altamente tóxico para las plantas, recibe considerable atención (Bear, F. 1965, p. 306).

Aunque la intemperización de los minerales primarios, es la fuente principal de formación de las sales, no es la causa más importante del origen de los suelos salinos, casi no existen ejemplos de este tipo, es más común que las fuentes directas sean las aguas superficiales y las subterráneas, que transportan las sales (Richards, L.A. 1973, p. 3). En ciertos casos, como es el del Valle de México, pueden presentarse cuencas cerradas, donde se acumulan las aguas de lluvia o de arroyos, que acarrean gran cantidad de sales, las cuales se concentran como consecuencia de la evaporación

y producen fenómenos de salinización. Ejemplos de este tipo se tienen en Chalco y en Texcoco (Gaxiola, V. 1980, p.8).

Los suelos salinos presentan una presión osmótica elevada, cuyo valor depende de la fuerza iónica de la solución del suelo, además con mucha frecuencia éstos suelos se encuentran floculados. Este fenómeno es favorecido por ciertas condiciones, que aumentan la posibilidad de que las partículas coloidales del suelo se puedan acercar, como son la alta concentración de sales, un pH cercano al punto isoelectrico, cargas opuestas en los coloides y la deshidratación de éstos.

II.4.2 *Definición y características de los suelos sódicos, sódico-salinos y cálcicos.*

El término sódico, se refiere según el mismo Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos de Norteamérica, a suelos que contienen más del 15% de sodio intercambiable* y presentan una conductividad en el extracto de saturación, medida a 25°C menor a 4 mmhos/cm.

* Este valor es convencional, en algunos casos presentan problemas suelos con valores menores de sodio intercambiable y viceversa.

Los suelos sódicos se forman cuando por diversas razones hay un exceso de iones sodio, lo que favorece la sustitución del calcio y magnesio de las posiciones de intercambio que ocupan en el complejo de adsorción. Si el sodio procede de carbonatos o bicarbonatos o de otras sales que contienen aniones, que a su vez provienen de ácidos débiles, se presentan valores de pH entre 8.5 y 10, debidos a la hidrólisis básica de éstos aniones. En cambio si los contraiones de sodio, son cloruros o sulfatos u otros aniones, que proceden de ácidos fuertes, el pH de los suelos puede estar cercano a la neutralidad, inclusive se han observado reacciones ácidas en suelos sódicos (Bolt, G.H. 1978, p. 183). Sin embargo, lo más frecuente es que los suelos sódicos presenten reacciones básicas (alcalinas) y que contengan cantidades apreciables de iones carbonato y bicarbonato.

Aunque como ya se dijo en el punto anterior no todos los suelos sódicos son básicos, siempre que hay problemas de pH relacionados a la presencia de carbonatos o bicarbonatos, ya sea porque provengan de sales o se formen a partir del CO_2 presente en el suelo, se observan problemas de sodicidad*. Esto se debe a que los iones calcio y magnesio

* Es por esta razón que muchos autores utilizan indistintamente los términos alcalino o sódico, aunque en realidad tengan significados diferentes.

precipitan como carbonatos y el sodio entonces ocupa las posiciones de intercambio; únicamente cuando el agua de irri-gación contiene mayor concentración de magnesio que de cal-cio no se observa este fenómeno, ya que el carbonato de mag-nesio es mucho más soluble que el de calcio (Bolt, G.H. op.cit. p. 184). La aereación de los suelos favorece la forma-ción de carbonatos y consecuentemente la sustitución del cal-cio y magnesio intercambiable.

Cuando el sodio sustituye a los iones calcio y magnesio en el complejo de adsorción, la doble capa difusa adquiere ma-yor extensión, ya que el sodio tiene una carga menor que los iones alcalinotérreos ya mencionados; las arcillas se hi-dratan fuertemente y el suelo se hincha. Como no hay una concentración importante de iones en la solución, las partí-culas coloidales que presentan la misma carga se repelen y el suelo se dispersa.

Todas las características anteriores, causan que los suelos sódicos presenten serios problemas físicos. Disminuye la presencia de poros, baja la permeabilidad y se dificulta el drenaje y la aereación del suelo. Además las partículas de arcilla dispersada se pueden transportar hacia los niveles inferiores del suelo, y como resultado en la parte superfi-cial se observa una textura relativamente gruesa y quebradi-za, y donde se acumula la arcilla se desarrolla una capa de

baja permeabilidad, con estructura prismática o columnar, que dificulta seriamente la labranza.

La materia orgánica dispersa y disuelta, puede como consecuencia de la evaporación del agua, depositarse en la superficie y causar un enegrecimiento de los suelos. Es por esta causa que para designar a éste tipo de suelo se utiliza el término "álcali-negro".

Hay suelos que presentan conjuntamente altas concentraciones de sales y un alto porcentaje de sodio intercambiable, se les llama sódico-salinos y se definen como los suelos que presentan un % de sodio intercambiable mayor de 15, y una conductividad medida a 25°C en extracto de saturación, mayor de 4 mmhos/cm (Richard, L.A. 1973, p. 5). Por su apariencia y propiedades son semejantes a los salinos. Las partículas coloidales permanecen floculadas y el pH depende de la cantidad y tipo de hidrólisis de los iones de la solución, aunque generalmente presentan reacciones levemente básicas, con pH menores de 8.5.

Siempre que en los suelos o en el agua de riego no se encuentre yeso (sulfato de calcio), el lavado de los suelos salinos que presentan problemas de sodicidad, conduce a la formación de suelos sódicos no salinos, con problemas similares a los descritos para éste tipo de suelos.

Cuando por diversas razones, se riega alternadamente con agua con alto contenido de sodio, y agua con baja conductividad, particularmente se presenta la hinchazón y dispersión de los suelos; un ejemplo, lo constituyen los suelos de zonas costeras, que se inundan temporalmente con agua de mar y posteriormente reciben grandes cantidades de agua de lluvia. Si además, el agua de irrigación contiene iones carbonato y bicarbonato, o se forman estos iones a partir del CO_2 , el suelo además de sodificarse; también se alcaliniza y presenta pH superiores a 8.5.

Finalmente cabe mencionar a los suelos llamados cálcicos, los cuales se forman por acumulaciones de roca caliza y materiales margosos que contienen calcita ($CaCO_3$) y dolomita $CaMg(CO_3)_2$ o una mezcla de ambos; en concentraciones que varían de pequeñas cantidades hasta muy altas (60-70%).

El pH de estos suelos es básico y se debe a la hidrólisis de los iones carbonato y bicarbonato, los cuales están presentes en las cantidades que fija el producto de solubilidad del carbonato de calcio y de magnesio.

II.4.3 Efectos de suelos salinos, sódicos y cálcicos a los cultivos agrícolas.

Los efectos dañinos ocasionados por suelos salinos a los cultivos agrícolas se deben a:

- El aumento de la presión osmótica de la solución del suelo, que inhibe la disponibilidad del agua, alrededor de las raíces de las plantas.
- La presencia de ciertos iones tóxicos en la solución como es el caso de ión Cl^- , que es uno de los principales componentes en extractos de suelos salinos, y es especialmente dañino para algunos plantíos como la vid, (U.S. Salinity Laboratory Slaff, 1954.
- Alteración de los mecanismos de absorción de las plantas, especialmente los de fósforo, sodio y potasio. Las sales que contienen calcio deprimen la solubilidad de los fosfatos, y los nitratos en exceso disminuyen la toxicidad de los cloruros porque dificultan su absorción por las plantas, (Buchner, 1951, en Hesse, 1970, p. 63). Cuando el contenido de sales es mayor al 0.2% se reduce la nitrificación, y a concentraciones más altas la inhibe totalmente y parte del nitrógeno se inmoviliza, (Bayens y Appelmans, 1947; y Isakohl, 1962, en Hesse, p., op. cit.

p. 63). (Bajpai et al. 1979, p. 197-198).

Los suelos sódicos dañan a los cultivos debida a la presencia de una gran cantidad de sodio intercambiable y en la mayoría de los casos a la existencia de un pH básico, causando los siguientes efectos físicos y químicos:

- Dispersión de las partículas de arcillas que son transportadas a niveles inferiores del suelo, formando estructuras prismáticas o columnares que dificulta la labranza y en la superficie del suelo se forma una textura gruesa y quebradiza.
- Disminución de la porosidad y permeabilidad del suelo, por lo que se dificulta la aereación y el drenaje.
- Toxicidad sobre las raíces de las plantas y disolución parcial de la materia orgánica. (Bear, 1965. p. 312).
- Deficiencias de nutrimentos especialmente de calcio, magnesio, hierro y fósforo.

Los problemas causados por suelos cálcicos a las plantas, se relacionan principalmente con el elevado pH que éstos presentan, dado que a estos valores de pH, muchos nutrimentos se insolubilizan, como se muestra en la figura (II.4).

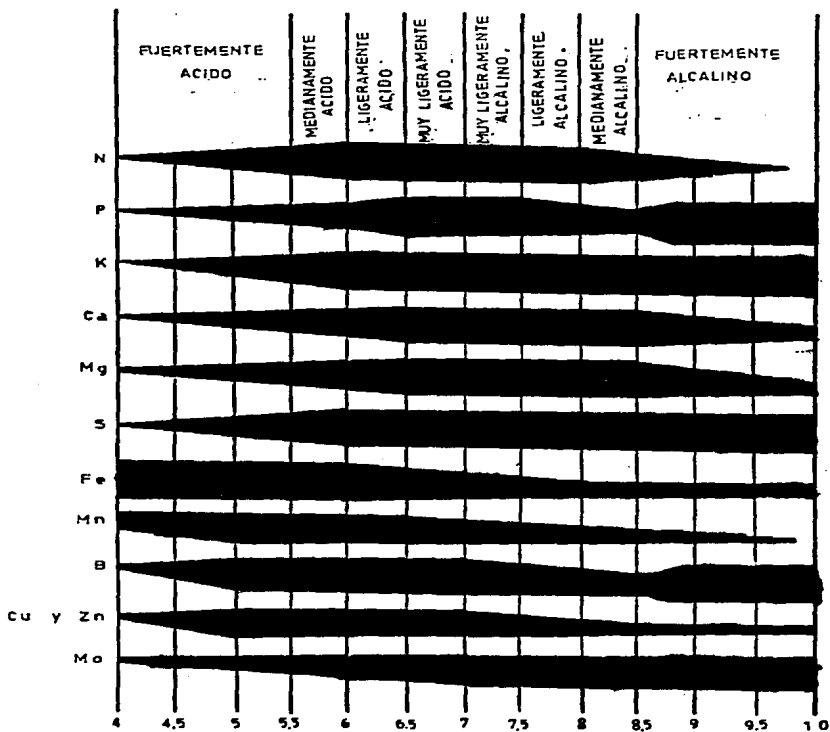


Figura II.4 Efecto del pH sobre la disponibilidad de los nutrientes para las plantas. La anchura de las bandas horizontales representa la solubilidad del nutriente (de Bidwell, 1979, p. 271).

II.5 RECUPERACION DE SUELOS SODICOS Y SALINOS

Estos suelos se recuperan mejorando sus condiciones físicas y químicas, de forma de lograr las condiciones que se requieren para el crecimiento de las plantas. En el caso de suelos salinos es necesario, disminuir el efecto nocivo de la presión osmótica en las plantas, reduciendo el contenido de sales solubles. En cambio en suelos sódicos se necesita restaurar sus condiciones físicas, reemplazando el sodio intercambiable por calcio. Para los suelos sódico-salinos se requiere la solución de ambos problemas; y en cualquier suelo incluyendo a los descritos, cuando el pH es muy alto, hay que disminuirlo para que se aumente la disponibilidad de nutrientes a las plantas y de esta manera se favorezca la productividad agrícola.

Actualmente como ya se indicó en la introducción, se aplican diferentes métodos de recuperación, entre los más usados se encuentran los métodos físicos, los hidrotécnicos, los biológicos y los químicos; más recientemente se han iniciado estudios para la aplicación de métodos eléctricos y microbiológicos.

II.5.1 *Métodos físicos.*

La recuperación de suelos salinos y sódicos mediante éstos métodos involucra una serie de medidas mecánicas bien diferenciadas siendo las más usuales las siguientes: la inversión del perfil, subsoleo, acondicionamiento de la textura del suelo, labranza profunda, barbecho profundo y aplicación de impermeabilizantes artificiales.

II.5.2 *Métodos hidrotécnicos*

Los métodos hidrotécnicos comprenden el lavado y el drenaje. El principio de estos métodos es muy simple. "Las sales deben ser sacadas del área afectada para evitar su distribución". y se aplica especialmente a suelos salinos; cuando se utiliza en suelos sódicos, las aguas de lavado deben con tener cationes de alta carga que sustituyan al sodio.

II.5.3 *Métodos biológicos*

Los métodos biológicos se basan en la adición de materia or gánica al suelo y la siembra de plantas, con el propósito de aprovechar los beneficios que ambos ejercen en el mejora miento de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.

II.5.4 *Métodos eléctricos*

Los métodos eléctricos son de los más recientes, y aún se encuentran en vías de experimentación. Estos métodos se basan en la aplicación directa de una corriente eléctrica al suelo, que involucra varios fenómenos y principios electroquímicos complejos como son, electrodiálisis, electroforesis, electrólisis, y electrósmosis. Estos procesos favorecen la remoción de cationes intercambiables del suelo, como es el caso del sodio y su reemplazamiento por calcio.

II.5.5 *Métodos químicos*

Los métodos químicos consisten en la adición de sustancias químicas llamadas mejoradores, los cuales intervienen en el equilibrio de las reacciones entre los cationes de la solución del suelo y los que han sido adsorbidos por el complejo de intercambio, disminuyendo la concentración del sodio canjeable, que causa los problemas al suelo. En el caso de suelos sódicos y salino-sódicos en que se requiere disminuir el sodio intercambiable, sustituyendo este catión por iones de calcio que proceden de la solución del suelo, se pueden usar diferentes tipos de mejoradores, estos son: sales solubles de calcio (yeso, cloruro de calcio); ácido o

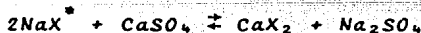
formadores de ácido (ác. sulfúrico, azufre, sulfato ferroso, sulfato de aluminio, polisulfuro de calcio); sales de baja solubilidad (roca caliza y dolomita).

Para aplicar el mejorador más adecuado, los suelos se han clasificado de acuerdo a su contenido de metales alcalinotérreos y pH en tres grupos:

Grupo I.- A ésta clasificación pertenecen los suelos que contienen carbonatos de metales alcalinotérreos y se recomienda la aplicación de yeso, azufre, polisulfuro de calcio o sulfato de hierro.

Las siguientes ecuaciones químicas ejemplifican la reacción entre el mejorador y el complejo de intercambio del suelo:

Yeso



Azufre

(1)**

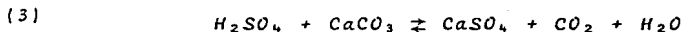


(2)



* X representa al complejo de intercambio.

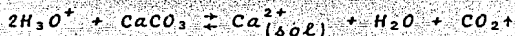
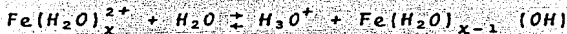
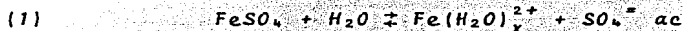
** Reacciones en cadena



Polisulfuro de calcio



Sulfato de hierro (II)



Grupo II.- Está formado por suelos que no contienen carbonatos alcalino térreos con pH 7.5 o más alto. Para este tipo de suelo se utiliza yeso, azufre, polisulfuro de calcio, sulfato de hierro, caliza. Las reacciones químicas que se realizan son las siguientes:

Yeso.- actúa igual que en el primer grupo.

Azufre

- (1) $2S^{\circ} + 3O_2 \rightleftharpoons 2SO_3$ (oxidación microbiodógica)
- (2) $SO_3 + H_2O \rightleftharpoons H_2SO_4$
- (3) $2NaX + H_2SO_4 \rightleftharpoons 2HX + Na_2SO_4$

Polisulfuro de calcio

- (1) $CaS_5 + 8O_2 + 4H_2O \rightleftharpoons CaSO_4 + 4H_2SO_4$
- (2) $10NaX + 4H_2SO_4 + CaSO_4 \rightleftharpoons 8HX + CaX_2 + 5Na_2SO_4$

Sulfato de hierro (II)

- (1) $FeSO_4 + H_2O \rightleftharpoons Fe(H_2O)_x^{2+} + SO_4^{=}$ (acuoso)
- $Fe(H_2O)_x^{2+} + H_2O \rightleftharpoons H_3O^+ + Fe(H_2O)_{x-1}(OH)$
- $H_3O^+ + NaX \rightleftharpoons HX + Na^+$ (soluble) + H_2O

Caliza

- (1) $CaCO_3 + H_2O \rightleftharpoons Ca^{2+}$ soluble + $HCO_3^- + OH^-$
- Ca^{2+} (soluble) + $2NaX \rightleftharpoons CaX_2 + Na_2CO_3$

Grupo III.- Esta formado por suelos que no contienen carbonatos alcalino térreos con pH menor de 7.5, y se recomienda el uso de yeso, polisulfuro de calcio, sulfato de hierro II y caliza. El yeso actúa de la misma forma que en suelos pertenecientes al primer grupo, mientras que el polisulfuro de calcio, sulfato de hierro y la caliza reaccionan como se señala para el segundo grupo. Sin embargo como los suelos que pertenecen a ésta clasificación (grupo III), tienen pH < 7.5, puede haber hidrógenos en posiciones de intercambio y reaccionar con el carbonato añadido.



II. 5.6 Métodos microbiológicos

Estos métodos de recuperación se encuentran en etapa de experimentación, para lo cual se han realizado estudios en los cuales se ha usado azufre inorgánico y microorganismos del género Thiobacillus que llevan a cabo la oxidación del elemento. Estos estudios se analizarán en la sección (II.5.7).

Cuando el azufre inorgánico y los microorganismos encargados de la oxidación de éste elemento, son agregados al suelo, deben ser integrados a un ciclo vital de la naturaleza conocido

como ciclo de azufre, éste se esquematiza en la figura (II.5), y engloba los siguientes procesos:

- La mineralización (1), mediante la cual se realiza la descomposición de grandes moléculas orgánicas que contiene azufre a compuestos más sencillos de azufre inorgánico. Este proceso es realizado por numerosos organismos heterótrofos, que por medio de una serie de reacciones bioquímicas rompen una gran variedad de enlaces, del azufre con los otros componentes, si es llevado en condiciones anaerobias, se acumula mercaptano y sulfuro de hidrógeno, y si se presentan condiciones aerobias es oxidado a sulfato.

- La oxidación (2), mediante la cual las formas reducidas de azufre (S^{2-} , S^0), pasan a sulfato. Este proceso es llevado a cabo por microorganismos que pertenecen a los siguientes cuatro grupos:

.Bacterias quimioautótrofas del género *Thiobacillus*.

.Un grupo definido como bacterias heterótrofas (fungi y actinomicetos).

.Bacterias filamentosas incoloras del género *Beggiatoa*, *Thiothrix* y *Thioplaca*.

- . Bacterias fotosintéticas que pertenecen a la familia Thiordhodaceae y Chlorobacteriaceae.

De los grupos mencionados anteriormente, solo los dos primeros son comúnmente encontrados en el suelo, los restantes se encuentran en el agua y en suelos inundados.

Al grupo de bacterias quimioautótrofas pertenecen los microorganismos que oxidan el azufre elemental, sulfuros y tio sulfatos, de donde obtienen la energía para su crecimiento y utilizan carbono inorgánico como fuente de carbono (Brock. H. 1982, p. 604). Estos microorganismos forman grandes cantidades de ácido sulfúrico de la oxidación de azufre elemental y por ello han sido utilizados en el tratamiento de enfermedades de las plantas, en la reducción del pH básico de los suelos y solubilización de los nutrimentos (Reeve R, 1960, en Bear p. 278).

- La inmovilización (3), que constituye la asimilación de compuestos inorgánicos de azufre (SO_4^{2-} , SO_3^{2-} , $S_2O_3^{2-}$, S^0) para formar el protoplasma celular microbiano y vegetal.
- La reducción (4), que consiste en la conversión de sulfatos y otras formas de azufre oxidadas a ac. Sulfhídrico. En el suelo sólo existen un pequeño número de microorganismos que pueden realizar este proceso y en suelos

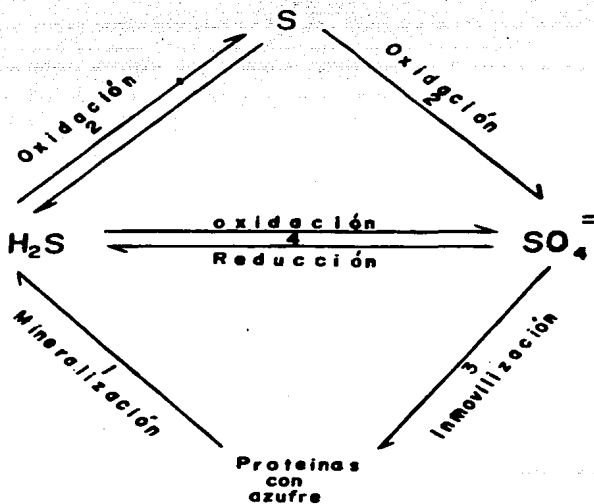


Figura II.5 Ciclo del azufre. (Tomado en Hesse P.R. p.303)

inundados la bacteria más común es *Desulfovibrio desulfuricans*.

II.5.7 Estudios realizados para la recuperación de suelos sódicos, mediante la adición de azufre y *Thiobacillus*

Los primeros trabajos sobre los productos de la oxidación del azufre elemental, fueron realizados en 1932 por Guitonneau y Keilling. En ese estudio se informó que en los suelos a los que se les había añadido azufre como mejorador, se producían politionatos (Nor, V.M. et. al., 1977, p. 737).

En 1936 se utilizó por primera vez el azufre elemental con bacterias del género *Thiobacillus*, para la recuperación de los suelos sódicos. Los resultados obtenidos no fueron muy claros, y en 1960 Iwatsuka y Mori relacionaron la baja actividad observada en los microorganismos adicionados en el estudio de 1936, con los altos valores de pH de los suelos sódicos, ya que el pH óptimo para el crecimiento de los microorganismos es de 5 (Bardiya, M.C. et al., 1973).

En 1957, Vishniac y Santander sugirieron que el tiosulfato, el tetracionato, y el sulfito son productos intermediarios, del proceso de oxidación del azufre elemental por microorganismos del género *Thiobacillus*. Los dos primeros productos

ya habían sido aislados en reacciones que involucran procesos microbiológicos, por Starkey en 1965. Tundinger en 1959 utilizó tiosulfato marcado con azufre radioactivo (^{35}S) para demostrar que el tetracionato es el primer intermediario en la transformación microbiológica del tiosulfato a sulfato (Nor, V.M. et. al. 1977 p. 737).

Nor, V.M. y colaboradores, en 1973 realizaron estudios sobre la oxidación del azufre en muestras de suelos superficiales de 0-15 cm. En el experimento utilizaron muestras de suelo a las que se adicionaron 200 ppm de S inorgánico y se incubaron a 30°C. Los resultados obtenidos confirmaron que el tiosulfato y el tetracionato son compuestos intermedios en la oxidación de azufre elemental, ya que en esos suelos se produjeron ambos compuestos.

Rupela y Tauro (1973 a.) realizaron un primer experimento con suelos sódicos colectados en Haryana, India, del que aislaron cepas de *Thiobacillus* y posteriormente inocularon los suelos, con el objeto de aumentar la población bacteriana y lograr su rehabilitación.

Se basaron en lo informado por Khanna y colaboradores en 1971, respecto a que los suelos sódico-alcalinos, contienen pocos microorganismos y en la evidencia de que el tiempo requerido para la reducción del pH, después de la aplicación

del azufre, está determinado por el número y el tipo de bacterias presentes que oxidan al azufre, y por la cantidad de azufre añadido al suelo.

Encontraron un número reducido de bacterias oxidantes en los suelos alcalinos estudiados. Entre los microorganismos que oxidan al azufre, predominaron dos especies del género *Thiobacillus*; una que presenta una morfología y características fisiológicas que corresponden a la *Th. thiooxidans*, que crece en un intervalo de pH de 3.0 a 8.0, con un valor óptimo de 5.0 y una temperatura de crecimiento y actividad entre 25 y 30°C; y la otra especie que corresponde a *Th. novellus*, la que crecen un intervalo de pH de 5.0- a 11.0, con un óptimo de 8.0 y una temperatura de crecimiento entre 31 y 35°C.

Los experimentos mostraron que de las dos especies aisladas, la *Th. novellus* es la que presenta las características más adecuadas para el enriquecimiento y recuperación de los suelos sódicos. Esta especie que produjo la máxima cantidad de ácido a un pH de 7.5 a 8, e inclusive a un pH de 10 se formó la mitad de la concentración máxima de ácido. Además es una especie muy tolerante a la salinidad, pues crece en concentraciones cercanas a 75 meq/l de carbonato de sodio y aún mayores de cloruro de sodio, siempre que se encuentre en su medio nativo.

En un trabajo posterior, los mismos autores aplicaron específicamente la especie *Th. novellus* a suelos sódicos (Rupela y Tauro 1973 b.). Añadieron bacterias en una proporción constante de 5 ml/kg de suelo, considerando que la concentración de microorganismos en los cultivos era de 5×10^3 células/ml, y adicionaron azufre elemental en diferentes dosis, 0.1, 0.5, y 1.0%, a suelos estériles, mantuvieron el experimento durante 105 días.

En este segundo experimento, obtuvieron los siguientes resultados (cuadro II.1):

Cuadro II.1 Efecto del azufre y la inoculación de *Thibacillus novellus* en suelos alcalinos.

Tratamiento	pH	Na ⁺ intercamb. meq/100g	Na ⁺ soluble meq/100g	SO ₄ ⁼ ppm
Ninguna adición	10.2	27.83	14.75	1875
S(0.1%)	10.2	26.96	15.65	1875
S(0.5%)	9.8	26.96	15.65	2125
S(1.0%)	9.7	25.22	16.52	2625
<i>Th. novellus</i>	10.2	26.09	14.78	2250
<i>Th. novellus</i> +S(0.1%)	9.9	24.35	16.52	2875
<i>Th. novellus</i> +S(0.5%)	8.5	15.65	25.22	4250
<i>Th. novellus</i> +S(1.0%)	7.8	13.64	27.83	5250

- En el tratamiento del suelo con azufre en diferentes dosis, los cambios de pH son mínimos, seguramente por la ausencia de flora nativa.
- En el caso de suelo tratado con *Thiobacillus novellus* no se observaron cambios considerables, ya que no había azufre.
- Cuando se agregó azufre y la bacteria a los suelos, los cambios observados en el pH fueron notables, siendo mayores en los casos en que se aplicaba las dosis más grandes de azufre.

Estos resultados confirmaron que los factores más importantes que intervienen en la velocidad de oxidación del azufre en suelos son, la presencia y cantidad de *Thiobacillus*, y las dosis de azufre aplicada. Además se concluyó que la disminución del pH, la reducción del sodio intercambiable y el aumento en la cantidad de sodio soluble, dependen de la cantidad de azufre oxidado, a sulfato.

Bardiya y colaboradores (1977), en estudios de recuperación de suelos con problemas de sodicidad, aplicaron azufre en diferentes concentraciones y *Thiobacillus*, a muestras de suelos esterilizados y no esterilizados. Y obtuvieron los resultados indicados en las tablas II.2, II.3 y II.4. Los suelos

presentaban las siguientes características: pH= 9.6; conductividad eléctrica 2×10^{-3} mmhos/cm; capacidad de campo de 31.7%; porcentaje de sodio intercambiable de 40.14% y textura arcillo-arenosa.

Cuadro II.2 Efecto de la inoculación de *Thiobacillus* en el pH del suelo.

Suelos esterilizados							
Tratamiento	Días de incubación						
	0	15	30	45	60	75	90
Suelo	9.6	9.5	9.6	9.5	9.5	9.6	9.5
Suelo + S	9.5	9.5	9.3	9.5	9.2	9.3	9.4
Suelo + S + <i>Thiobacillus</i>	9.5	9.1	8.9	8.9	8.5	8.5	8.4
Suelo + <i>Thiobacillus</i>	9.6	9.5	9.3	9.3	9.3	9.2	9.0
Suelos no esterilizados							
Tratamiento							
Suelo	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.5	9.4
Suelo + S	9.5	9.0	9.1	9.0	8.7	8.8	8.8
Suelo + S + <i>Thiobacillus</i>	9.5	9.0	8.8	8.8	8.7	8.5	8.3
Suelo + <i>Thiobacillus</i>	9.6	9.6	9.6	9.5	9.4	9.4	9.4

- En el caso del suelo estéril con azufre, no se observaron cambios en el pH, debido a la falta de flora nativa que oxide al azufre.
- En el suelo estéril que se le añadió azufre y *Thiobacillus* se observó un descenso significativo de pH.
- Cuando se adicionó *Thiobacillus* al suelo estéril, pero no se utilizó azufre, no se observó cambios considerables en el pH.
- En el tratamiento del suelo no estéril con azufre se observó un decremento más o menos significativo del pH, esto puede deberse a que la microflora nativa del suelo oxidó al azufre.
- Cuando se adicionó *Thiobacillus* en condiciones no estériles o estériles no se observaron cambios en la acidez, debido a la falta de azufre.
- La disminución máxima de acidez, se observó en suelos estériles y no estériles, a los que se adicionó azufre y microorganismos.

Cuadro II.3 Efecto de la inoculación de *Thiobacillus thiooxidans* sobre el calcio soluble

Calcio soluble meq/100g de suelo							
Suelos esterilizados							
Días de incubación							
Tratamiento	0	15	30	45	60	75	90
Suelo	2.5	2.5	2.3	2.4	2.2	2.1	2.1
Suelo + S	2.7	2.7	2.9	2.5	2.6	2.9	2.5
Suelo + S + <i>Thiobacillus</i>	2.7	2.9	3.7	5.3	5.5	7.1	9.7
Suelo + <i>Thiobacillus</i>	2.7	3.3	2.9	2.9	2.6	2.5	2.5
Suelos no esterilizados							
Suelo	2.5	2.9	2.7	3.9	2.1	1.6	1.6
Suelo + S	2.7	5.1	7.8	3.9	3.9	3.5	3.5
Suelo + S + <i>Thiobacillus</i>	2.7	2.5	12.2	4.9	4.5	4.5	2.1
Suelo + <i>Thiobacillus</i>	2.7	2.3	2.4	2.4	1.9	1.3	1.6

- No se observaron cambios en el contenido de calcio soluble bajo todos los tratamientos dados y para cualquier tiempo de incubación. Excepto en el caso del suelo esterilizado + azufre + thiobacillus, en el que se presentó un incremento; en tanto que en condiciones de no esterilidad, al principio se incrementó el calcio soluble, pero después de 30 días de incubación la concentración de

calcio bajo drásticamente. Esta disminución puede ser atribuida a que numerosos microorganismos inmovilizan al calcio ya que lo utilizan en la formación de esporas.

Cuadro II.4 Efecto de la inoculación de *Thiobacillus thiooxidans* sobre las sales solubles

Sales solubles g/100g de suelo							
Suelos no esterilizados							
Días de incubación							
Tratamiento	0	15	30	45	60	75	90
Suelo	2.79	2.31	2.20	2.62	2.72	2.70	2.70
Suelo + S	2.78	2.48	2.84	2.60	2.64	2.24	2.24
Suelo + S + <i>Thiobacillus</i>	3.10	3.28	3.72	3.64	3.48	2.88	2.60
Suelo + <i>Thiobacillus</i>	3.12	3.12	3.16	3.16	3.28	3.00	2.72
Suelos esterilizados							
Tratamiento	0	15	30	45	60	75	90
Suelo	2.79	2.48	2.27	2.24	1.78	1.88	1.44
Suelo + S	2.78	2.00	2.08	2.40	2.84	2.84	2.68
Suelo + S + <i>Thiobacillus</i>	3.10	3.40	3.52	3.12	2.56	2.80	2.78
Suelo + <i>Thiobacillus</i>	3.12	3.52	2.00	2.00	2.12	1.86	1.73

- Bajo condiciones no estériles no se observaron cambios significativos en el contenido de sales solubles,

excepto en el tratamiento de suelo con azufre y *Thiobacillus*, donde el contenido de sales se incrementó en los primeros 60 días y posteriormente decreció.

- En condiciones estériles, en todos los casos decreció el contenido de sales solubles, pero cuando se adicionó azufre y *Thiobacillus* al suelo, se mantuvo el valor por arriba de los otros resultados.

Mcready, R.G., et.al. (1982 p. 105-110) realizaron estudios en las fracciones isotópicas del azufre durante la oxidación del azufre elemental por *Thiobacillus* en suelos sódicos (Solonetzinc) con las siguientes características físico-químicas: pH= 8.4; capacidad de intercambio catiónico= 22.7 meq/100g; % de saturación de sodio= 19.66%; textura arcillo-limosa.

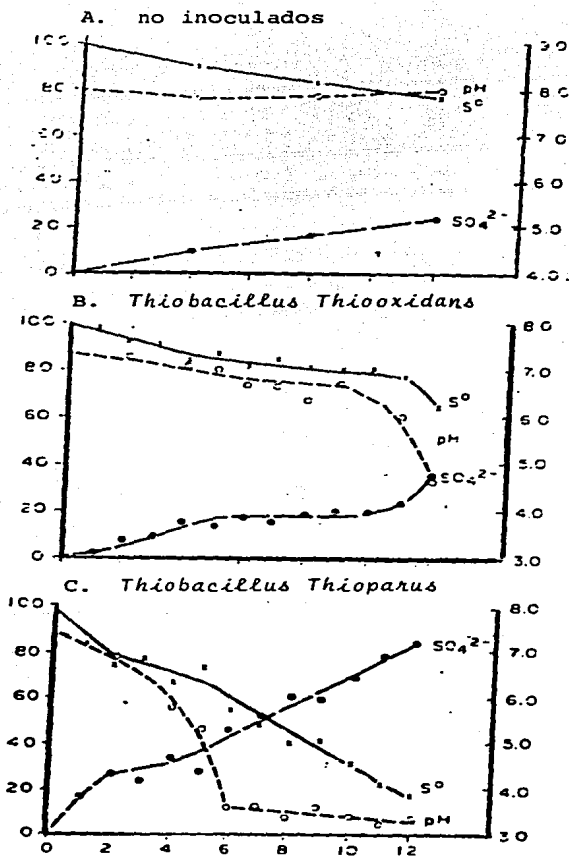
Los resultados que obtuvieron se esquematizan en la figura II.6

- En suelos no inoculados con microorganismos, la velocidad de oxidación presentó una relación lineal con respecto al tiempo. La concentración máxima de sulfatos se obtuvo a las 12 semanas y en la superficie del suelo los cambios en los valores de pH fueron irrelevantes.

- En suelos inoculados con *Th. thiooxidans*, con un pH de crecimiento óptimo de 4 a 1.0, la velocidad de oxidación también estaba linealmente relacionada con el tiempo. En las primeras 10 semanas la velocidad fué muy similar a la observada en suelos no inoculados, pero en las últimas dos semanas del experimento el pH decreció rápidamente de 8.4 a 5.0, con lo que se incrementó la velocidad de oxidación del azufre.

- En suelos en los que se uso *Th. thioparus*, se observó que en las 12 semanas el 84% del azufre se había oxidado a sulfatos, además el pH disminuyó de 7.5 a 3.5. Cabe aclarar que la *Th. thioparus* tiene un pH de crecimiento óptimo de 7.2 a 4.5 (Vishniac, 1975).

Figura II.6 Cambios en el pH, contenido de azufre y sulfato, durante la oxidación de azufre en suelos Solonchic.



- A) no inoculados
 B) inoculados con *Th. thiooxidans*
 C) inoculados con *Th. thioparus*.

C A P I T U L O I I I

PARTE EXPERIMENTAL

III.1 DISEÑO DEL EXPERIMENTO

- Se seleccionó un experimento factorial de invernadero con las siguientes variables:

2 tipos de suelo : S_0 (cálcico) y S_1 (sódico)

2 tipos de riego : R_0 (normal; capacidad de campo)
 R_1 (excesivo; punto de saturación)

3 tipos de tratamiento : A_0 (ningún producto)
 A_1 (azufre inorgánico)
 A_2 (azufre microbiológico comercial)

3 repeticiones

2 tipos de suelo x 2 tipos de riego x 3 tipos de tratamiento x 3 repeticiones = 36 combinaciones.

- A cada combinación posible de variables se le asignó un número del 1 al 12, (cuadro III.1).
- Se realizó la distribución de lugares señalándose, con números del 1 al 36, (cuadro III.2).
- Se generó una lista de 36 números aleatorios con límites del 1 al 12, esto quiere decir que cada número apareció tres veces y corresponderá a las repeticiones, (cuadro III.3). El objetivo de estos pasos fué evitar cualquier sesgo, en la asignación de lugares y tratamiento.
- Se construyó un pequeño invernadero interior, cubierto con plástico, para evitar cambios bruscos de temperatura y contaminaciones exteriores. La temperatura durante el experimento fué de $20^{\circ}\text{C} \pm 5$. En éste experimento se utilizaron macetas sin dren de plástico con un volumen de aproximadamente 1 litro, con el fin de asemejar las condiciones a las existentes en los suelos con problemas de salinidad, en los cuales los desagües son insuficientes.
- Como complemento del experimento se prepararon 6 macetas con suelo sódico y dren (cuadro III.4), para observar el

rendimiento del producto comercial (azufre microbiológico) y del azufre inorgánico, en condiciones más favorables.

- El experimento se mantuvo durante 80 días recolectándose muestras a los 10, 20, 40 y 80 días en los que se determinaron pH y sulfatos disponibles.
- Análisis físicos y químicos* realizados en las muestras iniciales y muestras tomadas al final del experimento.

**** Muestras iniciales:**

- Color
- Densidad real
- Densidad aparente
- pH
- Conductividad
- Cationes solubles
(Na^+ , K^+)
- Cationes intercambiables
(Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++})
- Capacidad de intercambio catiónico

* Referirse al apéndice

** Los resultados se muestran en el cuadro IV.1

- Capacidad de campo
- Aniones solubles (Cl^- , HCO_3^- , CO_3^{2-}),
pH y conductividad en extrato de saturación
- Sulfatos disponibles
- Materia orgánica
- Textura

Muestras finales:

- pH
- Sulfatos disponibles
- Cationes intercambiables
(Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++})
- Capacidad de intercambio catiónico
- Cationes solubles (Na^+ y K^+)
- Conductividad
- Materia orgánica

Cuadro III.1 Combinaciones de tratamiento

No. de combinación	Suelo	Riego	Adiciones
1.-	S ₀	R ₀	A ₀
2.-	S ₀	R ₀	A ₁
3.-	S ₀	R ₀	A ₂
4.-	S ₀	R ₁	A ₀
5.-	S ₀	R ₁	A ₁
6.-	S ₀	R ₁	A ₂
7.-	S ₁	R ₀	A ₀
8.-	S ₁	R ₀	A ₁
9.-	S ₁	R ₀	A ₂
10.-	S ₁	R ₁	A ₀
11.-	S ₁	R ₁	A ₁
12.-	S ₁	R ₁	A ₂

Cuadro III.2 Distribución de lugares:

Repetición 1			Repetición 2			Repetición 3		
1	2	3	13	14	15	25	26	27
4	5	6	16	17	18	28	29	30
7	8	9	19	20	21	31	32	33
10	11	12	22	23	24	34	35	36

Cuadro III.3

LUGAR	LISTA ALEATORIA	TRATAMIENTO
1	5	S ₀ R ₁ A ₁
2	1	S ₀ R ₀ A ₀
3	2	S ₀ R ₀ A ₁
4	12	S ₁ R ₁ A ₂
5	9	S ₁ R ₀ A ₂
6	8	S ₁ R ₀ A ₁
7	4	S ₀ R ₁ A ₀
8	10	S ₁ R ₁ A ₀
9	3	S ₀ R ₀ A ₂
10	11	S ₁ R ₁ A ₁
11	6	S ₀ R ₁ A ₂
12	7	S ₁ R ₀ A ₀
13	11	S ₁ R ₁ A ₁
14	4	S ₀ R ₁ A ₀
15	12	S ₁ R ₁ A ₂
16	9	S ₁ R ₀ A ₂
17	10	S ₁ R ₁ A ₀
18	1	S ₀ R ₀ A ₀
19	6	S ₀ R ₁ A ₂
20	2	S ₀ R ₀ A ₁
21	5	S ₀ R ₁ A ₁
22	7	S ₁ R ₀ A ₀
23	8	S ₁ R ₀ A ₁
24	3	S ₀ R ₀ A ₂
25	10	S ₁ R ₁ A ₀
26	11	S ₁ R ₁ A ₁
27	4	S ₀ R ₁ A ₀
28	3	S ₀ R ₀ A ₂
29	7	S ₁ R ₀ A ₀
30	6	S ₀ R ₁ A ₂
31	5	S ₀ R ₁ A ₁
32	8	S ₁ R ₀ A ₁
33	12	S ₁ R ₁ A ₂
34	1	S ₀ R ₀ A ₀
35	9	S ₁ R ₀ A ₂
36	2	S ₀ R ₀ A ₁

Cuadro III.4

Macetas con Dren*

LUGAR	TRATAMIENTO
1	S ₁ R ₀ A ₀ *
2	S ₁ R ₀ A ₁ *
3	S ₁ R ₀ A ₂ *
4	S ₁ R ₁ A ₀ *
5	S ₁ R ₁ A ₁ *
6	S ₁ R ₁ A ₂ *

III.2 PROCEDIMIENTOS Y CONTROL DE VARIABLES

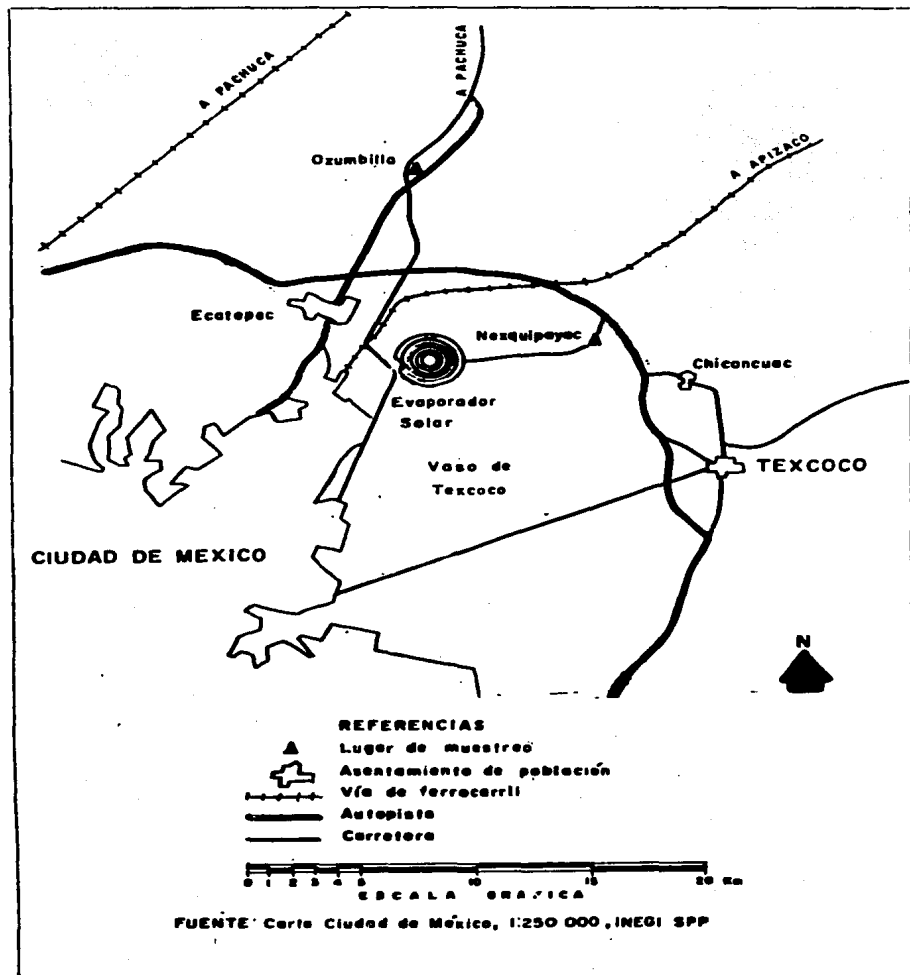
III.2.1 *Toma de la muestra*

- Se recolectaron 50 kg. de suelo cálcico superficial (0 a 20 cm); en Ozumbilla ladera del cerro Tecozontla, Texcoco; y 50 kg de suelo sódico (0 a 20 cm), en Nesquipayac Vaso de Texcoco, (figura III.1).
- Los suelos recolectados se secaron al aire durante una semana, se molieron con un mortero de madera y posteriormente se pasaron a través de una malla No. 10 (2 mm). Finalmente se transfirieron a bolsas de polietileno.

III.2.2 *Control de variables (macetas sin dren)*

- Se colocó en cada maceta 1.5 Kg de suelo correspondiente (sódico o cálcico), previamente tamizado.
- Se agregó 5.2 g de azufre inorgánico. La dosis se calculó con base en la cantidad de sodio intercambiable que debe ser reemplazado en la muestra de suelo; (Hesse, P. 1970, p. 59). Considerando que una mol de azufre produce una mol de sulfatos que a su vez solubiliza un equivalente de calcio y desplaza a dos equivalentes de sodio.

Figura III.1 LOCALIZACION DE LOS LUGARES DE MUESTREO



En la (figura III.2) se observa que para reemplazar 12 meq/100g de suelo se requiere 1.9 ton de azufre/ha, considerando una lámina de suelo de 15cm. Por lo tanto para reemplazar 22.3 meq/100g* de sodio intercambiable se requieren 3.5 ton/ha.

Expresado en peso de suelo es igual a

$$\text{Requerimiento de azufre} = \frac{(3.5 \times 10^6 \text{ g S}) (1.5 \times 10^3 \text{ g de suelo})}{9.98 \times 10^8 \text{ g de suelo}}$$

$$= 5.2 \text{ g de S/peso de suelo de la maceta}$$

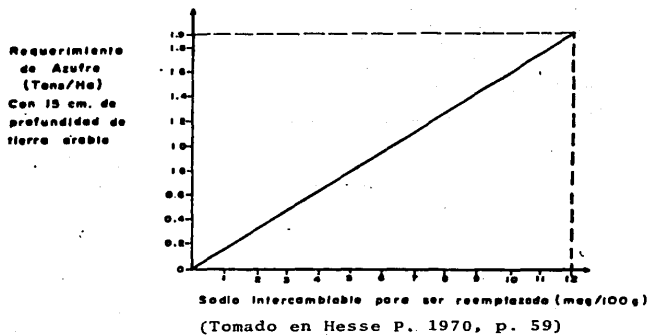
- Se calculó la dosis de azufre microbiológico, con base en la cantidad recomendada por el fabricante (500 Kg/ha), considerando 15 cm de profundidad de tierra arable, el volumen de 1 ha de suelo es de $1.5 \times 10^9 \text{ cm}^3$ y el de la maceta es de 1150.4 cm^3 , la dosis es igual a $0.3834 \text{ g}/1500 \text{ g}$ de suelo.

$$\begin{array}{l} \text{Dosis recomendada} \\ \text{por el fabricante} \end{array} = \frac{(3 \times 10^5 \text{ g/ha}) (1150.4 \text{ cm}^3)}{1.5 \times 10^9 \text{ cm}^3}$$

$$= 0.3834 \text{ g/peso de suelo de la maceta}$$

* Valor de sodio intercambiable del suelo sódico.

Figura III.2 REQUERIMIENTO DE AZUFRE INORGANICO DEL SUELO CON BASE EN EL VALOR DE SODIO INTERCAMBIABLE



- Este valor se multiplicó por un factor de 3, ya que se consideró que aún en condiciones de oxidación total 0.3834g, no era suficiente para desplazar la cantidad de sodio intercambiable de la muestra. Es decir se colocó 1 g de azufre microbiológico.
- Con los datos de capacidad de campo y punto de saturación (cuadro IV.1), se calculó la cantidad de agua que se requería añadir a 1.5 Kg de suelo en cada maceta.

$$\begin{aligned} \text{Riego normal suelo cálcico} &= \frac{(26.05\text{mL})(1500\text{g})}{100\text{g}} \\ &= 390.75 \text{ mL} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Riego excesivo suelo cálcico} &= \frac{(32.53\text{mL})(1500\text{g})}{100\text{g}} \\ &= 487.95 \text{ mL} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Riego normal suelo sódico} &= \frac{(39.58\text{mL})(1500\text{g})}{100\text{g}} \\ &= 593.7 \text{ mL} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Riego excesivo suelo sódico} &= \frac{(47.06\text{mL})(1500\text{g})}{100\text{g}} \\ &= 705.9 \text{ mL} \end{aligned}$$

Posteriormente se pasaron las macetas y cada día se adicionó el agua necesaria para mantener la condición inicial.

III.2.3 *Control de variables (macetas con dren)*

- Se colocaron 1.5 Kg de suelo sódico o cálcico, en la maceta correspondiente.
- Se agregó 7 g de azufre inorgánico y 7 g de azufre micro biológico.
- Se agregó agua a capacidad de campo para riego normal y a punto de saturación para riego excesivo y esta condición se mantuvo por el tiempo que duró el experimento.

C A P I T U L O I V

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

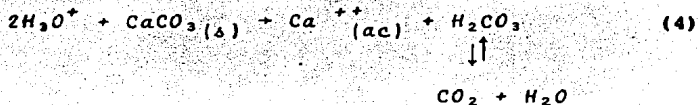
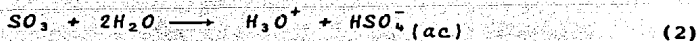
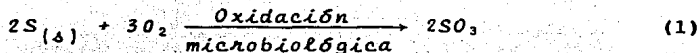
IV.1 ANALISIS DE RESULTADOS

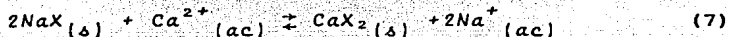
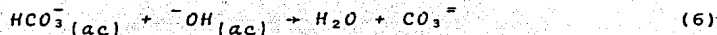
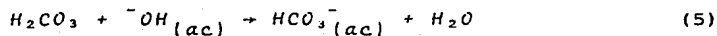
En los (cuadros IV.2 a IV.13), se presentan los valores de los parámetros físicos y químicos de las tres repeticiones para cada combinación y la media. De estos valores se tienen las siguientes observaciones:

- En suelos cálcicos y salino-sódicos, en los que se adicionó azufre ya sea inorgánico o microbiológico, bajo cualquier regimen de riego, e independientemente de la presencia de drenaje se presentó disminución del pH, aumento en la concentración de sulfatos (figuras IV.1 a IV.12) y disminución del sodio intercambiable (figura IV.14 , IV.16), y IV.18).

Estas observaciones en los diferentes tratamientos corresponden a los siguientes cambios:

El azufre (microbiológico e inorgánico) se transformó por acción microbiológica hasta sulfatos e iones hidrógeno (reacción 1, 2 y 3). Los iones hidrógeno reaccionaron con el carbonato de calcio de los suelos, formando iones calcio y ácido carbónico (reacción 4). El ácido carbónico disminuyó el pH (reacción 5 y 6). El ión sodio se sustituye del complejo de intercambio por ión calcio, debido a que la relación carga-radio y el aumento de la concentración de este último ión, favorece su entrada al complejo de intercambio; pasando los iones sodio a la solución (reacción 7)





- En todos los casos en los que se dió tratamiento ya sea con azufre inorgánico o azufre microbiológico, se esperaba un aumento en la cantidad de calcio intercambiable, sin embargo se observó que en las macetas a las cuales se adicionó azufre microbiológico, a excepción del suelo sódico-salino con riego excesivo, no se presentaron aumentos de calcio intercambiable correspondientes a la sustitución de sodio intercambiable.

En las figuras (IV.13, IV.15 y IV.17), se muestran los cambios de calcio intercambiable después de 80 días de agregado el tratamiento. En los dos tipos de suelo, cuando se añade azufre inorgánico, se observó que el aumento en la cantidad de calcio intercambiable, es mayor cuando el riego es excesivo (punto de saturación); en cambio cuando se añadió azufre microbiológico esta relación no fué tan clara ya que el riego excesivo favoreció la formación de calcio intercambiable,

únicamente en el suelo sódico-salino. En suelos cálcicos con riego excesivo no se observó aumento de calcio intercambiable a diferencia del suelo sódico-salino.

Estas observaciones que corresponden a un comportamiento no esperado y al que pudiera estar asociado la inmovilización de calcio por los microorganismos, y de manera particular a la formación de endosporas bacterianas, que es favorecida por las condiciones adversas al medio, y en cuya biosíntesis se consume calcio (Bardiya, et. al, 1973, p.218-221). Brock, 1978, p. 644-645).

En el cuadro (IV.14), se presentan los incrementos positivos y negativos de los valores promedio para las tres repeticiones de cada combinación y de estos se observó lo siguiente:

- La mayor disminución del pH, con aumento en el calcio intercambiable y disminución del sodio intercambiable, del sodio soluble y de la conductividad, se presentó en suelos sódico-salinos, con drenaje y al que se añadió azufre microbiológico en condiciones más favorables que a las supuestamente requeridas.
- Cuando las macetas no tenían drenaje, se observó, en ambos suelos, una mejor respuesta al azufre inorgánico.

El aumento del agua de riego no favoreció considerablemente la disminución del pH.

- Sin drenaje, todos los tratamientos de azufre ya sea inorgánico o microbiológico presentaron disminución de sodio intercambiable y aumentó de sodio soluble y consecuentemente aumentó de conductividad eléctrica.
- El aumento del porcentaje de carbono orgánico, muy posiblemente relacionado al crecimiento de los microorganismos, únicamente se presentó cuando las macetas tenían drenaje. Los aumentos fueron mayores cuando se adicionó azufre microbiológico. El exceso de humedad también favoreció el aumento de carbono orgánico.
- El tratamiento de los suelos con azufre ya sea inorgánico o microbiológico, no causó cambios considerables en los contenidos de magnesio y potasio intercambiables. Este hecho se explica porque las cantidades presentes de estos elementos en estos suelos es mucho menor que la de calcio y sodio, además el coeficiente de selectividad del potasio respecto al sodio es de aproximadamente cinco. Estos resultados parecen asegurar que el tratamiento con azufre no empobrece a un suelo en su contenido de potasio, elemento esencial para las plantas; ya que de sustituir el

calcio soluble al potasio intercambiable, este último pasaría a la solución del suelo y se lixiviaría fácilmente.

IV. 2 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De todo lo expresado en la sección anterior se concluye que:

- La transformación del azufre inorgánico y microbiológico en suelos básicos mejora algunas de las características evaluadas referentes a pH, contenido de calcio y sodio intercambiable.

 - Este efecto es mayor cuando existe agua en exceso. Por lo que se recomienda aplicar estos tratamientos antes de la época de lluvia, con el fin de asegurar las transformaciones en época de precipitación.

 - De los dos tratamientos empleados resultó mejor el azufre inorgánico, el que además ofrece la ventaja de ser más económico. Sin embargo es de hacer notar que las dósis empleadas fueron mayores para éste caso, y que la adición de mayores cantidades de azufre microbiológico probablemente mejoren su efecto, el que es mejor en suelos bien drenados.
- Es recomendable para cualquiera de los mejoradores a usar ya sea azufre inorgánico o microbiológico, agregar las cantidades calculadas con base en los contenidos de sodio intercambiable de los suelos que se van a tratar. Y en el caso del azufre microbiológico sobre este valor agregar

un exceso accesible a la economía del consumidor. Es de hacer notar que las dosis recomendadas por el fabricante son muy pequeñas y que el azufre microbiológico es 4 veces más caro que azufre inorgánico.

- El mejoramiento de suelos básicos solo resultará de la acción integrada de una serie de factores:

En zonas en las que no sea posible mejorar el desagüe, y utilizar agua de riego de alta calidad (baja cantidad de sales solubles), es recomendable utilizar azufre inorgánico y controlar los cambios en el suelo y en la producción agrícola. Cabe aclarar que aunque disminuye el pH y el porcentaje de sodio intercambiable, la conductividad puede aumentar, lo que evita el crecimiento del cultivo, para esto se debe procurar un drenaje adecuado. Debe cuidarse también que el uso de azufre inorgánico no cambie drásticamente las condiciones de un suelo, pues puede desestabilizar el equilibrio eléctrico de los aluminosilicatos y destruir su textura al ser sustituido el calcio intercambiable por iones hidrógeno.

IV.3 CUADROS Y FIGURAS DE LOS RESULTADOS ANALITICOS

Cuadro IV.1 DETERMINACIONES FISICOQUIMICAS EN MUESTRAS INICIALES

	SUELO CALCICO	SUELO SODICO
COLOR Suelo seco	10YR 7/3 café muy pálido	10YR 6/3 café pálido
Suelo húmedo	10YR 4/3 café os-	10YR 3/3 café oscuro
DESIDAD REAL g/cm ³	3.42	2.09
DENSIDAD APARENTE g/cm ³	1.326	1.245
CONDUCTIVIDAD mmhos/cm en agua dest.	0.38	2.5
pH (1:5) en agua dest.	9.0	10.6
CATIONES SOLUBLES Na+ meq/100g	2.5	17.2
K+ "	0.23	0.16
CATIONES INTERCAMBIABLES Na+ meq/100g	2.8	22.3
K+ "	2.1	2.9
Ca++ "	10.6	5.6
Mg++ "	2.8	0.66
CIC	17	27
% Saturación de sodio	16.47	82.59
% CAPACIDAD DE CAMPO	26.05	59.58
EXTRACTO DE SATURACION % de saturación	32.53	47.06
pH	8.5	10.6
ANIONES SOLUBLES Cl- meq/l	71.25	185.0
HCO ₃ ⁻ "	62.25	52.5
CO ₃ ⁼ "	2.50	7.5
CONDUCTIVIDAD mmhos/cm	1.6	18.5
SULFATOS SOLUBLES PPX	100	591
% MATERIA ORGANICA	0.33	0.53
% CARBONO ORGANICO	0.19	0.31
TEXTURA: % arenas	70.4	30.4
% limos	19.6	53.6
% arcillas	10.0	16.0
Tipo de suelo	Franco Arenoso	Franco Limoso
% DE CARBONATOS alcalinotérreos	14.57	6.97

Cuadro IV.2 RESULTADOS DE PH EN SUELO CALCICO MACETAS SIN DREN

Muestra	0 días	10 días	20 días	40 días	80 días	No. de figura
S ₀ R ₀ A ₀	9.0	9.1	9.1	9.0	8.9	IV.1
S ₀ R ₀ A ₀	9.0	9.0	9.1	8.9	8.9	
S ₀ R ₀ A ₀	9.0	9.0	9.1	9.0	8.9	
media	9.0	9.0	9.1	9.0	8.9	
S ₀ R ₀ A ₁	9.0	8.7	8.4	8.4	8.2	
S ₀ R ₀ A ₁	9.0	8.7	8.3	8.3	8.2	IV.1
S ₀ R ₀ A ₁	9.0	8.7	8.4	8.3	8.2	
media	9.0	8.7	8.4	8.3	8.2	
S ₀ R ₀ A ₂	9.0	9.0	8.7	8.5	8.4	
S ₀ R ₀ A ₂	9.0	8.9	8.7	8.5	8.3	
S ₀ R ₀ A ₂	9.0	9.0	8.7	8.5	8.4	IV.1
media	9.0	9.0	8.7	8.5	8.4	
S ₀ R ₁ A ₀	9.0	9.2	9.1	8.8	9.0	
S ₀ R ₁ A ₀	9.0	9.1	9.1	8.9	9.0	
S ₀ R ₁ A ₀	9.0	9.1	9.1	8.9	9.0	
media	9.0	9.1	9.1	8.9	9.0	IV.2
S ₀ R ₁ A ₁	9.0	9.0	8.4	8.3	8.0	IV.2
S ₀ R ₁ A ₁	9.0	9.0	8.8	8.4	8.2	
S ₀ R ₁ A ₁	9.0	9.0	8.6	8.4	8.1	
media	9.0	9.0	8.6	8.4	8.1	
S ₀ R ₁ A ₂	9.0	8.9	8.8	8.5	8.5	
S ₀ R ₁ A ₂	9.0	9.0	8.8	8.5	8.3	IV.2
S ₀ R ₁ A ₂	9.0	9.0	8.8	8.5	8.4	
media	9.0	9.0	8.8	8.5	8.4	
S ₀ R ₁ A ₂	9.0	9.0	8.8	8.5	8.4	
media	9.0	9.0	8.8	8.5	8.4	

Cuadro IV.3 RESULTADOS DE SULFATOS EN SUELO CALCICO MACETAS SIN DREN*

Muestra	0 días	10 días	20 días	40 días	80 días	No. de figura
S ₀ R ₀ A ₀	100	101	105	105	105	IV. 3
S ₀ R ₀ A ₀	100	113	98	113	124	
S ₀ R ₀ A ₀	100	113	105	94	113	
S ₀ R ₀ A ₀	100	109	103	104	114	
media						
S ₀ R ₀ A ₁	100	143	195	338	356	IV. 3
S ₀ R ₀ A ₁	100	146	207	323	360	
S ₀ R ₀ A ₁	100	135	203	310	334	
S ₀ R ₀ A ₁	100	141	202	324	350	
media						
S ₀ R ₀ A ₂	100	120	147	180	259	IV. 3
S ₀ R ₀ A ₂	100	124	135	154	210	
S ₀ R ₀ A ₂	100	116	143	161	499	
S ₀ R ₀ A ₂	100	120	142	165	323	
media						
S ₀ R ₁ A ₀	100	113	105	113	98	IV. 4
S ₀ R ₁ A ₀	100	101	109	105	101	
S ₀ R ₁ A ₀	100	116	116	116	113	
S ₀ R ₁ A ₀	100	110	110	111	104	
media						
S ₀ R ₁ A ₁	100	161	203	293	364	IV. 4
S ₀ R ₁ A ₁	100	161	206	309	352	
S ₀ R ₁ A ₁	100	158	221	306	390	
S ₀ R ₁ A ₁	100	160	210	303	369	
media						
S ₀ R ₁ A ₂	100	124	169	180	251	IV. 4
S ₀ R ₁ A ₂	100	116	173	173	237	
S ₀ R ₁ A ₂	100	128	173	173	221	
S ₀ R ₁ A ₂	100	123	172	175	236	
media						

* Los resultados están expresados en ppm.

Cuadro IV.4 RESULTADOS DE CATIONES INTERCAMBIABLES, C.I.C. CONDUCTIVIDAD*

Muestra	Ca ²⁺ meq/100g	Mg ²⁺ meq/100g	Na ¹⁺ meq/100g	K ¹⁺ meq/100g	CIC meq/100g	Conductividad mmhos/cm
S ₀ (V ₀)	10.6	2.8	2.8	2.1	17	0.38
S ₀ (V _f)	Ca ²⁺ meq/100g	Mg ²⁺ meq/100g	Na ¹⁺ meq/100g	K ¹⁺ meq/100g	CIC meq/100g	Conductividad
S ₀ R ₀ A ₀	10	2.8	2.8	2.2	17	0.42
S ₀ R ₀ A ₀	10	2.8	2.8	2.3	17	0.40
S ₀ R ₀ A ₀	10	2.8	2.8	2.3	17	0.44
media	10	2.8	2.8	2.3	17	0.42
S ₀ R ₀ A ₁	15	3.0	2.0	2.2	17	0.99
S ₀ R ₀ A ₁	15	3.0	2.0	2.1	17	1.0
S ₀ R ₀ A ₁	15	3.3	2.0	2.1	17	1.0
media	15	3.0	2.0	2.1	17	1.0
S ₀ R ₀ A ₂	10	2.2	2.0	2.2	17	0.80
S ₀ R ₀ A ₂	10	2.3	2.1	2.2	17	1.07
S ₀ R ₀ A ₂	9	2.3	1.9	2.1	17	1.07
media	9.7	2.3	2.0	2.2	17	0.98
S ₀ R ₁ A ₀	10	2.5	2.7	2.2	17	0.46
S ₀ R ₁ A ₀	10	3.0	2.8	2.3	17	0.40
S ₀ R ₁ A ₀	10	2.9	2.9	2.3	17	0.40
media	10	2.9	2.8	2.3	17	0.42
S ₀ R ₁ A ₁	17.5	3.0	2.0	2.2	18	0.72
S ₀ R ₁ A ₁	17.5	2.8	1.9	2.1	18	0.80
S ₀ R ₁ A ₁	15	2.5	1.9	2.1	18	0.92
media	16.6	2.8	1.9	2.1	18	0.80
S ₀ R ₁ A ₂	10	2.3	2.1	2.2	17	0.58
S ₀ R ₁ A ₂	10	2.8	2.0	2.2	17	0.56
S ₀ R ₁ A ₂	10	2.5	2.0	2.3	17	0.58
media	10	2.5	2.0	2.2	17	0.58

* Suelo cálcico, macetas sin dren.

Quadro IV.5 RESULTADOS DE SODIO,POTASIO SOLUBLES. MATERIA ORGANICA*

Muestra	Na ⁺ meq/100g	K ⁺ meq/100g	%C orgánico	ZM.O. orgán
S ₀ (V ₀)	2.5	0.23	0.19	0.33
S ₀ (VF)	Na ⁺ meq/100g	K ⁺ meq/100g	%C orgánico	ZM.O. orgán
S ₀ R ₀ A ₀	2.5	0.23	0.17	0.29
S ₀ R ₀ A ₀	2.5	0.23	0.17	0.29
S ₀ R ₀ A ₀	2.5	0.21	0.17	0.29
media	2.5	0.22	0.17	0.29
S ₀ R ₀ A ₁	2.8	0.16	0.17	0.29
S ₀ R ₀ A ₁	3.4	0.23	0.17	0.29
S ₀ R ₀ A ₁	3.0	0.21	0.17	0.29
media	3.1	0.20	0.17	0.29
S ₀ R ₀ A ₂	3.4	0.23	0.21	0.37
S ₀ R ₀ A ₂	3.1	0.23	0.21	0.37
S ₀ R ₀ A ₂	3.1	0.21	0.21	0.37
media	3.2	0.22	0.21	0.37
S ₀ R ₁ A ₀	2.5	0.26	0.17	0.29
S ₀ R ₁ A ₀	2.6	0.23	0.17	0.29
S ₀ R ₁ A ₀	2.6	0.17	0.17	0.29
media	2.6	0.22	0.17	0.29
S ₀ R ₁ A ₁	3.8	0.26	0.17	0.29
S ₀ R ₁ A ₁	3.8	0.23	0.17	0.29
S ₀ R ₁ A ₁	3.6	0.21	0.17	0.29
media	3.7	0.23	0.17	0.29
S ₀ R ₁ A ₂	3.3	0.19	0.21	0.37
S ₀ R ₁ A ₂	3.2	0.19	0.21	0.37
S ₀ R ₁ A ₂	3.4	0.21	0.21	0.37
media	3.3	0.20	0.21	0.37

* Suelo cálcico, macetas sin dren

Cuadro IV.6 RESULTADOS DE PH EN SUELO SODICO MACETAS SIN DREN

Muestra	0 días	10 días	20 días	40 días	80 días	No. de figura
S ₁ R ₀ A ₀	10.6	10.5	10.3	10.4	10.5	IV.5
S ₁ R ₀ A ₀	10.6	10.5	10.9	10.4	10.5	
S ₁ R ₀ A ₀	10.6	10.5	10.6	10.5	10.6	
media	10.6	10.5	10.6	10.4	10.5	
S ₁ R ₀ A ₁	10.6	9.6	9.1	9.7	9.5	IV.5
S ₁ R ₀ A ₁	10.6	9.6	9.4	9.6	9.5	
S ₁ R ₀ A ₁	10.6	9.6	9.3	9.7	9.5	
media	10.6	9.6	9.3	9.7	9.5	
S ₁ R ₀ A ₂	10.6	10.2	9.5	9.9	9.9	IV.5
S ₁ R ₀ A ₂	10.6	10.1	9.9	9.9	9.9	
S ₁ R ₀ A ₂	10.6	10.2	9.7	9.9	9.9	
media	10.6	10.2	9.7	9.9	9.9	
S ₁ R ₁ A ₀	10.6	10.6	10.4	10.6	10.6	IV.6
S ₁ R ₁ A ₀	10.6	10.2	10.3	10.5	10.5	
S ₁ R ₁ A ₀	10.6	10.4	10.4	10.6	10.6	
media	10.6	10.4	10.4	10.6	10.6	
S ₁ R ₁ A ₁	10.6	9.6	9.6	9.3	8.6	IV.6
S ₁ R ₁ A ₁	10.6	9.3	9.3	9.4	8.9	
S ₁ R ₁ A ₁	10.6	9.4	9.4	9.4	8.8	
media	10.6	9.4	9.4	9.4	8.8	
S ₁ R ₁ A ₂	10.6	10.1	9.5	9.7	9.3	IV.6
S ₁ R ₁ A ₂	10.6	9.8	9.7	9.7	9.2	
S ₁ R ₁ A ₂	10.6	10.0	9.6	9.7	9.3	
media	10.6	10.0	9.6	9.7	9.3	

Cuadro IV.7 RESULTADOS DE SULFATOS EN SUELO SÓDICO MACETAS SIN DREN*

Muestra	0 días	10 días	20 días	40 días	80 días	No. de figuras
S ₁ R ₀ A ₀	591	486	600	636	561	IV.7
S ₁ R ₀ A ₀	591	486	524	636	486	
S ₁ R ₀ A ₀	591	591	601	561	561	
media	591	521	575	611	536	
S ₁ R ₀ A ₁	591	1050	1050	1236	1980	IV.7
S ₁ R ₀ A ₁	591	675	975	1236	1611	
S ₁ R ₀ A ₁	591	870	1011	1461	2361	
media	591	865	1012	1311	1986	
S ₁ R ₀ A ₂	591	614	675	862	1236	IV.7
S ₁ R ₀ A ₂	591	636	750	862	1425	
S ₁ R ₀ A ₂	591	636	675	862	1386	
media	591	629	700	862	1349	
S ₁ R ₁ A ₀	591	486	600	562	487	IV.8
S ₁ R ₁ A ₀	591	486	561	487	525	
S ₁ R ₁ A ₀	591	581	561	525	412	
media	591	518	574	524	475	
S ₁ R ₁ A ₁	591	1934	2736	2362	2137	IV.8
S ₁ R ₁ A ₁	591	2009	3111	2362	2062	
S ₁ R ₁ A ₁	591	2031	2361	1987	1987	
media	591	1991	2736	2237	2062	
S ₁ R ₁ A ₂	591	636	1499	1612	1662	IV.8
S ₁ R ₁ A ₂	591	561	1462	1612	1612	
S ₁ R ₁ A ₂	591	636	1499	1237	1612	
media	591	611	1487	1487	1629	

* Los resultados están expresados en ppm.

Cuadro IV.8 RESULTADOS DE CATIONES INTERCAMBIABLES, CIC, CONDUCTIVIDAD*

Muestra	Ca ²⁺ meq/100g	Mg ²⁺ meq/100g	Na ¹⁺ meq/100g	K ¹⁺ meq/100g	CICmeq/100g	Conductividad mmhos/cm
S1 (Vo)	5.6	0.66	22.3	2.9	27	2.5
S1 (vF)	Ca ²⁺ meq/100g	Mg ²⁺ meq/100g	Na ¹⁺ meq/100g	K ¹⁺ meq/100g	CICmeq/100g	Conductividad mmhos/cm
S ₁ R ₀ A ₀	5.0	0.66	22.3	2.9	27	2.9
S ₁ R ₀ A ₀	5.0	0.66	21.3	2.5	27	2.9
S ₁ R ₀ A ₀	5.0	0.66	21.6	3.3	27	2.9
media	5.0	0.66	21.7	2.9	27	2.9
S ₁ R ₀ A ₁	7.5	0.83	20.4	2.9	27	4.47
S ₁ R ₀ A ₁	10	0.83	19.4	2.9	27	3.97
S ₁ R ₀ A ₁	7.5	0.83	19.2	3.3	27	4.67
media	8.3	0.83	19.7	3.0	27	4.97
S ₁ R ₀ A ₂	5	0.83	20.4	3.2	27	3.88
S ₁ R ₀ A ₂	5	0.66	20.8	3.2	28	2.35
S ₁ R ₀ A ₂	7	0.83	20.2	3.2	28	2.60
media	5.7	0.77	20.5	3.2	28	2.90
S ₁ R ₁ A ₀	5	0.83	21.7	2.7	27	2.48
S ₁ R ₁ A ₀	5	0.66	21.7	2.9	27	2.79
S ₁ R ₁ A ₀	5	0.66	20.0	3.0	27	2.48
media	5	0.72	22.1	2.9	27	2.6
S ₁ R ₁ A ₁	10	0.83	20.4	3.2	27	4.65
S ₁ R ₁ A ₁	10	0.83	20.4	3.2	27	4.68
S ₁ R ₁ A ₁	10	1.0	20.2	3.3	27	4.70
media	10	0.89	20.3	3.2	27	4.6
S ₁ R ₁ A ₂	10	0.66	19.8	3.2	27	5.26
S ₁ R ₁ A ₂	10	0.66	20.8	3.2	27	3.80
S ₁ R ₁ A ₂	10	0.66	20.3	3.2	27	5.36
media	10	0.66	20.3	3.2	27	4.8

* Suelo sódico, macetas sin dren

Cuadro IV.9 RESULTADOS DE SODIO, POTASIO SOLUBLES, MATERIA ORGANICA *

Muestra	Na ⁺ meq/100g	K ⁺ meq/100g	ZC orgánico	ZM.O orgán.
Si (Vo)	17.2	0.16	0.31	0.53
Si (Vf)	Na ⁺ meq/100g	K ⁺ meq/100g	ZC orgánico	ZM.O orgán.
S ₁ R ₀ A ₀	16.7	0.19	0.31	0.53
S ₁ R ₀ A ₀	16.7	0.19	0.31	0.53
S ₁ R ₀ A ₀	16.5	0.13	0.31	0.53
media	16.6	0.17	0.31	0.53
S ₁ R ₀ A ₁	20.3	0.16	0.31	0.53
S ₁ R ₀ A ₁	19.6	0.16	0.31	0.53
S ₁ R ₀ A ₁	20.2	0.16	0.31	0.53
media	20.0	0.16	0.31	0.53
S ₁ R ₀ A ₂	18.2	0.16	0.34	0.59
S ₁ R ₀ A ₂	18.9	0.16	0.34	0.59
S ₁ R ₀ A ₂	19.2	0.16	0.34	0.59
media	18.8	0.16	0.34	0.59
S ₁ R ₁ A ₀	14.8	0.16	0.26	0.44
S ₁ R ₁ A ₀	15.8	0.08	0.26	0.44
S ₁ R ₁ A ₀	14.2	0.06	0.26	0.44
media	14.9	0.10	0.26	0.44
S ₁ R ₁ A ₁	18.9	0.19	0.31	0.53
S ₁ R ₁ A ₁	18.6	0.19	0.31	0.53
S ₁ R ₁ A ₁	19.1	0.16	0.31	0.53
media	18.9	0.18	0.31	0.53
S ₁ R ₁ A ₂	20.0	0.23	0.34	0.59
S ₁ R ₁ A ₂	19.0	0.05	0.34	0.59
S ₁ R ₁ A ₂	20.2	0.07	0.34	0.59
media	19.7	0.12	0.34	0.59

* Suelo sódico, macetas sin dren.

Cuadro IV.10 RESULTADOS DE PH EN SUELO SODICO MACETAS CON DREN

Muestra	0 días	10 días	20 días	40 días	80 días	No. de figura
S ₁ R ₀ A ₀	10.6	10.6	10.6	10.4	10.4	IV.9
S ₁ R ₀ A ₁	10.6	9.9	10.0	9.8	9.5	
S ₁ R ₀ A ₂	10.6	10.2	9.9	9.8	9.0	
S ₁ R ₁ A ₀	10.6	10.6	10.6	10.5	10.4	IV.10
S ₁ R ₁ A ₁	10.6	9.9	9.4	9.4	9.2	
S ₁ R ₁ A ₂	10.6	9.0	8.7	8.5	8.5	

Cuadro IV.11 RESULTADOS DE SULFATOS EN SUELO SODICO MACETAS CON DREN *

Muestra	0 días	10 días	20 días	40 días	80 días	No. de figura
S ₁ R ₀ A ₀	591	486	411	411	411	IV.11
S ₁ R ₀ A ₁	591	1611	1611	1611	2361	
S ₁ R ₀ A ₂	591	1311	1799	3111	4986	
S ₁ R ₁ A ₀	591	411	486	336	336	IV.12
S ₁ R ₁ A ₁	591	1311	1311	1236	1611	
S ₁ R ₁ A ₂	591	1386	1574	1611	2361	

* Los resultados están expresados en ppm.

Cuadro IV.12 RESULTADOS DE CATIONES INTERCAMBIABLES, CIC, CONDUCTIVIDAD*

Muestra	Ca ⁺⁺ meq/100g	Mg ⁺⁺ meq/100g	Na ⁺ meq/100g	K ⁺ meq/100g	CICmeq/100g	Conductividad mmhos/cm
Si (Vo)	5.6	0.66	22.3	2.9	27	2.5
Sí (VF)	Ca ⁺⁺ meq/100g	Mg ⁺⁺ meq/100g	Na ⁺ meq/100g	K ⁺ meq/100g	CICmeq/100g	Conductividad mmhos/cm
S ₁ R ₀ A ₀	5	0.66	24.6	2.9	27	2.7
S ₁ R ₀ A ₁	7.5	0.66	18.9	3.2	26	4.9
S ₁ R ₀ A ₂	5	0.66	17	3.2	27	4.7
S ₁ R ₁ A ₀	5	0.66	22.3	3.2	27	1.8
S ₁ R ₁ A ₁	10	0.66	17	3.2	27	1.7
S ₁ R ₁ A ₂	10	0.66	14.5	3.2	27	1.5

* Suelo sódico, macetas con dren.

Cuadro IV.13 RESULTADOS DE SODIO Y POTASIO SOLUBLES, MATERIA ORGANICA*

Nuestra	Na ⁺ meq/100g	K ⁺ meq/100g	ZC orgánico	ZMO orgán.
Si (Vo)	17.2	0.16	0.31	0.53
Si (Vf)	Na ⁺ meq/100g	K ⁺ meq/100g	ZC orgánico	ZMO orgán.
S ₁ R ₀ A ₀	16.8	0.18	0.35	0.60
S ₁ R ₀ A ₁	19.7	0.11	0.39	0.66
S ₁ R ₀ A ₂	22.1	0.11	0.44	0.75
S ₁ R ₁ A ₀	14.4	0.05	0.35	0.60
S ₁ R ₁ A ₁	12.1	0.11	0.39	0.68
S ₁ R ₁ A ₂	11.1	0.08	0.48	0.83

* Suelo sódico, macetas con dren.

Cuadro IV.14 INCREMENTOS EN LOS PARAMETROS FISICOQUIMICOS DEL INICIO AL FINAL DEL EXPERIMENTO											
Muestra	Δ pH	Δ SO ₄	Δ Ca ⁺⁺ (i)	Δ Nu ⁺ (i)	Δ K ⁺ (i)	Δ Na ⁺ (s)	Δ K ⁺ (s)	Δ C.E.	Δ Mg ⁺⁺ (i)	Δ M.O.	
S ₀ R ₀ A ₀	- 0.1	+ 14	+ 0.6	0	0.2	0	0	+0.04	0	- 0.04	
S ₀ R ₀ A ₁	- 0.8	+ 250	+ 5	- 0.8	0	0.6	- 0.3	+ 0.62	+ 0.2	- 0.4	
S ₀ R ₀ A ₂	- 0.6	+ 123	+ 0.9	- 0.8	0.1	0.7	- 0.1	+ 0.60	- 0.5	+ 0.4	
S ₀ R ₁ A ₀	0	+ 4	+ 0.6	0	0.2	0.1	- 0.1	+ 0.04	+ 0.1	- 0.04	
S ₀ R ₁ A ₁	- 0.9	+ 269	+ 6	- 0.9	0	1.2	0	+ 0.43	0	- 0.04	
S ₀ R ₁ A ₂	- 0.6	+ 136	+ 0.6	- 0.8	+ 0.1	+ 0.8	- 0.3	+ 0.19	- 0.3	- 0.04	
S ₁ R ₀ A ₀	- 0.1	-55	-0.6	- 0.6	0	- 0.6	+0.01	+0.4	0	0	
S ₁ R ₀ A ₁	- 1.1	+1393	+2.7	- 2.6	+ 0.1	+ 2.8	0	+ 1.9	+ 0.17	0	
S ₁ R ₀ A ₂	- 0.7	+758	+0.1	- 1.8	+ 0.3	+ 1.6	0	+ 0.4	+ 0.1	0.06	
S ₁ R ₁ A ₀	0	-116	- 0.6	- 0.2	0	- 2.3	- 0.6	+ 0.1	+ 0.11	- 0.09	
S ₁ R ₁ A ₁	- 1.8	+1471	+ 4.4	- 2	+ 0.3	+ 1.7	+ 0.02	+ 2.1	+ 0.23	0	
S ₁ R ₁ A ₂	- 1.3	+1038	+4.4	- 2	+ 0.3	+ 2.5	- 0.04	+ 2.3	0	+ 0.06	
S ₁ R ₀ A ₀ *	- 0.2	-180	-0.6	+ 2.1	0	- 0.4	+ 0.02	+ 0.2	0	+ 0.07	
S ₁ R ₀ A ₁	- 1.1	+1770	+ 1.9	- 3.4	+ 0.3	+ 2.5	- 0.05	+ 2.4	0	+ 0.13	
S ₁ R ₀ A ₂	- 1.6	+4395	-0.6	- 5.3	+ 0.3	+ 4.9	- 0.05	+ 2.2	0	+ 0.22	
S ₁ R ₀ A ₀ *	- 0.2	+255	- 0.6	0	+ 0.3	- 2.8	- 0.13	- 0.7	0	+ 0.07	
S ₁ R ₀ A ₁	- 1.4	+1020	+ 4.4	- 5.3	+ 0.3	- 5.1	- 0.05	- 0.8	0	+ 0.15	
S ₁ R ₀ A ₂	- 2.1	+1770	+4.4	- 7.8	+ 0.3	- 6.1	- 0.08	- 1.0	0	+ 0.3	

Δ = Valor final - valor inicial

* Macetas con dren.

Figura: IV.1 SUELO CALCICO, RIEGO NORMAL, SIN DRENAJE .

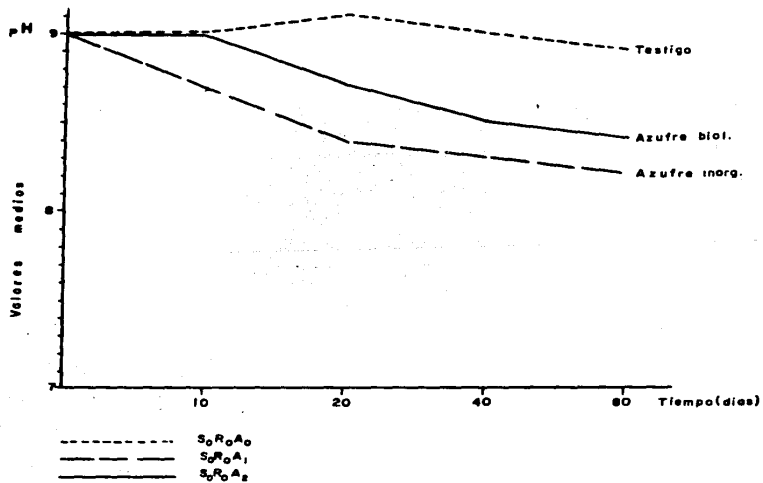


Figura: IV.2 SUELO CALCICO , RIEGO EXCESIVO , SIN DRENAJE

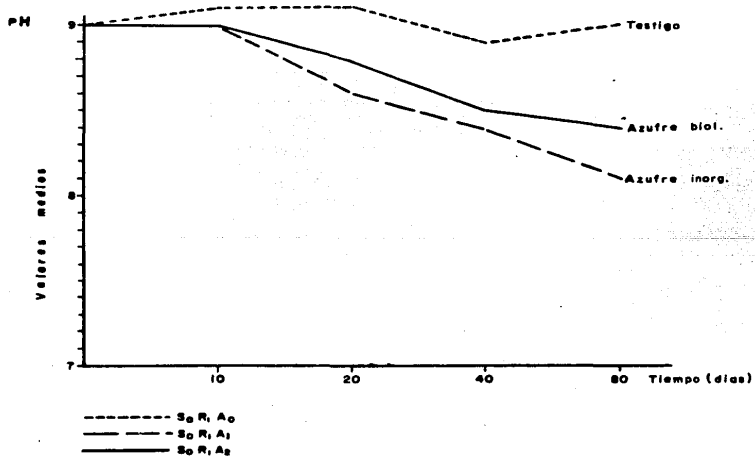


Figura: IV.3 SUELO CALCICO RIEGO NORMAL SIN DRENAJE

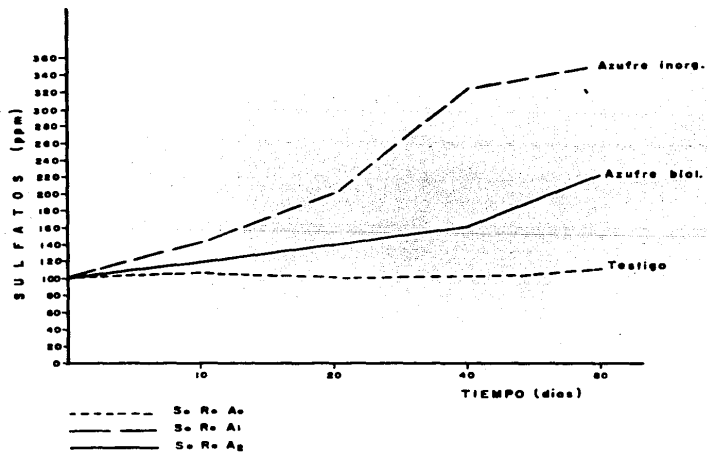


Figura IV.4 SUELO CALCICO RIEGO EXCESIVO SIN DRENAJE

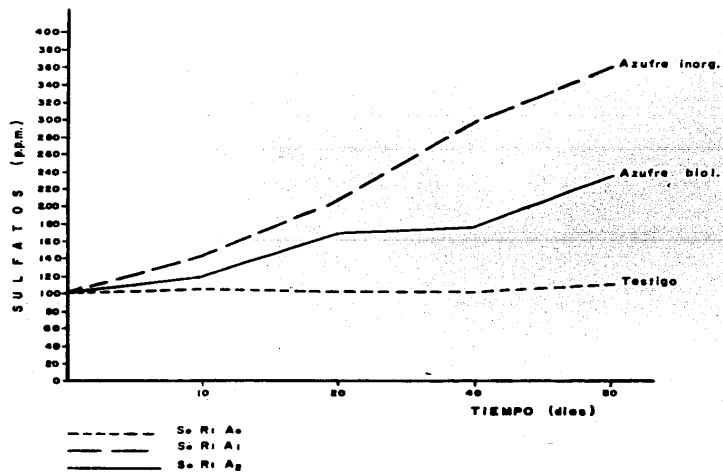


Figura: IV.5 SUELO SODICO, RIEGO NORMAL, SIN DRENAJE

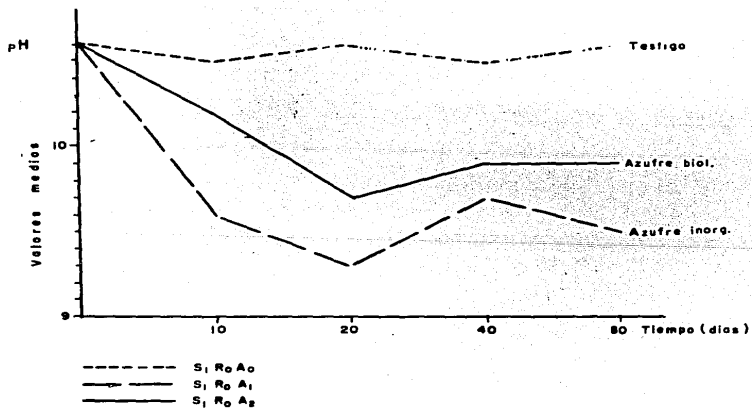


Figura IV.6 SUELO SODICO, RIEGO EXCESIVO, SIN DRENAJE.

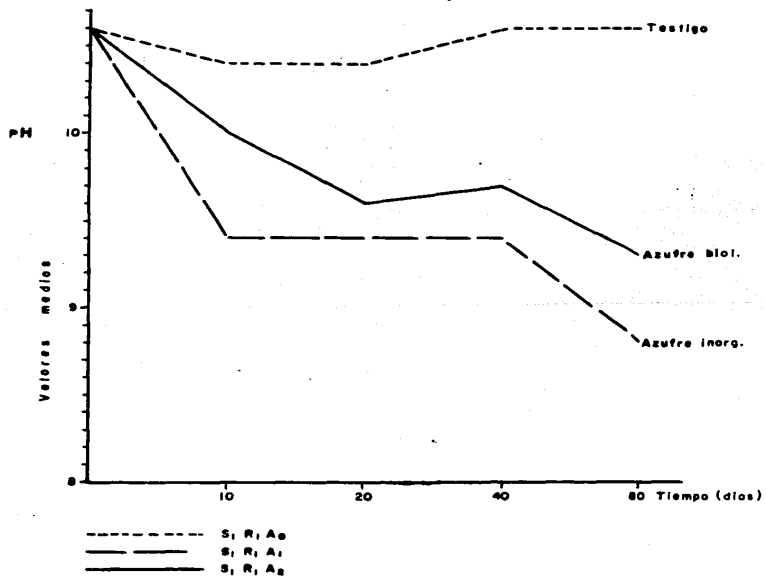


Figura : IV.7 SUELO SODICO RIEGO NORMAL SIN DRENAJE

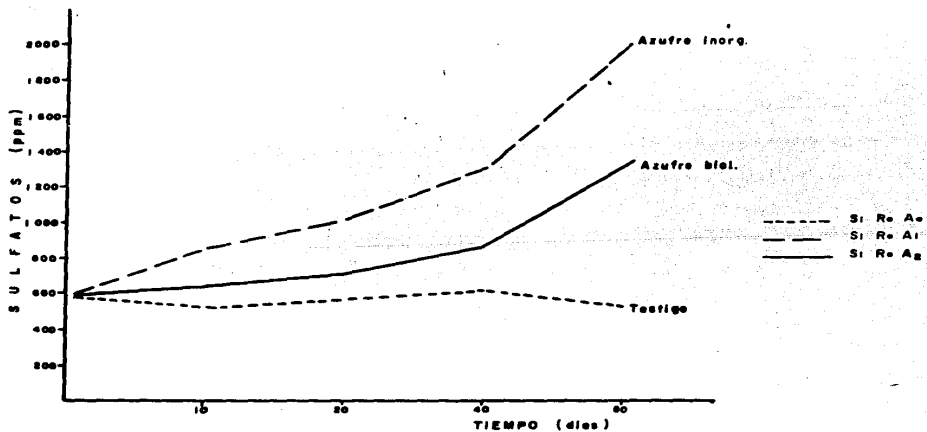


Figura: IV.8 SUELO SODICO RIEGO EXCESIVO SIN DRENAJE

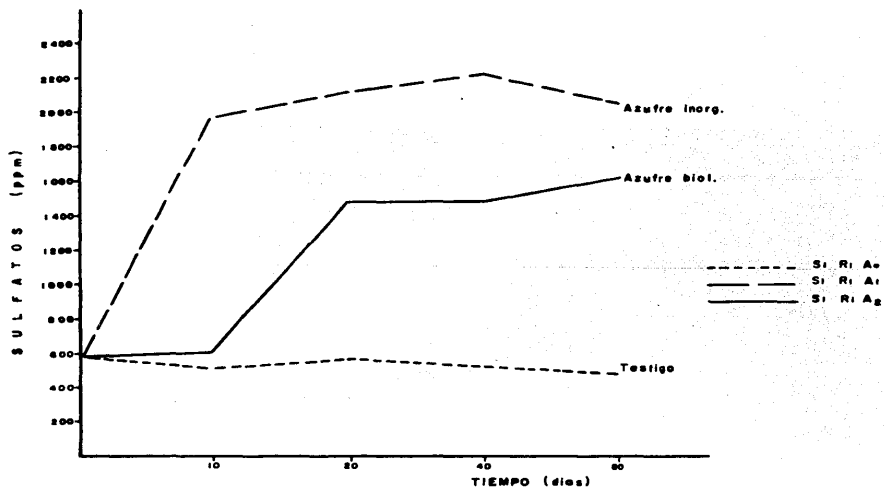


Figura: IV.9 SUELO SODICO, RIEGO NORMAL, CON DRENAJE

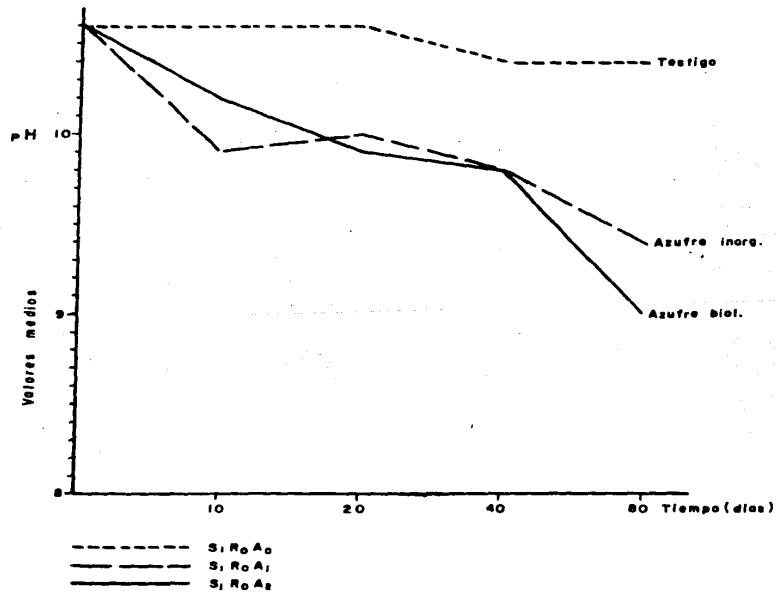


Figura: IV.10 SUELO SODICO, RIEGO EXCESIVO, CON DRENAJE .

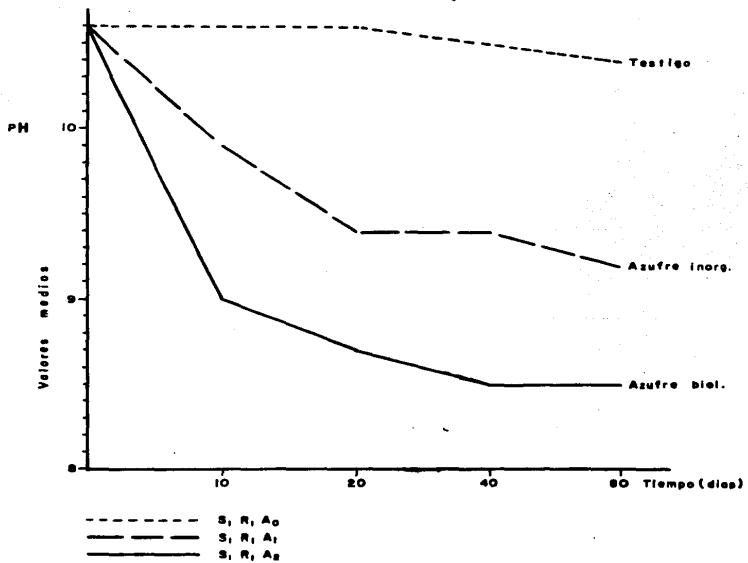


Figura: IV.11 SUELO SODICO RIEGO NORMAL CON DRENAJE

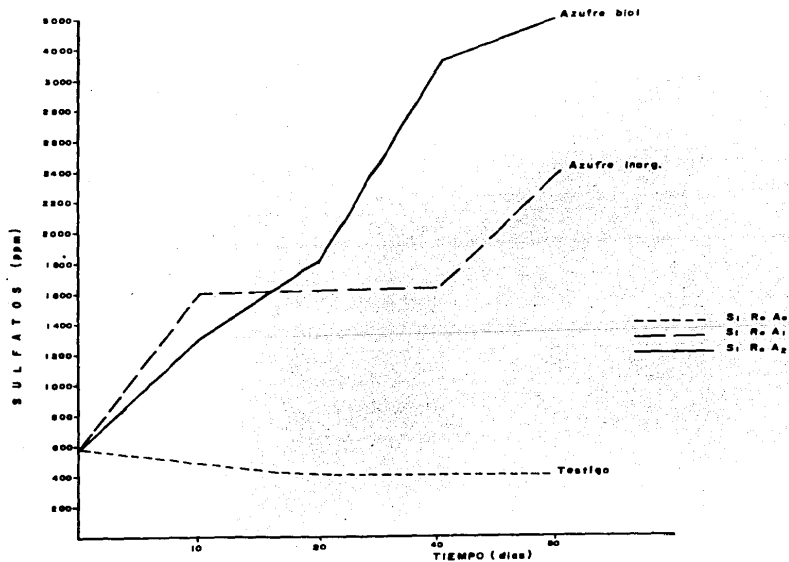


Figura: IV.12 SUELO SODICO RIEGO EXCESIVO CON DRENAJE

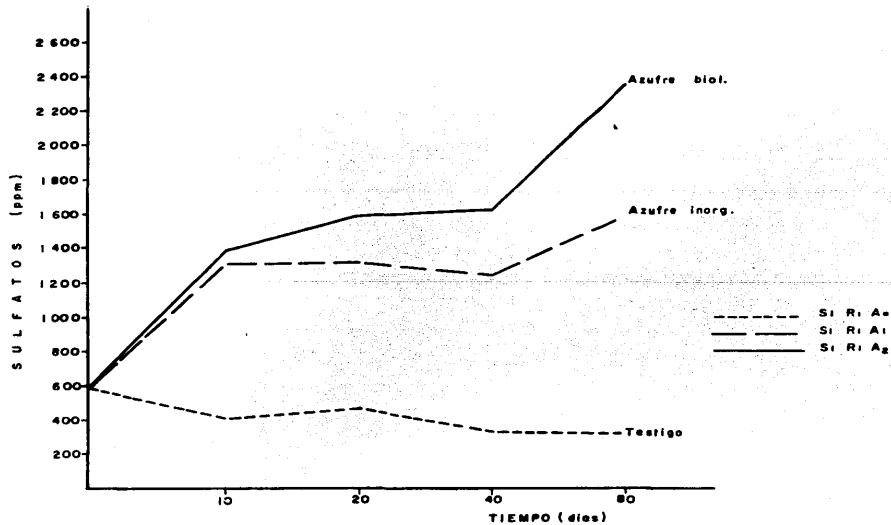


Figura IV.13 CAMBIOS DEL CALCIO INTERCAMBIABLE SUELO CALCICO, MACETAS SIN DREN

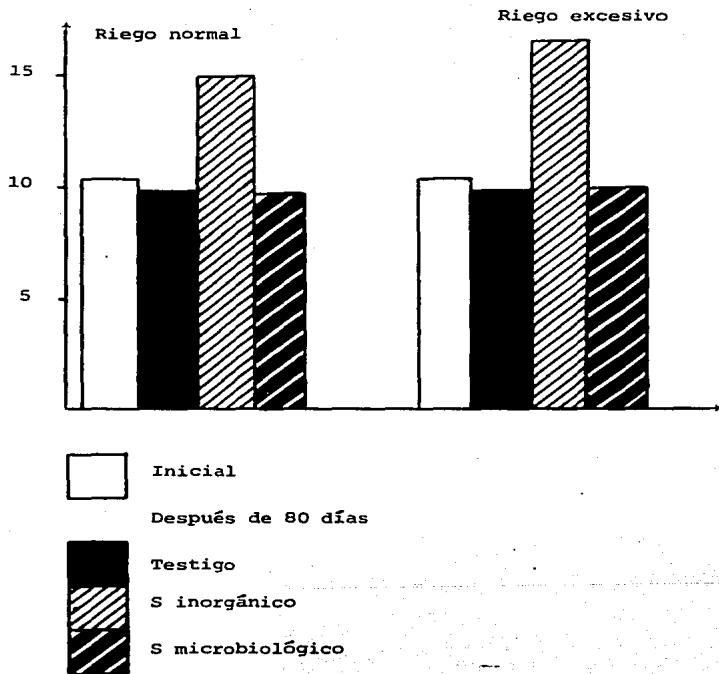


Figura IV.14 CAMBIOS DEL SODIO INTERCAMBIABLE EN SUELO CALCICO, MECETAS SIN DREN

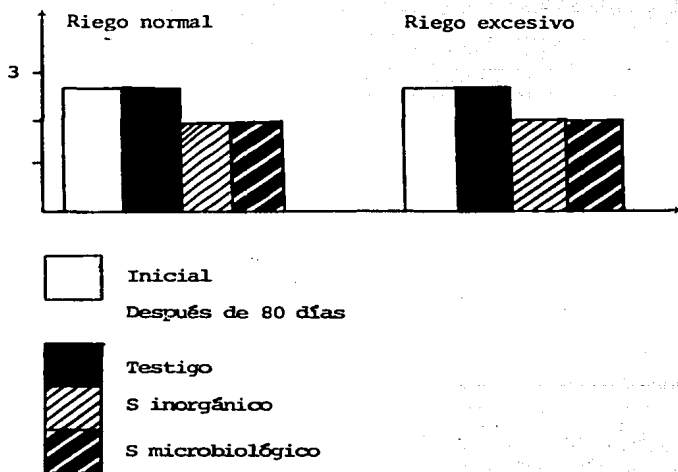


Figura IV.15 CAMBIOS DEL CALCIO INTERCAMBIABLE EN SUELO SODICO

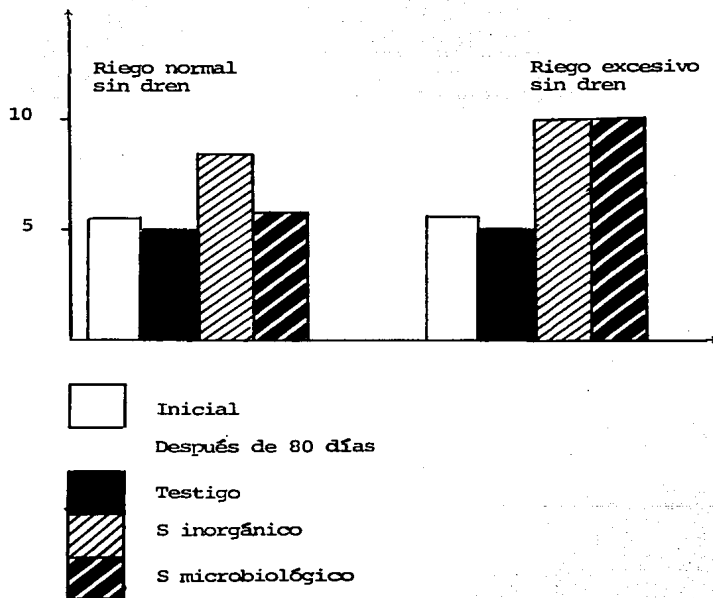


Figura IV.16 CAMBIOS DEL SODIO INTERCAMBIABLE EN SUELO SODICO, MACETAS SIN DREN

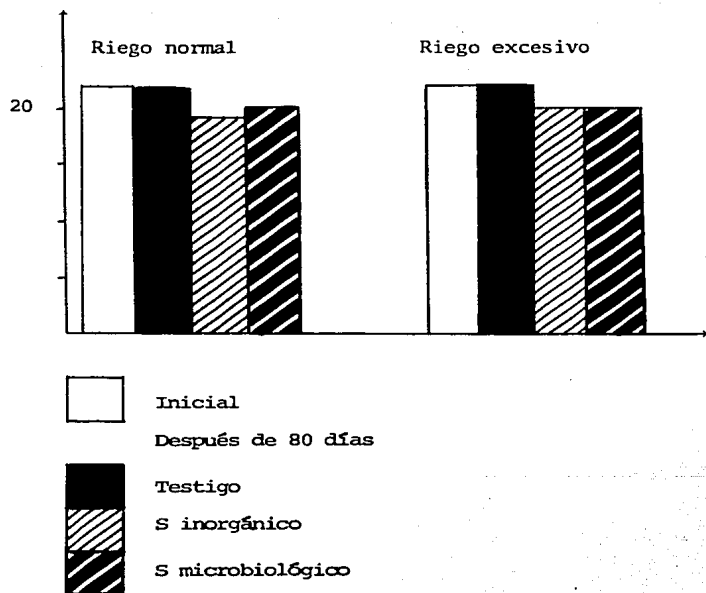


Figura IV.17 CAMBIOS DEL CALCIO INTERCAMBIABLE EN SUELO SODICO, MACETAS CON DREN

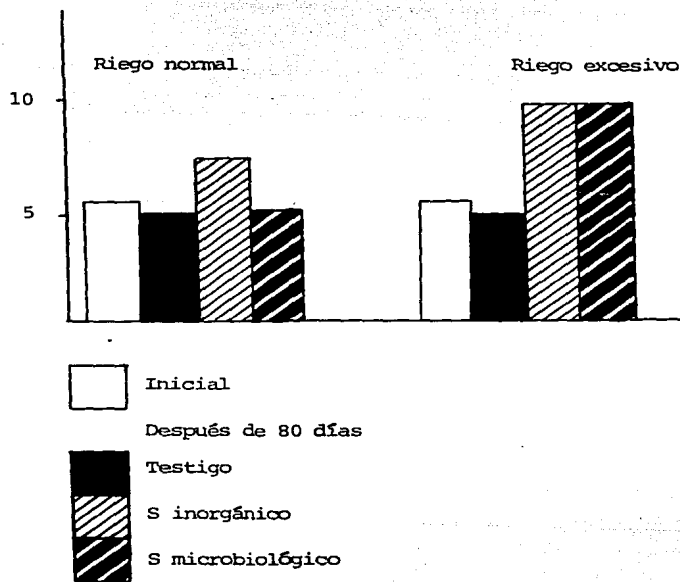
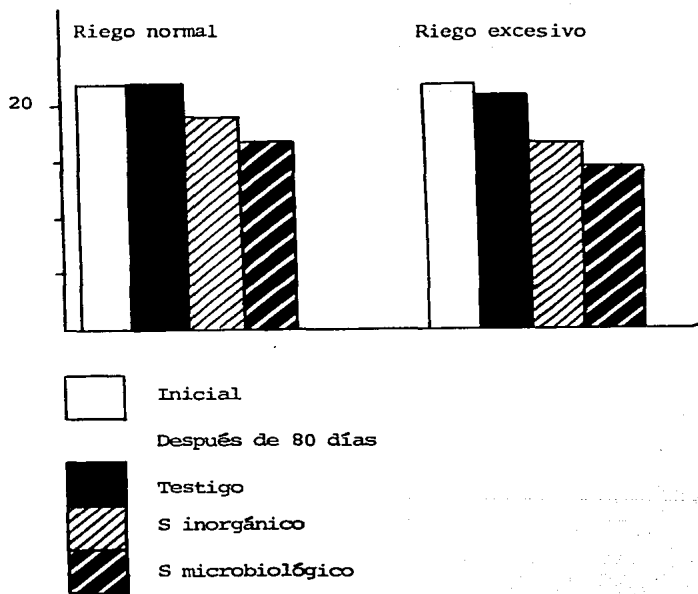


Figura IV.18 CAMBIOS DEL SODIO INTERCAMBIABLE EN SUELO SODICO, MACETAS CON DREN:



C A P I T U L O V

BIBLIOGRAFIA

- 1) Avila T.F. (1983) Recopilación de métodos y medios de cultivo para el aislamiento y determinación de la actividad bioquímica de los microorganismos del ciclo del azufre. México. Tesis UNAM.
- 2) Atkins P.W. (1985) *Fisicoquímica*. Fondo Educativo Interamericano. México, D.F.
- 3) Bajpai P.D. y Gupta B.R. (1979). Effect of salinity and alkalinity of soil on some important microbial activities. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 27 (2): 197-198.
- 4) Baldensperger J. (1976). Use of respirometry to evaluate sulphur oxidation in Soil. *Soil Biol. Biochem.* 8 (5): 423-427
- 5) Bardiya M.C; Neeru N.y Vyas S.R. (1973). Relamation of saline alkali soil by application of sulphur and inoculation of Thiobacillus. Effect on physico-chemical properties of soil. *Journal Res. Haryana Agric. Univ.* 2 (3): 218-221.
- 6) Bardsley C.E. y Lancaster J.D. (1960). Determination of reserve sulfur and solubles sulfates in soils. *Soil Sci. Soc. Proc.* 24: 265-268.

- 7) Bear F.E. (1965). *Chemistry of the soil*, 2a. edición American Chemical Society Monograph Series. Reinhold Publishing Corporation, U.S.A.
- 8) Black C.A., Evans D.D., White J.L., Ensminger L.E. y Clark F.E. (1965). *Methods of soil analysis. Part 1 Physical and Mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling.* Am. Soc. of Agronomy. Inc. Publisher. Madison Wisconsin U.S.A.
- 9) Black C.A. et.al. (1965). *Methods of soil analysis Part 2. Chemical and microbiological properties.* Am. Soc. of agronomy. Inc. Publisher. Madison, Wisconsin U.S.A.
- 10) Bollen B.W. (1977). Sulphur oxidation and respiration in 54-year-old soil samples. *Soil. Biol. Biochem* 9: 405-410
- 11) Bolt G.H.; Bruggenwert M.G. (1978). *Soil chemistry A. Basic elements*, 2a. edición. Elsevier scientific publishing company. Impreso en Netherlands, Amsterdam.
- 12) Bornemisza. E. (1982). *Introducción a la química de suelos.* Monografía No. 25. Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos. (O.E.A), Washington, D.C.
- 13) Brock, D.T. (1978). *Biología de los microorganismos.* 2a. edición. Ed Omega. Barcelona, España.
- 14) Carroll D. (1959). "Ion exchange in clays and other minerals". *Bulletins of the Geological Society of America*, 70: 749-780.
- 15) Chapman, H.D. (1973). *Diagnostic criteria for plants and Soil.* 2a. edición, U.S.A.
- 16) Chesnien L.y Yien C.H. (1950). Turbidimetric Determination of available sulfate. *Soil Sc. Soc.Proc.* 15: 149-151.
- 17) Ensminger L.E. (1954). Some factors affecting the adsorption of sulfate by Alabama soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 18: 259-263.
- 18) Fasbender W. Hans. (1986) *Química de Suelos.* 1a. ed. 5a. reimpression - San José (Serie de libros y materiales educativos/II C.A. No. 24) Costa Rica, 398 p.
- 19) Flaska, H.A., Barnard A.J. y Sturrock P.E. (1982). *Química Analítica Cuantitativa.* Vol. 1 CECSA, México, D.F. 634 p.

- 20) Gaxiola V.J. (1980) "Proyecto de recuperación de suelos salino-sódicos en el Distrito de Nayarit, mediante aplicación de mejoradores químicos y lavados". Tesis Facultad de Química UNAM México, D.F. 61 p.
- 21) Gutiérrez R.M. (1982). "Estudio del contenido de iones inorgánicos y sus interacciones en suelos y plantas en los distritos de riego 03 y 88". Tesis (Maestría en Química) UNAM.
- 22) Hesse P.R. (1971). *A Textbook of soil chemical analysis*. Printed in Great Britain by William Clowes and Sons Limited. London, Beccles and Colchester. 377 p.
- 23) Jackson M.L. (1982). *Análisis químicos de suelos*. Omega, Barcelona. 4a. ed. 373 p.
- 24) Jadhav W. (1978). Amelioration of saline - sodic soil with *Thiobacillus* J. Indian Soc. Soil. Sci. 26 (2): 228-9.
- 25) Kamprath E.J.; Nelson W.L.; Fitts J.W. (1956). The effect of pH, sulfate and phosphate concentration on the adsorption of sulfate by soils. *Soil Sci. Soc. Am., Proc.* 20: 463-466.
- 26) Kilmer V.J. y Nearypass D.C. (1960).. The determination of available sulfur in soil. *Soil Sc. Soc. Am. Proc* 24: 337-349.
- 27) McC. ready R.G. y Krouse H.R. (1982). Sulfur isotope fractionation during the oxidation of elemental sulfur by *Thiobacillus* in a Solonchalc Soil. *Canadian Journal Soil Sci.* 62 (1). 105-110.
- 28) Morvedt J.J. y Giordano P.M. (1983). *Micronutrientes en Agricultura*. A.G.T. Editor, S.A. 1a. ed. en español. México, D.F.
- 29) Nor Y. M. y Tabatabai M.A. (1977). Oxidation of elemental sulfur in soil. *Soil Sc. Soc. Am. Journal.* 41 (4): 736-741.
- 30) Ortiz H.L. (1986). "Manual de técnicas y procedimientos para análisis físicos y químicos del suelo". Tesis. UAEM, Morelos, México.
- 31) Perking Elmer. *Analytical methods for atomic absorption*. U.S.A. (1977).

- 32) Richards, Editor. (1973). *Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos*. 6a. ed., editorial. Limusa. México.
- 33) Rodríguez A.I. (1982). "Importancia de microorganismos del ciclo del azufre en el suelo y su posible aplicación en la recuperación de suelos salinos". Tesis, UNAM, México, D.F.
- 34) Rupela O.P. y Tauro P. (1973 a). Utilization of *Thiobacillus* to reclaim alkali soils. *Soil Biol. Biochem.* 5: 899-901.
- 35) Rupela O.P. y Tauro P. (1973 b). Isolation and characterization of *Thiobacillus* from alkali soil. *Soil Biol. Biochem.* 5: 891-897.
- 36) Tabatabai M.A. y Bremner J.M. (1970). An alkaline oxidation method for determination of total sulphur soils. *Soil Sc. Am. Proc.* 34: 62-65.
- 37) Tabatabai M.A. y Bremner J.M. (1970). Comparison of some methods for determination of total sulfur in soils. *Soil Sc. Soc. Am. Proc.* 34: 417-420.
- 38) Tonchéz J.P. (1981). "Comparación de métodos para la recuperación de suelos con problemas de salinidad". TESIS, UNAM, 179 p.
- 39) Varian (1979). *Analytical methods for flame spectroscopy*. Varian Techtron, Sfrinsvale. Australia.
- 40) Vogel A.I. (1978). *Vogel's textbook of quantitative inorganic analysis, including elementary instrumental analysis*. Logman group, Londres.
- 41) Wainwright M. (1979). Microbial S-oxidation in soils exposed to heavy atmospheric pollution. *Soil Biol. Biochem.* 11 (2): 95-98.
- 42) Watty B.M. (1982). *Química analítica*. 1a. ed. alhambra, México, 671 p.

A P E N D I C E

**Principios y descripción de las técnicas analíticas
utilizadas.**

Color del suelo

- El color del suelo está relacionado a su contenido mineral y de materia orgánica, clima y efecto de drenaje. Por lo que esta propiedad es utilizada como una determinación cualitativa, para la clasificación rutinaria de un suelo.

El humus y los compuestos de hierro recubren las partículas del suelo y determinan su color. Cuando el material orgánico sufre acción microbiana y se convierte en humus, estos materiales quedan finamente divididos y son de color negro. Los compuestos de hierro aparecen como revestimientos de minerales en la superficie de las partículas, por fenómenos de intemperismo, estos compuestos: como el óxido férrico (FeO_3) de color rojo, el óxido férrico hidratado ($FeO.XH_2O$) pardo amarillento y el óxido ferroso (FeO) gris azulado, son liberados de algunos minerales.

Los colores grisáceos y negros predominan en climas fríos y en suelos muy húmedos, donde el elemento se encuentra como $Fe(II)$, mientras que en suelos de clima cálido, se presenta en su estado de oxidación (III) y debido a esto los suelos adquieren coloreados rojos y pardo-amarillentos.

El color del suelo se determina comparando los colores que aparecen en la tabla de Munseel con una pequeña porción de suelo. Esta carta de colores se basa en 3 variables simples que son:

El matiz.- Indica la relación del color con el rojo, amarillo, verde, azul y violeta; esto es, la longitud y frecuencia de las ondas luminosas que lo forman.

La saturación.- Indica la luminosidad

El brillo.- Es la fuerza del color y está íntimamente ligado con el total de energía transmitida por las ondas luminosas.

Densidad del suelo

- La densidad del suelo se mide generalmente por medio de dos parámetros, conocidos como: "densidad real" y "densidad aparente". La primera se refiere a la relación entre la masa y el volúmen del suelo sin considerar los espacios porosos, la masa del suelo es determinada directamente pesando y el volúmen es calculado indirectamente, midiendo la masa y la densidad de un fluido desplazado por la muestra.

El dato de densidad real se emplea para determinar velocidades de sedimentación o cálculos relacionados con el movimiento del suelo debido al viento y al agua.

La densidad aparente es la relación entre la masa del suelo secado al aire y el volúmen aparente, esto es, él de las partículas del suelo más los espacios porosos. Este dato se emplea para calcular porosidad; cuando se conoce la densidad real de la partícula, para convertir porcentajes de agua de peso a volúmen de grandes extensiones de suelo, así como en la clasificación de suelos es un dato muy valioso, se emplea para la determinación de: 1) capas endurecidas (densidades mayores de 2g/cm^3), que comúnmente están relacionados con problemas de fertilización de fósforo y el encalado: y 3) grado de

intemperismo, al comparar densidades de horizontes superficiales como el horizonte C. la densidad aparente es una cantidad variable para un suelo, cambia con las condiciones estructurales, particularmente con las relacionadas al tipo de empaque; por esa razón, es a menudo utilizada como una medida de la estructura del suelo.

La densidad fué determinada por el método del picnómetro (Ortiz, 1986, p. 23). Densidad aparente (op. cit. 1986, p. 24).

Determinación de pH por el Método Electrométrico

El pH del suelo se determinó por el método electrométrico. En este método se usa un electrodo de vidrio, el cual forma parte de un circuito que contiene un electrodo de referencia como es el de calomel con un potencial constante, el electrodo de vidrio es el de medida y se establece una diferencia de potencial entre ellos, usando este sistema, se mide el potencial observado en la solución problema, después de haber calibrado el aparato con una solución buffer.

a) Material

- Frascos de vidrio de boca ancha de 100 ml
- Aparato Conductronic pH 20
- Pañuelos desechables
- Pizetas
- Balanza

b) Reactivos

- soluciones buffer de pH 7, 9 y 10

c) Procedimiento

- Pesar 10 g de suelo en frascos de vidrio, se agrega 50 ml de agua destilada (dil 1:5)* se agita y se mide el pH, como se indica en el instructivo del equipo.

* En esta dilución se midió la conductividad de las muestras iniciales y finales.

Fundamento de la determinación de capacidad de intercambio catiónico y bases intercambiables.

Principio.- El método para determinar la capacidad de intercambio catiónico (C.I.C.), y bases intercambiables está basado en la saturación de las posiciones de intercambio del suelo con un catión seleccionado, y realizando métodos adecuados para desplazar a éste ión y cuantificarlo posteriormente.

El extracto obtenido durante el proceso de saturación contiene las bases intercambiables desplazadas y un exceso del ión utilizado, donde se puede realizar la cuantificación de éstas bases.

En el presente experimento se seleccionaron dos diferentes cationes; sodio y amonio para el proceso de saturación, con base a lo recomendado por la literatura y experiencia se vio que son los más adecuados de utilizar para el proceso de saturación.

Las soluciones saturantes utilizadas en el experimento fueron acetato de amonio 1M, pH 7.0, y acetato de sodio 1M, pH 8.2 las cuales presentan las siguientes características:

Acetato de amonio 1M, pH 7.- Esta solución se utilizó en la determinación de sodio y potasio intercambiable, debido a que el ión amonio es un ión que generalmente esta ausente de las posiciones de intercambio, tiene gran capacidad de saturación, es fácilmente eliminado por volatilización durante el análisis y no interfiere en las determinaciones espectrofométricas de los iones metálicos aunque presenta entre otras desventajas:

La de solubilizar parte de los carbonatos de calcio y magnesio que se presentan en los suelos sobre todo en suelos calcáreos. Los iones calcio evitan que los iones amonio saturen por completo las posiciones de intercambio, dando valores bajos de C.I.C. y aumentan el total de bases intercambiables.

El pH neutro de esta solución es debido a que es el punto neutral del agua, y puede representar aproximadamente al sistema amortiguador bicarbonato-ácido carbónico en el suelo a la presión del CO_2 , que prevalece en un suelo fértil durante el periodo de crecimiento de cosechas.

Solución de acetato de sodio 1M, pH 8.2.- Esta solución se utilizó para extraer calcio y magnesio intercambiables y para determinar C.I.C. mediante la cuantificación de sodio en

un espectrofotómetro de flama.

El pH de 8.2 se toma debido a que es el más cercano al pH de equilibrio entre el carbonato de calcio y el suelo (Black, 1964, p. 892).

Método de extracción de sodio y potasio intercambiable utilizando acetato de amonio (Black, 1964, p. 108). (Richard, L.A, 1965 p. 108).

a) Material y equipo

- Centrífuga
- Tubos de centrífuga
- Agitadores de vidrio
- Matraces volumétricos de 100 ml y 10 ml
- Espectrofotómetro Corning 400

b) Reactivos

- Solución de etanol al 80v/v
- Solución de acetato de amonio 1M, pH 7. Añadir 114 ml de ácido acético glacial (88.5%), a 900 ml de agua destilada, adicionar 138 ml de hidróxido de amonio concentrado y el agua destilada que haga falta para obtener un volumen aproximado de 1980 ml medir

el pH de la solución y si es necesario añadir más hidróxido de amonio o ácido acético para que se tenga un pH de 7 aforar a un volumen de 2l con agua destilada.

c) Procedimiento

- Pesar 1g de suelo de cada muestra a determinar
- Añadir 8 ml de etanol al 80%
- Agitar por 2 min en forma mecánica con agitador de vidrio
- centrifugar aproximadamente 5 mins hasta que el sobrenadante quede claro
- Repetir la misma operación (centrifugar, decantar y guardar)*.
- Medir la conductividad de los últimos extractos de etanol hasta llegar a una conductividad menor a 40 micromhos/cm
- Añadir 6 ml de acetato de amonio 1M, pH 7
- Agitar por 2 mins en forma mecánica
- Centrifugar aproximadamente 5 minutos hasta que el sobrenadante quede claro

* En estos extractos se determinó sodio y potasio solubles.

- Repetir la misma operación centrifugar por 3 veces más con la misma cantidad de acetato de amonio, coleccionar los sobrenadantes; y en estos se cuantifican sodio y potasio intercambiable por espectrofotometría de flama.

Método de extracción de calcio y magnesio intercambiables con acetato de sodio 1M, pH 8.2 y C.I.C. con acetato de amonio 1M pH 7

a) Equipo y material

- Centrífuga
- Tubos de centrífuga
- Agitador mecánico
- Matraces volumétricos de 100 ml
- Espectrofotómetro de absorción atómica. Perking-Elmerck
- Espectrofotómetro de flama. Corning 400

b) Reactivos

- Sol. de acetato de sodio 1M pH 8.2.- Disolver 136g de acetato de sodio ($\text{NaC}_2\text{H}_3\text{O}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), en agua destilada y diluir a 1l, el pH de esta solución debe ser de 8.2, si no es así agregar una gotas de ácido acético o sol de hidróxido de sodio, hasta ajustar al pH mencionado
- Sol. de acetato de amonio 1M, pH 7
- Etanol 95% v/v

c) Procedimiento

- Pesar 1g de suelo y colocarlos en tubos de centrifuga de 10 ml
- Añadir de 6 ml de acetato de sodio 1M
- Colocar los tubos en agitación, con agitador de vidrio por 2 min
- Centrifugar por 5 min hasta que el sobrenadante quede claro
- Repetir la operación, por 3 veces más con la misma cantidad de acetato de sodio, colectar los sobrenadantes en un matraz aforado de 100 ml, aforar con agua destilada, leer la concentración de calcio y magnesio intercambiables por espectrofotometría de absorción atómica
- Lavar el suelo con porciones de 8 ml de alcohol hasta eliminar el exceso de sodio, hasta que el último lavado con alcohol de una lectura de conductividad menor a 40 micromhos/cm
- Lavar el suelo, usando agitación y centrifugación por 3 veces con porciones de 6 ml de acetato de amonio y colocar los sobrenadantes, en este extracto cuantificar sodio, que nos dará una medida de la C.I.C. de los suelos.

Determinación de las concentraciones de sodio y potasio por espectrofotometría de flama.

Los metales alcalinos (Na^+ , K^+ , Li^+). Cuando se exponen a la flama a una temperatura suficientemente alta, absorben energía de la fuente de calor y son llevados a un estado excitado, posteriormente regresan a su estado basal y emiten la energía absorbida a longitudes de onda específica. Esta emisión es separada de las bandas de radiación y de emisión continua con un filtro óptico, la que es proporcional al número de átomos que regresan a su estado basal, que a su vez corresponden a la concentración de la muestra. (Bower-Wilcock, tomando en Black, 1974, p. 944).

a) Equipo y material

- Espectrofotómetro de flama Corning 400
- Vasos de precipitado de 10 ml
- Pissetas
- Matraces aforados de 100 y 10 ml

b) Reactivos

- Solución estándar de sodio 7.856 meq/l
- Solución estándar de potasio 5.244 meq/l

c) Procedimiento

- Preparar soluciones patrón de sodio de: 0.07856, 0.15712, 0.23568, 0.31424, 0.3928 y 0.47136 meq/l y soluciones patrón de potasio de: 0.05244, 0.105244, 0.15732, 0.20622 meq/l
- Preparar las muestras con los extractos de alcohol para sodio y potasio solubles, los extractos se evaporan a sequedad y se restituyen con agua destilada en un matraz volumétrico de 100 ml. Los extractos de acetato de amonio para sodio y potasio intercambiables, y para C.I.C. se pasa a matraces de 100 ml y se lleva al volumen
- Utilizar el espectrofotómetro de flama según lo indica el manual del equipo
- Anotar las lecturas del aparato
- Realizar una gráfica de lectura contra concentración en meq/100g, e interpolar las lecturas de las muestras para obtener su concentración
- Informar los resultados en meq/100g.

d) Cálculos

sodio soluble

$$\text{o sodio intercambiable} = \frac{100 (\text{concentración de Na}^+ \text{ meq/l})}{\text{peso de la muestra en g.}}$$

(suelo sódico)

$$\begin{array}{l} \text{potasio soluble} \\ \text{meq/100 g} \\ \text{(suelo sódico)} \end{array} = \frac{10 \text{ (concentración de } K^+ \text{ meq/l)}}{\text{peso de muestra en g.}}$$

$$\begin{array}{l} \text{potasio intercambiable} \\ \text{meq/100 g} \\ \text{(suelo sódico)} \end{array} = \frac{100 \text{ (concentración de } K^+ \text{ meq/l)}}{\text{peso de muestra en g.}}$$

$$\begin{array}{l} \text{sodio soluble o} \\ \text{sodio intercambiable} \\ \text{(meq/100 g)} \\ \text{(suelo cálcico)} \end{array} = \frac{10 \text{ (concentración de } Na^+ \text{ meq/l)}}{\text{peso de muestra en g.}}$$

$$\begin{array}{l} \text{potasio intercambiable} \\ \text{meq/100 g} \\ \text{(suelo cálcico)} \end{array} = \frac{10 \text{ (concentración } K^+ \text{ meq/l)}}{\text{peso de muestra en g.}}$$

$$\begin{array}{l} \text{potasio soluble} \\ \text{meq/100 g} \\ \text{(suelo cálcico)} \end{array} = \frac{10 \text{ (concentración de } K^+ \text{ meq/l)}}{\text{peso de muestra en g.}}$$

$$\begin{array}{l} \text{CIC (meq/100 g)} \\ \text{(suelo sódico y} \\ \text{cálcico)} \end{array} = \frac{10 \text{ (concentración de } Na^+ \text{ meq/l)}}{\text{peso de muestra en g.}}$$

*Cuantificación de calcio y magnesio intercambiables por
Espectrofotometría de absorción atómica*

Por este método se determinan aproximadamente 70 elementos metálicos entre ellos calcio y magnesio. Los principios del método se basan en la medición de la absorbancia de los átomos en estado gaseoso de un elemento a una longitud de onda específica, la cual sigue la ley de Lambert-Beer en un intervalo de concentraciones, que también es específico para cada elemento y se le llame intervalo lineal.

Esta absorbancia es el resultado de transiciones electrónicas en los átomos gaseosos no ionizados. La atomización del elemento se logra generalmente por medio de una flama a alta temperatura (con aire/acetileno, N_2O /acetileno, etc), en un generador de hidruros o en una cámara de vapor. Para realizar la determinación por absorción de flama, es necesario tener el elemento por analizar en solución. Por medio de una lámpara especial se produce un rayo luminoso de longitud de onda característico, éste se dirige a través de un eje longitudinal de la flama hacia un espectrofotómetro, al mismo tiempo la muestra previamente dispersada en forma de niebla pasa a la flama a donde se evapora, y al vapor de esta se disocia en los átomos del elemento en estudio, los cuales absorben parte de la luz emitida por la lámpara. Esta

absorción se mide y se relaciona a la concentración. (Watty B.M. 1982, p. 461-462), (Perkin-Elmer. Analytical Methods for Atomic Absorption Spectrometric. U.S.A. (1977).

a) Material

- Espectrofotómetro de absorción atómica Perkin-Elmer
- Matraces aforados de 100 ml
- Tubos de ensaye de 25 ml
- Gradillas
- Pissetas

b) Reactivos

- Sol. estándar de calcio 1000 ppm
- Sol. estándar de magnesio de 1000 ppm
- Sol. de lantano al 1% y 5%

c) Procedimiento

- Buscar el rango lineal de la lectura y la longitud de onda a la cual absorbe el elemento

Longitud de onda (nm)	Rango lineal (ppm)	Elemento
239.5	0 - 5	Calcio
285.2	0 - 0.3	Magnesio

- Los extractos de acetato de sodio que contienen calcio y magnesio intercambiable. Se les debe dar un tratamiento adecuado para poder leer en el equipo de absorción para lo cual se realizaron los cálculos correspondientes para que queden dentro del rango lineal y al agregar la solución de lantano esta quede en una concentración de 0,1%.
- Con base en los cálculos se obtuvo los siguientes procedimientos:

Para calcio intercambiable

Suelo	Muestra (ml)	Lantano (ml)	Aforo (ml)	Concentración esperada ppm
Sódico	1	2 al 1%	20	0 - 1.25
Cálcico	1	2 al 5%	100	0.25 - 1

Preparación solución estándar de calcio

Estándar de calcio (ppm)	Muestra (ml)	Lantano (ml)	Aforo (ml)	Concentración (ppm)
0	-	2 al 1%	20	0
60	1	2 al 1%	20	3

Para magnesio intercambiable

Suelo	Muestra (ml)	Lántano (ml)	Aforó (ml)	Concentración (ppm)
Sódico	1	2	20	0 - 0.3
Cálcico	1	2	20	0 - 0.3

Preparación solución estándar magnesio

Estándar de magnesio (ppm)	Estándar (ml)	Lántano (ml)	Aforo (ml)	Concentración (ppm)
0	-	2ml al 1%	20	0
3	1	2ml al 1%	20	0.15

- Se calibró el equipo con la solución estándar, y posteriormente se tomó la lectura para cada una de las muestras
- Informar los resultados en meq/100 g

Calcio intercambiable (meq/100 g) (suelo cálcico) = ppm de calcio x 50

Calcio intercambiable (meq/100 g) (suelo sódico) = ppm de calcio x 10

Magnesio intercambiable (meq/100 g) (suelo cálcico y sódico) = ppm de magnesio x 16.66

Método para determinar la capacidad de campo de un suelo

La capacidad de campo se ha definido como la cantidad de agua que retiene el suelo, después de que el exceso de agua por acción de la gravedad es drenada (Veihmeyer y Hendrickson, 1931 en Black. C, et. al., 1965, p.279-278).

Este valor puede ser usado para especificar el límite superior de agua disponible.

Método de preparación del extracto de saturación y determinación del punto de saturación

Se prepara una pasta de suelo, agregando agua al mismo hasta punto de saturación. El contenido de humedad correspondiente a la saturación del suelo es la cantidad máxima de agua que puede retener el suelo. (Bear, 1965, p. 310).

El punto de saturación representa aproximadamente dos veces el agua presente a la capacidad de humedad del campo.

a) Material

- Balanza
- Espátula

- Recipiente de plástico de 500 ml
- Embudo buchner
- Kitosato

b) Procedimiento

- Pesar 200 g de suelo, añadir agua destilada y remover con la espátula; la pasta esta lista cuando brilla y cae con facilidad de la espátula, sin dejarla manchada. Filtrar la pasta de saturación al vacío. En este filtrado se determina pH, conductividad, carbonatos, bicarbonatos y cloruros.

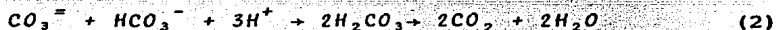
Determinación de carbonatos, bicarbonatos y cloruros-solubles en el extracto de saturación.

El método usual para la determinación de carbonatos, bicarbonatos, en extractos de suelos, es por titulación con un ácido diluido, debido a que las sales de bases fuertes y ácidos débiles presentan hidrólisis básica y se pueden neutralizar con un ácido de concentración conocida. Primeramente se establece el punto que corresponde a la transformación de carbonato a bicarbonato empleado como indicador fenolftaleína (pH mayor de 8.3).



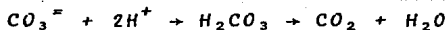
Volumen de ácido gastado = A

Y posteriormente se mide el segundo punto de equivalencia es decir la transformación a ácido carbónico, utilizando como indicador anaranjado de metilo (pH 3.7).



Volumen de ácido gastado desde el principio hasta la neutralización total = B

Si se considera que el extracto sólo contiene carbonatos, la ecuación se transforma en:



En muestras que contienen bicarbonatos $B > 2A$ los bicarbonatos son proporcionales a $(B-2A)$ y los carbonatos a $2A$ (Vogel 1960, p. 343; Vogel, 1978, p. 311).

La determinación se realizó como lo indica en Ortiz H. 1986. p. 86.

Determinación de sulfatos disponibles por turbidimetría

El método para determinar la concentración de sulfatos disponibles* en un extracto de suelo, se basa en medir la intensidad de la luz transmitida con respecto a la luz incidente de la suspensión de sulfato de bario, puede ser detectada en un nefelómetro donde se mide la luz dispersada o en un espectrofotómetro de luz visible, donde se mide la luz absorbida. La relación entre la absorbancia y concentración sigue la ley de Lambert-Beer en un intervalo específico. (Flaschka, H. et. al., 1982, p. 495-4498).

El ión sulfato se extrajo del suelo con una solución amortiguadora de ácido acético y acetato de sodio a pH de 4.5 (Solución de Morgan), a este extracto se añadió cristales de cloruro de bario de un tamaño determinado, con lo que se formó el sulfato de bario sólido. El proceso de precipitación se controló cuidadosamente debido a que el tamaño de los cristales determina la velocidad de la reacción, se mantuvo el pH óptimo de la suspensión para eliminar el efecto de otros iones, se agregó un estabilizador de la suspensión (goma de acacia), para conservar el precipitado en suspensión. La longitud de onda a la cual se presenta la máxima absorbancia

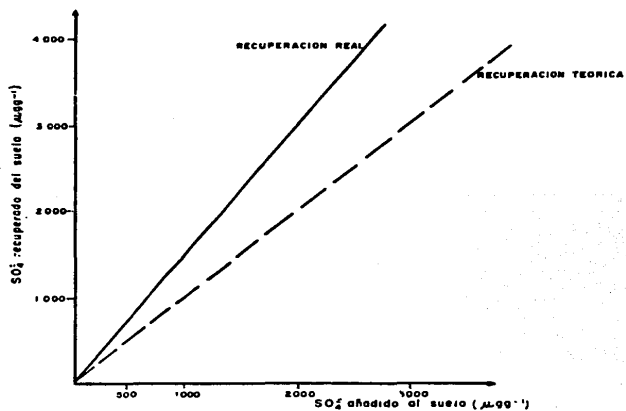
* Corresponde aproximadamente al sulfato soluble y al enlazado reversiblemente.

por la suspensión, y la alícuota de la muestra que se usó fueron determinadas experimentalmente.

El método turbidimétrico es rápido y conveniente, pero susceptible como todas las determinaciones turbidimétricas a dar resultados erróneos si la muestra presenta turbidez. La solución de Morgan extrae también materia orgánica coloidal, lo que causa turbidez y cooprecipita junto con los sulfatos, dando resultados altos.

Considerando el problema anterior, se han realizado experimentos adicionando cantidades conocidas de sulfatos a suelos libres de estos y se analizaron por el método de Chiesnien-Yien, obteniéndose los siguientes resultados como se muestra en la figura (A.1), el aumento en la concentración de sulfatos de la recuperación real con respecto a la teórica, ha sido demostrada que se debe a la materia orgánica coloidal. Con muy poca cantidad de materia orgánica se pueden obtener errores de esta clase, con apenas 0.01 microgramos de nitrógeno orgánico, se observó error por cooprecipitación. El experimento demostró que la baja de sulfatos por adsorción con $Fe(OH)_3$, es despreciable, por lo que estas modificaciones, se realizaron en las muestras en las que fué necesario.

Figura A.1 EFECTO DE LA MATERIA ORGANICA COLOIDAL, EN LA DETERMINACION TURBIDIMETRICA DE SULFATOS.



Método de extracción de sulfatos disponibles con solución de Morgan.

a) Material

- Matraces erlenmeyer de 250 ml
- Papel filtro whatman No. 42
- Embudo de plástico
- Matraces volumétricas de 25 ml

b) Reactivos

Solución Buffer de ácido acético-acetato de sodio, pH de 4.5 (solución de Moorgan). Disolver 100 g de acetato de sodio en 500 ml de agua destilada, adicionar 30 ml de ácido acético al 99.5% y llevar a un volumen de 1l, con agua destilada, esta solución debe tener un pH de 4.5.

c) Procedimiento

- Pesar 20 g de suelo seco y tamizado en un matraz erlenmeyer de 250 ml
- Adicionar 100 ml de solución de Morgan
- Agitar durante $\frac{1}{2}$ hr, con agitación mecánica
- Filtrar a través de un papel Whatman No. 42
- Centrifugar si es necesario, hasta que el extracto quede claro.

Determinación de sulfatos disponibles por espectrofotometría con la modificación de Chesnin-Vien*

a) Material

- Matraces volumétricos de 10, 20 y 25 ml, 1000 ml
- Pipetas automáticas de 1 y 5 ml
- Pissetas
- Espectrofotómetro Zeiss PMZK
- Centrífuga
- Tubos para centrífuga

b) Reactivos

- Sol. estándar de azufre de 100 ppm, disolver 0.537 g de sulfato de calcio ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), previamente secado en estufa a 60°C por 3 hrs, llenar a 1000 ml, con sol. de Morgan
- Sol. de goma de acacia 0.25% (p/v).
- Cristales de cloruro de bario ($\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), de diámetro 0.2 a 0.6 mm. Moler en un mortero de agata y pasar a través de un tamiz No. 30 (0.6 mm aprox.) y los cristales que pasen este se tamizan en uno del

* La modificación únicamente fué necesaria para suelos sódicos.

No. 60 (0.2 mm), y se usan los cristales retenidos en este (es decir cristales > 0.2 y < 0.6 mm).

- Sol. de $FeCl_3$ 1% p/v
- Sol. de $NaOH$ 40% p/v
- Ac. acético concentrado

c) Procedimiento

- A 25 ml del extracto con sol. de Morgan, añadir 10 ml $FeCl_3$, y 10 ml $NaOH$ al 40%
- Agitar y centrifugar el extracto, en el sobrenadante realizar la cuantificación de sulfatos
- Preparar soluciones estándar de 1, 5, 10, 20, 40 y 60 ppm de S a partir de la solución madre de 100 ppm de S
- Tomar una alícuota de 20 ml de C/u de las soluciones estándar y poner en matraces aforados de 25 ml
- Agregar 1 g $BaCl_2$
- Agitar 1 min
- Agregar 1 ml de la sol. de goma de acacia a 0.25%, si la concentración es menor a 20 ppm y 2 ml de la solución si la concentración es mayor a 20 ppm
- Aforar a 25 ml con agua destilada
- Agitar 1 min.

Preparación de las muestras

- Tomar 10 ml de alicuota de los extractos de suelo cálcico y 1 ml de los extractos de suelo sódico
- Preparar las muestras de igual manera que las soluciones estándar y leer conjuntamente a éstas
- Leer a 460 nm en intervalos de tiempo de 5 a 30 mm conjuntamente a los estándares.

c) Cálculos

ppm de sulfatos = ppm leídos en curva estándar x 37.5
en suelo cálcico

ppm de sulfatos = ppm leídos en curva estándar x 67.5*
en suelo sódico.

* Este factor puede cambiar dependiendo de la alicuota tomada.

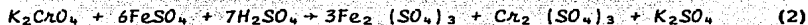
Determinación de materia orgánica por el método de Walkey - Black

El método consiste en oxidar el suelo con un exceso de ácido crómico, seguido de la titulación del agente oxidante.

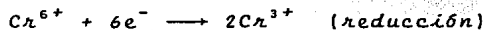
El método de carbono orgánico fué introducido por Schollenber en 1927 y modificado por Walkey - Black, una cierta cantidad de suelo finamente molido es tratado con un volumen conocido de dicromato de potasio, seguido de la adición rápida de dos volúmenes de ácido sulfúrico concentrado. La reacción se facilita con el calor generado cuando se mezcla el dicromato de potasio con el ácido, la temperatura que se alcanza es de aproximadamente 120°C que es suficiente para oxidar las formas activas del carbono orgánico, pero no las inertes.

Después de la oxidación, todas las muestras se enfrían uniformemente para después diluirlas, adicionando un exceso de H_3PO_4 , para suprimir interferencias de fierro (III), que son considerables cuando dicho elemento esta presente. Finalmente se titula el ácido crómico que no reaccionó con una solución de sulfato ferroso, usando bario sulfonato de difenil amina como indicador. Aunque la oxidación es rápida, tiene la desventaja de producir una oxidación incompleta del carbono orgánico, por lo que es necesario determinar factores de corrección en los cálculos.

Las reacciones químicas que se llevan a cabo durante el análisis son:



La primera representa a la reacción que ocurre cuando el dicromato de potasio oxida al carbono orgánico, y la segunda muestra la titulación del exceso de dicromato de potasio al final de la digestión del suelo, resultando la reducción del ión dicromato, de aquí que se lleven las siguientes reacciones de óxido-reducción



Método de Walkey-Black para determinar materia orgánica

a) Material

- Balanza analítica
- Matraces erlenmeyer de 250 ml

- Pipetas volumétricas de 10 ml
- Probetas de 25 ml y 200 ml
- Gotero
- Bureta de 25 ml

b) Reactivos

- Solución de dicromato de potasio 1N.- Pesar 49.04 g de $K_2Cr_2O_7$, en agua destilada y aforar a 1 litro
- Acido sulfúrico concentrado
- Acido fosfórico concentrado
- Solución de bario sulfonato de difenilamina al 0.16% m/v, pesar 0.16 g del indicador y disolverlos con agua destilada aforar a 100 ml
- Solución de $FeSO_4$, 0.5N.- Disolver 278 g de $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ con agua y agregar 90 ml de ácido sulfúrico concentrado. Enfriar y aforar a 2 litros

c. Procedimiento

- Pesar 0.5 g de suelo seco al aire y colocarlo dentro de un matraz erlenmeyer de 250 ml (por duplicado)
- Agregar 5 ml de la solución de dicromato de potasio 1N, usando una pipeta volumétrica
- Tomar otro matraz sin suelo y agregar los 5 ml de

dicromato de potasio se le da el mismo tratamiento subsecuente que a las muestras, y se usa como blanco

- Dar al matraz un movimiento de giros para mezclar el reactivo con el suelo.
- Adicionar rápidamente 10 ml de ácido sulfúrico concentrado y otra vez mezclar por 30 seg para poner en contacto a los reactivos y al suelo
- Dejar reposar el matraz por 30 minutos
- Adicionar 100 ml de agua destilada y 5 ml de H_3PO_4 concentrado
- Enfriar la solución (el punto final de la titulación es fácilmente determinada con una mezcla fría)
- Adicionar 5 gotas de la solución de bario sulfonato de difenilmina
- Titular el exceso de dicromato con la solución de sulfato ferroso
- Cerca del punto final de la titulación, el color es violeta-azúl y termina con un color verde
- Anotar el gasto de $FeSO_4$ para cada una de las muestras y para el blanco, este último es importante para determinar la normalidad del $FeSO_4$, cada vez que realice el análisis, ya que es una solución muy inestable
- Informar el % de carbono orgánico y % de materia orgánica.

d) Cálculos

Para realizar los cálculos se toman los siguientes conceptos:

- Se titula el exceso de dicromato de potasio con sulfato ferroso, por lo que se titula un blanco de dicromato de potasio, para que por diferencia se obtenga la cantidad de dicromato de potasio gastado en la oxidación del carbono orgánico
- De donde:

$$V_b \cdot N \text{ FeSO}_4 = \text{meq } K_2Cr_2O_7$$

V_b = Volumen de sulfato ferroso usado para titular el blanco

$$V_m \cdot N \text{ FeSO}_4 = \text{meq } K_2Cr_2O_7$$

V_m = Volumen de sulfato ferroso usado para titular la muestra

$$\text{meq C} = (V_b - V_m) (N \text{ FeSO}_4)$$

$$\text{mg C} = (V_b - V_m) (N \text{ FeSO}_4) (3)$$

$$\text{g C} = (V_b - V_m) (N \text{ FeSO}_4) (3) (10^{-3})$$

$$\% \text{ C orgánico} = \frac{(V_b - V_m) (N \text{ FeSO}_4) (3) (10^{-3}) (10^2)}{\text{Peso de muestra}}$$

Se debe recordar que para obtener el % de carbono orgánico real, existe una recuperación en el método del 77% del carbono orgánico, por lo que la fórmula anterior representa ese porcentaje, para reportar el 100% de carbono orgánico, se multiplica la fórmula anterior por 1.33, obteniendo la siguiente fórmula:

$$\% \text{ C orgánico real} = \frac{(Vb - Vm)(N \text{ FeSO}_4)(0.39)}{\text{Peso de la muestra}}$$

Teniendo en cuenta que la materia orgánica tiene un 58% de carbono, se aplica el factor 1.724, resultando la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de materia orgánica} = \frac{(Vb - Vm)(N \text{ FeSO}_4)(0.67)}{\text{Peso de la muestra}}$$

*Determinación del tamaño de partícula por el método del hidrómetro
(textura del suelo)*

El suelo está formado por unidades discretas que se encuentran formando agregados. Estas partículas tienen diversa composición, estructura, tamaño y forma. La actividad química de un suelo se debe únicamente a las partículas más finas (menor de 0.002 mm), mientras que el drenaje y otras propiedades físicas están relacionadas a partículas de tamaño mayor como son limos y arenas. Los métodos más comunes para realizar el análisis textural son el tamizado para partículas gruesas (mayores de 0.05 mm) y la sedimentación para partículas menores.

Partículas pequeñas y esféricas de densidad P_s y diámetro X , sedimentan en un líquido de densidad P_l y viscosidad η , a la velocidad $v = X^2 g (P_s - P_l) / 18 \eta$, donde g es la aceleración de la gravedad. Esta relación se conoce como la ecuación de Stokes. Estos principios aunque corresponden únicamente a partículas esféricas se aplican a la separación y cuantificación de las partículas del suelo que son anisométricas. (Black, 1965, p. 549).

Se prepara una suspensión homogénea del suelo y se mide directamente con ayuda de un hidrómetro la concentración de

partículas hasta determinada profundidad y a diferentes tiempos. La fuerza que impulsa hacia arriba al hidrómetro esta directamente relacionado a la suspensión y a través de ésta a la concentración del sólido suspendido, por lo que se calibra la escala del hidrómetro de forma tal que señale directamente la concentración de la suspensión y que corresponde a la concentración del sólido suspendido, se toman lecturas a los 40 seg y a las 2 hs; la primera corresponderá a una suspensión que contiene limos y arcillas en las cuales las arenas ya sedimentaron y a las 2 hr queda únicamente en suspensión de arcillas.

La determinación se realizó por el método del hidrómetro (Ortiz H. 1986, p. 49).