

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

PROYECTO DE RECUPERACION DE SUELOS SALINO-  
SODICOS EN EL DISTRITO DE RIEGO No. 43 ES-  
TADO DE NAYARIT MEDIANTE APLICACION DE ME-  
JORADORES QUIMICOS Y LAVADOS CON AGUA.

T E S I S

Que para obtener el Título de:

I N G E N I E R O Q U I M I C O

P r e s e n t a :

JOSE DE JESUS GAXIOLA VALLE

México, D.F.

1980.



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

PRESIDENTE: PROF. FRANCISCO FERNANDEZ NORIEGA

JURADO ASIGNADO ORIGINALMENTE SEGUN EL TEMA.

VOCAL: PROF. FRANCISCO SERRANO MENESES

SECRETARIO: PROF. CARLOS ROMO MEDRANO

1er. VOCAL: PROF. PEDRO VILLANUEVA GONZALEZ

2o. VOCAL: PROF. ROBERTO CONTRERAS REYES

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA: SANTIAGO IXCUINTLA, NAYARIT.

NOMBRE COMPLETO Y FIRMA DEL SUSTENTANTE: JOSE DE JESUS GAXIOLA VALLE

NOMBRE COMPLETO Y FIRMA DEL ASESOR DEL TEMA: Q. CARLOS ROMO MEDRANO



DEPTO. DE PASANTES Y  
EXAMENES PROFESIONALES  
FAC. DE QUIMICA

A mis queridos padres:

José Ma. Gaxiola Gaxiola

Y

Sara Valle de Gaxiola

Con respeto, admiración  
y agradecimiento por sus  
estímulos e impulsos en-  
la formación de mi vida.

A mis hermanos:

Xochitl Zarina

Luis Roberto

Elya Luz

Rubén

Sara Elena

Marco Antonio

Con cariño

A Blanca Olivia y Manuel;  
Como testimonio de gratitud por su ayuda en mi -  
formación profesional.

A Martha Isabel:  
Con aprecio y agradecimiento  
por su apoyo y confianza brinda  
da desinteresadamente.

A mis maestros,  
asesores, amigos  
y compañeros.

Que me brindaron su ayuda  
amistosa para la realiza-  
ción de la tesis.

# CONTENIDO

	<u>Página</u>
CAPITULO 1. INTRODUCCION	1
CAPITULO II. GENERALIDADES	4
1. Distrito de Riego.- Comunicaciones dentro y fuera del Distrito.- Presas derivadoras.	4
2. Salinidad en el suelo.- Origen de las sales.- Tipos de sales y sus formas en el suelo.	6
3. Efecto de las Altas concentraciones de sales sobre el suelo y las plantas.	6
4. Proceso de Formación de los suelos de alta -- concentración de sales.	6
5. Formación de suelos sódicos.	10
6. Recuperación de suelos con problemas de sales.- Con aplicación de mejoradores químicos.- Por medio de lavado con agua.	11
7. Medida de la salinidad.- Clasificación de los-- suelos.	13
8. Mejoradores químicos de suelos.	15
9. Sustancias químicas utilizadas en el presente-- trabajo.	16
CAPITULO III. MATERIALES Y METODOS EMPLEADOS	20
1. Cantidades de mejorador químico en cada una de las dosificaciones para recuperar el suelo problema .	21



2. Dispositivos para llevar a cabo el experimento.	23
--	----

CAPITULO IV. EVALUACION DEL AGUA EMPLEADA	24
---	----

1. Criterios e índices de clasificación del agua de riego.	25
--	----

2. Clasificación de acuerdo al contenido de sales solubles.- Conductividad Eléctrica.- Salinidad Efectiva.- Salinidad Potencial.	28
--	----

3. Clasificación de acuerdo al efecto del sodio sobre las características físicas del suelo.- Relación de Adsorción de Sodio.- Carbonato de Sodio Residual.- Porcentaje de Sodio Posible.	29
---	----

4. Análisis del agua de riego empleada en el presente trabajo.- Interpretación.	31
---	----

CAPITULO V. DISEÑO EXPERIMENTAL SELECCIONADO	33
--	----

1. Factores que intervienen.	33
------------------------------	----

2. Análisis Físico-Químico del suelo.	33
---------------------------------------	----

3. Cálculos para determinar el sodio intercambiable por sustituir.	34
--	----

4. Porcentaje de Sodio Intercambiable obtenido en el suelo después del tratamiento con mejoradores químicos en cada una de las repeticiones.	38
--	----

5. Estudio estadístico de los resultados obtenidos.	39
---	----

6.Comparación de los valores obtenidos. 43  
7.Discusión de resultados. 46

CAPITULO VI. EVALUACION ECONOMICA 51

1.Costos de cada uno de los productos em- 51  
pleados.-de acuerdo a las cantidades que  
se aplicaron.  
2.Discusión de los costos. 53

CAPITULO VII.CONCLUSIONES 54

1.Resumen 55

BIBLIOGRAFIA 57

Glosario de Términos 59

APENDICE 62

## CAPITULO I. INTRODUCCION

## I. INTRODUCCION

Uno de los problemas más serios en la regiones de riego del mundo es la acumulación de sales solubles en el suelo, transformándolo en salino y por lo tanto improductivo a consecuencia de la irrigación, manejo deficiente o drenaje inadecuado.

El problema de salinidad de mayor importancia económica se presenta cuando a consecuencia del mal manejo del agua de riego, un suelo no salino se vuelve salino.

Estos suelos frecuentemente se encuentran en valles cercanos a las corrientes de agua y por la facilidad con que pueden irrigarse, se escogen los más planos para el cultivo. Cuando se someten nuevas tierras de riego, los agricultores casi siempre olvidan la necesidad de establecer drenajes artificiales que regulen el agua adicional y las sales solubles. A consecuencia de esto, la capa freática puede elevarse de profundidades considerables y llegar hasta cerca de la superficie del suelo en pocos años. Cuando el agua de riego es abundante, generalmente existe una tendencia a utilizarla en exceso, lo cual acelera la elevación de la capa freática.

En las regiones húmedas las sales solubles originalmente presentes en los materiales del suelo, por lo general son llevadas a las capas inferiores hacia el agua subterránea y finalmente transportadas a los mares, por tanto los suelos salinos de hecho no existen en las regiones húmedas, exceptuando los suelos que han estado expuestos al agua de mar por fluctuaciones de mareas como son las zonas adyacentes a las costas; también en si-

tios de topografía baja. En las regiones áridas el lavado es de naturaleza local y las sales solubles no pueden ser transportadas muy lejos, esto se debe no solamente por que hay menos precipitación pluvial adecuada para lavar y transportar las sales, sino también a consecuencia de la elevada evaporación característica del clima árido que tiende a concentrar las sales en la superficie de los suelos.

La desecación de suelos en la superficie por transpiración y elevación crea un gradiente de succión que produce un movimiento ascendente de sales solubles y agua. Este ascenso especialmente si la capa freática queda muy cerca de la superficie, es un proceso por el cual muchos suelos se han salinizado.

En el Distrito de Riego No.43 del Estado de Nayarit, el problema de la afectación de sales es grave, considerando que de la superficie total-aproximadamente el 85% están libres de sales, como se puede observar en los datos estadísticos del año 1977:

Superficie libre de sales.....	35 896.00	Has.
Superficie ligeramente afectada de sales.....	3 010.00	"
Superficie medianamente afectadas de sales.....	2 150.00	"
Superficie fuertemente afectada de sales.....	1 076.00	"
Superficie total de riego .....	<u>42 132.00</u>	"

La acumulación de sales ha aumentado poco a poco con el paso del tiempo y debido al mal manejo del suelo y del agua.

El balance de sales en el suelo se ve afectado por la cantidad y calidad del agua de riego, por lo cual la efectividad del lavado, la aplicación de mejoradores químicos y el drenaje artificial son de gran importancia para la recuperación del suelo salino.

Los mejoradores químicos son sustancias que modifican las características tanto físicas como químicas de los suelos y que generalmente se aplican sin ninguna base firme que garantice la inversión, logrando muchas veces resultados mínimos. En la actualidad existen gran variedad de productos comerciales que son incorporados al suelo en las dosis que indica el vendedor sin saber con exactitud la eficiencia de dichos productos.

Se desea con el presente trabajo contribuir a la recuperación de estos suelos con exceso de sales. Es por ello que éste tiene como objetivos primordiales aportar las experiencias obtenidas en la eficiencia de algunos mejoradores químicos, la rapidez de recuperación de un suelo y la evaluación económica para llegar a la recuperación ideal de un suelo ensalitrado hasta incorporarse a la productividad.

Se incluye análisis físico-químico del suelo por mejorar y la evaluación del producto más eficaz, así como la cantidad óptima a utilizar;--terminando con una comparación económica de dichos productos y su aplicación; también el tema incluye análisis químico del agua de riego utilizada e índices generales de clasificación.

## CAPITULO II. GENERALIDADES

## II. GENERALIDADES

Debido a la diferente topografía de los suelos del Estado de Nayarit la superficie que integra al Distrito de Riego No. 43, se encuentran localizadas en un grupo de Unidades de Riego no compacto. Este Distrito está compuesto por ocho Unidades de Riego de las cuales tres son grandes y cinco pequeñas:

La Unidad de Riego Río Santiago forma parte de los Municipios: Tepic, Santiago Ixcuintla y San Blas; cuenta con una superficie regable de 20,000 Has., está situada según los datos geográficos medios en la latitud Norte  $21^{\circ}48'$  y longitud Oeste  $105^{\circ}13'$ ; tiene una altitud de 15 metros; se riega con agua del río Santiago, con la presa derivadora Amado Nervo que tiene una capacidad de derivación de  $6,000 \text{ m}^3/\text{seg}$  y una capacidad del canal principal de  $25 \text{ m}^3/\text{seg}$ ; con una precipitación pluvial anual de 1,460.9 mm; también una temperatura media anual de  $29.5^{\circ}\text{C}$ , temperatura media anual máxima de  $31.5^{\circ}\text{C}$  y temperatura media anual mínima de  $25.9^{\circ}\text{C}$ .

La Unidad Valle de Banderas cuenta con una área regable de 12,159.0 Has. que pertenecen a los municipios de Compostela, Estado de Nayarit y Puerto Vallarta y San Sebastián del Estado de Jalisco; la situación geográfica media es: latitud Norte  $20^{\circ}48'$  y longitud Oeste  $105^{\circ}12'$ , tiene una altitud media de 53.0 metros; se riega con corriente del río Ameca por medio de la presa derivadora Esteban Baca Calderón cuyo canal principal tiene una capacidad de  $10 \text{ m}^3/\text{seg}$  en la margen derecha y de  $2 \text{ m}^3/\text{seg}$  en la margen izquierda; se registran lluvias con una precipitación anual de 1,528.6 mm; con una temperatura media anual de  $25.2^{\circ}\text{C}$ , temperatura media anual máxima de  $35.1^{\circ}\text{C}$  y temperatura media anual mínima de  $16.0^{\circ}\text{C}$ .



La Unidad de Riego Río San Pedro cuenta con una superficie de irrigación de 8,427 Has., que forman parte de los municipios: Tuxpan, Ruiz, y Rosa Morada; la situación geográfica media es: latitud Norte 21°48' y longitud Oeste 105°17'; tiene una altitud de 37 metros; se riega con la corriente del Río San Pedro y con la Presa derivadora Toma Directa cuya capacidad del canal principal es de 10 m<sup>3</sup>/seg; llueve con una precipitación anual de 1,379.6 mm; con una temperatura media anual de 29.4°C, temperatura media anual máxima de 32.4°C y temperatura media anual mínima de 29.8°C.

Las Unidades de Riego Ahuacatlán, Tetitlán, Santa Rosa, Mecatán y Miramár, suman un total de 1,546 Has. de superficie; tiene una precipitación pluvial media anual de 1,412 mm y una temperatura media anual de 26.9°C.

#### COMUNICACIONES.

El Distrito de Riego se comunica con el resto del país por la carretera Internacional México-Nogales, por los ferrocarriles del Pacífico, por pequeñas compañías de Navegación aérea que realizan viajes de Tepic a las ciudades de Mazatlán, Puerto Vallarta y Guadalajara y por teléfonos, correos y Telégrafos Nacionales.

Interiormente se comunica por las carreteras Tepic-Compostela---Guayabitos-San José del Valle-Puerto Vallarta; Tepic-Jalcocotán-Santa Cruz--San Blas-Santiago Ixcuintla; Tepic-Lindavista-Puga.

## SALINIDAD EN EL SUELO.

En forma natural todos los suelos contienen sales; esta misma condición guardan las aguas. Las sales son utilizadas por vegetales y animales como alimento, aún cuando su uso sea selectivo y/o preferente; sin embargo la presencia de sales puede dañar a los mismos cuando su concentración y la forma en que se encuentran exceda de ciertos límites. Estos daños llegan a manifestarse por el reducido desarrollo y bajos rendimientos de plantas y animales.

A fin de preveer que no lleguen a presentarse los daños por alta concentración de sales por recuperar los suelos ya afectados, deberán aplicarse prácticas adecuadas de manejo del suelo y del agua, así como también medidas técnicas especiales.

## ORIGEN DE LAS SALES.

La fuente original de donde provienen las sales del suelo y del agua, son los minerales primarios que se encuentran formando las rocas y los suelos. La formación de sales se realiza mediante el proceso de Intemperismo (Hidrólisis, Hidratación, Oxidación, Solución y Carbonatación) sobre las rocas de los suelos que las liberan gradualmente.

## TIPOS DE SALES Y SUS FORMAS EN EL SUELO.

La presencia de las sales en el suelo se manifiesta principalmente en dos formas:

1. Asociadas: Formando parte de los compuestos por combinación de los iones.

2. Disociadas: Como iones que pueden ser positivos (cationes) y negativos (aniones). En el caso de estar presentes en esta forma, los podemos encontrar en tres disposiciones:

a) Solubles: en el agua del suelo

b) Adsorbido: retenido por cargas eléctricas en las arcillas, limos o material orgánico muy fino

c) Absorbido: a presión en las arcillas o material orgánico muy fino

Los iones más comunes en orden de abundancia son:

ANIONES		CATIONES	
* $\text{Cl}^-$	(Cloruros)	$\text{Ca}^{++}$	(Calcio) *
* $\text{SO}_4^{=}$	(Sulfatos)	$\text{Mg}^{++}$	(Magnesio) *
* $\text{CO}_3^{=}$	(Carbonatos)	$\text{Na}^+$	(Sodio) *
$\text{HCO}_3^-$	(Bicarbonatos)	$\text{K}^+$	(Potasio)
$\text{NO}_3^-$	(Nitratos)	$\text{Fe}^{+++}$	(Fierro)
$\text{SiO}_2^{=}$	(Silicatos)	$\text{Bo}^{+++}$	(Boro)

\* Aniones y Cationes más abundantes.

Los carbonatos y bicarbonatos se forman en solución en agua del bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) que se encuentra en el aire o en los minerales de las rocas y del suelo.

#### EFFECTO DE LAS ALTAS CONCENTRACIONES DE SALES.

EN EL SUELO: Hacen variar sus propiedades físicas y químicas en la forma siguiente:

- a) Modifican el estado de agregación de las partículas, dando lugar a cambios en la estructura y por consiguiente en aereación, retención de humedad, etc.
- b) Aumentan el Esfuerzo de Humedad del suelo (EHS) disminuyendo con ello la humedad disponible para las plantas.
- c) La presencia de exceso de sodio en los suelos reduce la aereación, la infiltración y la conductividad hidráulica a límites desfavorables para la planta.
- d) Hacen variar el pH reduciendo la solubilidad de los nutrientes y por lo mismo su disponibilidad para las plantas.
- e) En otros casos puede poner en solución a elementos tóxicos -- para los cultivos.

EN LAS PLANTAS: Causan basicamente la reducción del desarrollo o las inhiben, además de daños físicos en sus tejidos

- a) Reducen la absorción del agua y los nutrientes a causa del aumento de presión osmótica.
- b) Crean una toxicidad que es selectiva en las plantas.

#### PROCESOS DE FORMACIÓN DE SUELOS DE ALTA CONCENTRACION DE SALES

Los suelos de estas características tienen dos orígenes fundamentales :

1. NATURAL: Estos por su formación pueden ser:

- A) In Situ: o sea, aquellos que se formaron por la descomposición de las rocas en el mismo lugar donde yacen.
- B) En Cuencas Cerradas: a estas cuencas van las aguas de lluvias

ó arroyos que acarrean gran cantidad de sales. Al evaporarse el agua la concentración de las sales es cada vez mayor, dando lugar a la salinización de estos suelos. Ejemplos de este tipo los tenemos en Texcoco, Chalco, etc.

C) Marino: existen cuatro variaciones en su origen:

a) Geológico: cuando el material original está constituido por depósitos marinos que se asentaron para después emerger del mar; como por ejemplo la Península de Baja California.

b) Costero: donde las aguas del mar cargadas de sales invaden las zonas bajas.

c) Por fenómenos meteorológicos: esto se debe al acarreo de agua de mar a través de los vientos; es lo que conocemos como brisa, pero también se presentan como vientos huracanados y ciclones.

d) Por intrusión: es decir, por avance de aguas de mar a través de las capas del subsuelo.

2. INDUCIDA: El origen de estas concentraciones de sales, obedece al inadecuado manejo que el hombre hace del suelo y del agua en las tierras agrícolas bajo riego. Esto indica que la fuente directa más común son las aguas superficiales y también las subterráneas, ya que las contienen disueltas y su concentración depende del contenido salino del suelo y de los materiales geológicos que han estado en contacto con ellas.

En general los suelos con alta concentración de sales (tanto natural como inducida) se encuentran principalmente en climas áridos y semi áridos; sólo se presentan suelos salinos en regiones húmedas cuando son de origen marino.

## PROCESO DE SALINIZACION

Consiste en la acumulación de sales en la zona radicular o superficial. Las sales problema pueden provenir del agua freática del suelo que originalmente las contiene o bien ser aportadas por las aguas de riego. El proceso tiene lugar por la alteración del régimen de humedad del suelo y se presenta ésta cuando las aguas de sobreriego como filtraciones, lluvias, etc., tienden a elevar el nivel freático acercándolo a la superficie. En estas condiciones aumenta la evaporación del agua freática que llega a la superficie por capilaridad, pero que dejó en las primeras capas del suelo (zona radicular) las sales que lleva consigo.

## FORMACION DE SUELOS SODICOS

Las sales que estan presentes en los suelos pueden encontrarse solubles en el agua; adsorbidas y absorbidas en las arcillas, limos o material orgánico muy fino.

Las sales adsorbidas tienen la propiedad de intercambiarse con las que existen en solución del suelo. Esta propiedad se conoce con el nombre de Capacidad de Intercambio Catiónico, porque son los cationes los que están retenidos por las cargas eléctricas negativas. De los cationes adsorbidos es el sodio el que imprime características muy propias al suelo cuando su presencia con relación a los otros cationes es mayor en cierto porcentaje. Cuando esto sucede se tiene un suelo llamado sódico.

El intercambio de cationes se realiza cuando en la solución del suelo la concentración de un catión aumenta produciendose un desequilibrio -

químico-eléctrico con relación a los cationes adsorbidos. El aumento de la concentración del catión tiene lugar con el aumento de sales que lo contienen, o bien con la reunión de los cationes que se encuentran dispersos en una solución muy diluída del suelo que se concentra al reducirse el agua - a causa de evaporación y/o evapotranspiración. En estos dos casos el calcio y el magnesio tienen poca solubilidad comparada con la del sodio; se precipitan como carbonatos y sulfatos, no así el sodio que permanece activo. En estas condiciones el sodio tiene mayor concentración en la solución del suelo y si éste es superior al 50% se intercambia con el calcio y el magnesio adsorbidos (intercambiables) ocupando, su lugar en la miscela coloidal.

Con el aumento de sodio intercambiable ascienden las características negativas que le imprime al suelo en detrimento de su productividad agrícola.

#### RECUPERACION DE SUELOS CON PROBLEMAS DE SALES

Independientemente al tipo de afectación un suelo se puede recuperar llevando a cabo los siguientes principios básicos.

Las sales sólo pueden ser transportadas fuera del suelo con el agua de riego, por lo tanto es importante señalar que la eficacia en todo proceso de recuperación de un suelo con problemas de sales, dependerá en gran parte de los aspectos siguientes:

Aplicación de mejorador químico: el mejorador químico debe agregarse antes de aplicar agua para lavado, por que de lo contrario se puede convertir el suelo en sódico y dadas las características de impermeabilidad de éstos se agravaría el problema de recuperación.

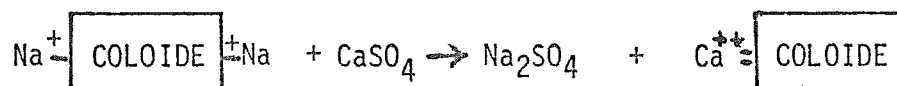
Lavado de las Sales: la finalidad de éste es poner en solución las sales - que causan problemas a los cultivos y transportarlas fuera de la zona radicular. El agua que se utilice en el lavado deberá ser de buena calidad para que tenga mayor poder de solución, pero también pueden usarse aguas salinas por ejemplo de drenaje, especialmente cuando son aguas ricas en carbonatos cloruros y sulfatos de calcio y magnesio; si se trata de recuperar suelos sódicos siempre se deberá tener control del proceso de recuperación, a base de constantes análisis de los suelos en el laboratorio.

Drenaje: es fundamental asegurarse que el agua del lavado deberá tener salida adecuada fuera de la zona en que las sales se están perjudicando, de lo contrario cualquier trabajo de recuperación de suelos será inútil. De acuerdo a estudios realizados en el campo, es factible agregar agua del lavado - antes de que se aplique el mejorador químico siempre que se cumpla la siguiente relación:

$$\frac{\text{Na}^+}{\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}} < 3$$

Por esta razón si desde el inicio de la recuperación existen posibilidades de agregar agua de lavado antes de incorporar el mejorador, es importante hacer análisis químicos del suelo periódicamente para determinar el momento de adicionar el mejorador químico en cantidad necesaria con el fin de economizar el mejorador.

Para que el mejorador químico actúe es necesario que se lleve a cabo la siguiente reacción química:





En la cuál el ión sodio que está adherido a la partícula de arcilla ha sido sustituido por el ión calcio, formandose el sulfato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) que es soluble y se elimina con el agua del lavado. Para que esta reacción se realice es necesario que exista un medio propicio (húmedo), por lo cuál antes de proceder al lavado se necesita agregar agua de humedecimiento ( a capacidad de campo ).

#### MEDIDA DE LA SALINIDAD

Para la medida de salinidad de los suelos se hace a través de la conductividad eléctrica (CE) en forma indirecta, al extracto obtenido de un suelo saturado con agua destilada. Esta medida se realiza así en virtud de que está comprobado de que existe una correlación directa entre la conductividad eléctrica y la presencia de sales solubles en el suelo .

#### CLASIFICACION DE SUELOS SALINOS Y SODICOS

El término "suelo salino" se refiere al suelo que contiene suficientes sales solubles para afectar su productividad. Similarmente el término "suelo sódico" se refiere al suelo cuya productividad es afectada por el contenido sodio intercambiable.

Un suelo sódico puede o no tener exceso de sales solubles. El suelo que contiene demasiadas sales solubles y sodio intercambiable, se denomina suelo "salino sódico". Los suelos normales son aquellos que no son afectados ni por sales solubles ni por sodio intercambiable.

La escala de clasificación recomendada por el laboratorio de salinidad de Los Estados Unidos de Norteamérica, incluye los cuatro grupos an

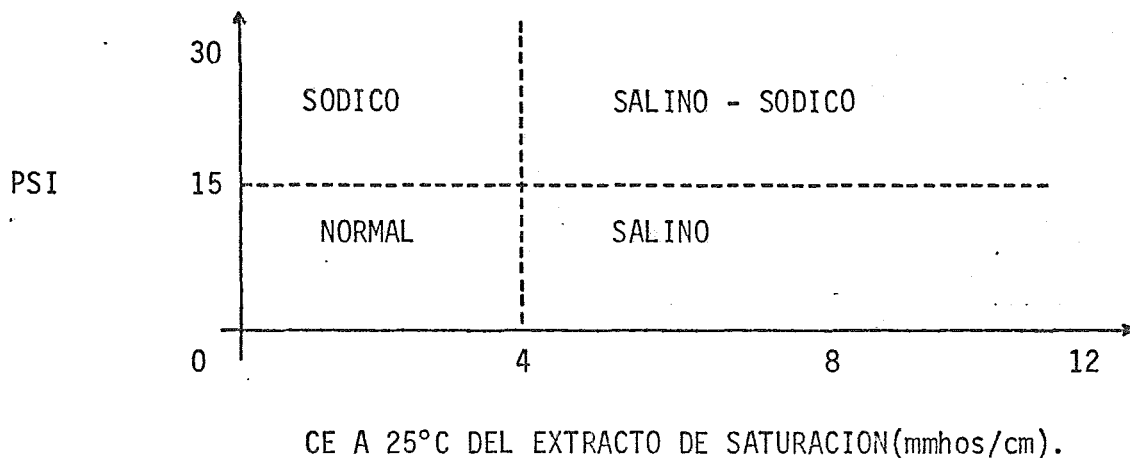
teriormente mencionados: suelo normal, suelo salino, suelo salino sódico y suelo sódico, según se puede observar en el cuadro No. 1 y en la figura 1.

Esta clasificación se basa en la conductividad eléctrica (CE) a 25°C, en el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y el pH del suelo.

CUADRO No.1: CLASIFICACION DEL SUELO DE ACUERDO A SU SALINIDAD.

CLASE DE SUELO	CE A 25°C DEL (mmhos/cm) EXTCTO. DE SAT.	PSI	pH DEL SUELO APROXIMADO
NORMAL	menos de 4	menos de 15	menor de 8.5
SALINO	más de 4	menos de 15	menor de 8.5
SALINO-SODICO	más de 4	más de 15	raras veces más de 8.5
SODICO	menos de 4	mayor de 15	entre 8.5 y 10

FIG. No. 1: DIAGRAMA PARA CLASIFICAR LOS SUELOS POR SU SALINIDAD.



## MEJORADORES QUIMICOS DEL SUELO

Existen en forma comercial varias sustancias que se conocen como mejoradores químicos del suelo debido a su acción modificadora de las características físico-químicas de ellos. En lo físico se refiere a la reconstrucción de las condiciones estructurales del suelo (duro) para obtener una mejor permeabilidad y como consecuencia mayor penetración de las raíces, más retención de humedad, mayor aprovechamiento de nutrientes, mayor aereación, etc. Esta transformación y corrección de la estructura del suelo se lleva a cabo mediante reacciones químicas principal facultad que tienen los mejoradores, en donde se intercambia el calcio por el sodio y el potasio que son nocivos cuando se encuentran en exceso.

La velocidad de sustitución se debe en gran parte a la solubilidad del mejorador químico en el agua y a las transformaciones que deben sufrir estos antes de poder actuar, pues debe aclararse que la mayor parte de estos productos sufren cambios químicos que van desde la oxidación que se facilita por ciertos microorganismos, hasta la hidratación. Estos cambios necesitan tiempo para poder que el mejorador actúe químicamente como el azufre y el polisulfuro; otros como el yeso requieren disolverse antes de combinarse y su baja solubilidad hacen que reaccionen con lentitud. También el grado de molienda de los mejoradores en polvo influye fuertemente en la solubilidad de ellos y por esta razón en el campo comercial tiene gran importancia la finura del producto que afecta la velocidad de reacción.

La clase y cantidad del mejorador que deberá aplicarse a un suelo depende de las características químicas del suelo, de la velocidad de sustitución que se desee y de las limitaciones económicas que restrinjan la operación.

Existen tres tipos de mejoradores químicos que son:

MEJORADORES ACIDOS:	Acido Sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) Azufre (S)
MEJORADORES FORMADORES DE ACIDO:	Polisulfuro ó azufre cálcico ( $CaS_5$ )
MEJORADORES CALCICOS:	Yeso ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) Cloruro de calcio ( $CaCl_2$ )

Las características químicas del suelo influyen en gran parte para la selección de un mejorador ya que este al incorporarlo requiere de otras sales que deben existir en el suelo y que al reaccionar forman otros compuestos que son de caracter benéfico por ejemplo al agregar azufre es necesario que en el suelo exista calcio para formar el sulfato de calcio, siendo ésta la sal que rescata al sodio.

La selección de cualquier mejorador químico para su aplicación en un suelo está influenciada por los factores siguientes:

- a) Contenido de carbonatos alcalinotérreos y pH.
- b) El tiempo que requiere el mejorador para reaccionar con el suelo.
- c) El costo del mejorador por unidad de calcio soluble donado al suelo directamente o indirectamente al reaccionar con los carbonatos alcalinotérreos.

Respecto al contenido de carbonatos alcalinotérreos y al pH los suelos se pueden dividir en tres grupos:

1. Suelo con carbonatos alcalinotérreos ( $\text{CaCO}_3$  y  $\text{MgCO}_3$ )
2. Suelo sin carbonatos pero con pH mayor de 5
3. Suelo sin carbonatos pero con pH menor de 5

Para los suelos del primer grupo se pueden emplear como mejorados el yeso, ácido sulfúrico, azufre y el polisulfuro.

En suelos pertenecientes al segundo grupo no se pueden emplear - el azufre ni el ácido sulfúrico, porque necesitan de la presencia de carbonatos de calcio y magnesio para poder formar los sulfatos correspondientes.

Con respecto a los suelos del tercer grupo tampoco se pueden usar el azufre ni el ácido sulfúrico, por las mismas razones que en el segundo - grupo, además de que éstos tienen tendencia ácida.

La cantidad de mejorador que deberá aplicarse depende primero del contenido de sodio adsorbido en el suelo y de la cantidad de calcio soluble que puede donar el mejorador . Sabiendo que un miliequivalente de calcio equivale a un miliequivalente de sodio.

El azufre es el elemento necesario para que el sodio sea eliminado y es por ello que los mejoradores se dosifican teniendo en cuenta el porcentaje de ese elemento que contengan y aplicar en cada una de las cantidades equivalentes que proporcionen los mismos kilogramos de azufre.

El cuadro número 2 contiene la toneladas de 5 diferentes mejoradores que son equivalentes a una tonelada de azufre y de calcio respectivamente.

Las sustancias químicas que se emplearon en el presente trabajo para la sustitución del sodio intercambiable fueron el ácido sulfúrico, yeso y azufre.

El ácido sulfúrico es un líquido viscoso, corrosivo y usualmente tiene un 95% de pureza. Al ser aplicado en los suelos que contengan carbonatos alcalinotérreos inmediatamente reaccionan con el ácido formando yeso -

el cuál surte al suelo de calcio soluble .

CUADRO No. 2 TONELADAS DE PRODUCTOS USADOS PARA LA DESODIZACION EN LOS SUELOS AFECTADOS, EQUIVALENTES A UNA TONELADA DE AZUFRE O DE CALCIO SOLUBLE.

MEJORADOR QUIMICO	% DE PUREZA*	TONELADAS EQUIVALENTES A UNA TON.DE	
		AZUFRE	CALCIO SOLUBLE
Azufre (S)	100	1.00	0.80
Acido Sulfúrico (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	100	3.06	2.48
Sol. de Cal-Azufre	25**	4.17	3.35
Yeso (CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O)	100	5.38	4.30
Cloruro cálcico (CaCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O)	100	4.63	3.70

\* Si el mejorador tiene un pureza distinta se divide el porciento de la pureza indicada en el cuadro por el porciento de su pureza actual y se multiplica por las toneladas correspondientes de azufre.

\*\* La solución de cal-azufre tiene una composición químicamente indefinida y su pureza se expresa a base de su contenido de azufre .

Las reacciones que se llevan a cabo al aplicar ácido sulfúrico en suelos que contengan carbonatos alcalinotérreos podrían ser de dos formas:



El yeso (sulfato de calcio bihidratado) es un mineral blanco que

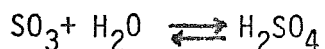
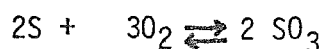
se encuentra en depósitos naturales. Muchos suelos agrícolas están bien abastecidos de esta sal. La solubilidad en el yeso es aproximadamente 0.25% y representa una fuente de calcio soluble. Puede obtenerse con una pureza desde un 50% hasta un 95% ó más; el grado de fineza es importante en el yeso al entrar en solución.

La reacción que se lleva a cabo se presenta por medio de la siguiente ecuación:



El azufre es un mineral de color amarillo y tiene un rango de pureza de 50 a 99% y no es soluble en agua ni presenta una fuente de calcio soluble para el suelo. Al ser aplicado al suelo sufre oxidaciones sucesivas en las que intervienen microorganismos y que en presencia de agua y aire llega a la forma final de ácido sulfúrico hasta formar yeso. El azufre en forma pulverizada reacciona más rápido que si se aplica en pedregones, además es más fácilmente arrastrado por el agua, pero en pedregones es más fácil de aplicar y causa menor irritación en la piel y en los ojos.

Las ecuaciones siguientes nos muestran las reacciones que se realizan:



CAPITULO III. MATERIALES Y METODOS EMPLEADOS.



### III. MATERIALES Y METODOS EMPLEADOS

El trabajo presente se realizó en el Laboratorio de Suelos y Aguas del Departamento de Ingeniería de Riego y Drenaje del Distrito de Riego No. 43 de la SARH en el Estado de Nayarit.

El área que se seleccionó de las zonas afectadas, como representativa pertenece al Ejido Aután, Municipio de San Blas. El muestreo completamente al azar cubrió una superficie de 15 hectáreas y en cada sitio el suelo fue tomado de 0-60 cms. de profundidad; una vez colectadas el número total de 30 muestras se procedió a mezclarlas hasta obtener una muestra resultante lo suficientemente homogeneizada para considerarse como representativa.

Inicialmente se le practicó un análisis químico al suelo para conocer sus condiciones originales, consistiendo en la determinación cuantitativa de los elementos alcalinos y alcalinotérreos en forma de cationes, así como de los aniones más abundantes. Para esto se hicieron preparaciones para obtener pasta saturada y extracto de saturación en el cuál se verificaron las determinaciones de los iones calcio y magnesio siguiendo el método de titulación con versenato; para las determinaciones de sodio y potasio solubles se hicieron por medio del fotómetro de flama. Los aniones se determinaron volumétricamente titulando con nitrato de plata los cloruros; con ácido sulfúrico los carbonatos y bicarbonatos y con versenato los sulfatos. También fue analizado cuantitativamente en su capacidad de intercambio catiónico y su contenido de sodio intercambiable, utilizando el fotómetro de flama; habiéndose realizado también las determinaciones de conductividad eléctrica y pH del suelo. Las determinaciones citadas anteriormente se encuen-

trán debidamente descritas en el manual 60 del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de Norteamérica.

Se llevó a cabo un análisis de composición de partículas por tamaño (textura), siguiendo el método de G.J. Bouyoucos; así como también de conductividad hidráulica.

Los materiales que se usaron para este trabajo de investigación fueron los siguientes:

- a) sustancias químicas para el desplazamiento del sodio adsorbido: ácido sulfúrico, yeso, azufre, y agua.
- b) dispositivo de incubación.

Los mejoradores químicos fueron agregados al suelo en base a la cantidad de sodio adsorbido por sustituir, para lo cual se siguió el mecanismo descrito en el cuadro número 3.

CUADRO No.3 MECANISMO SEGUIDO PARA EL DESPLAZAMIENTO DE SODIO ADSORBIDO.

SODIO POR SUTITUIR (meq/100 grs.de sue lo)	MILIEQUIVALENTES DE MEJO RADOR(grs/meq)	MEJORADOR QUIMICO (grs/100 grs. de suelo)
* 7.66	x 0.016 (S)	= 0.1226
7.66	x 0.049 (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	= 0.3753
7.66	x 0.086 (CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O)	= 0.6588

\* Cantidad de sodio en miliequivalentes por sustituir. Los cálculos para la obtención de esta cantidad se tratarán en el estudio matemático de los parámetros a controlar .

Considerando que las sustituciones entre el mejorador químico-aplicado y el sodio adsorbido, no son de caracter estrictamente cuantitativo

debido a la interferencia que presentan las sales solubles y a la imposibilidad de una incorporación homogénea del mejorador en el suelo, se procedió a utilizar el criterio de adicionar los mejoradores químicos para obtener teóricamente una sustitución de 100%, 150% y 200% de sodio adsorbido por reemplazar y que a la vez dejaría al suelo tratado sin problemas respecto a este elemento intercambiable.

A continuación se presentan las dosis utilizadas de los mejoradores químicos en los tres porcentajes de sustitución .

CUADRO No. 4 DOSIFICACIONES DE LOS MEJORADORES QUIMICOS UTILIZADOS EN LOS TRES PORCENTAJES DE SUSTITUCION POR CADA 100 GRS. DE SUELO.

DOSIS	GRAMOS DE MEJORADOR QUIMICO POR CADA 100 GRS. DE SUELO		
	ACIDO SULFURICO	YESO	AZUFRE
100%	0.3753	0.6588	0.1226
150%	0.5629	0.9882	0.1839
200%	0.7506	1.3176	0.2452

Finalmente se procedió a calcular las cantidades de mejoradores químicos a usar en base a 1,500 grs. de suelo que fue la muestra que se utilizó en la incubación.

CUADRO No. 5 DOSIFICACIONES DE AC. SULFURICO DENSIDAD 1.84, YESO Y AZUFRE DE 80% y 85% DE PUREZA RESPECTIVAMENTE, UTILIZADOS PARA CADA 1,500 GRS. DE SUELO.

DOSIS	ACIDO SULFURICO (MILILITROS)	YESO (GRAMOS)	AZUFRE (GRAMOS)
100%	3.06	12.35	2.16
150%	4.59	18.53	3.24
200%	6.12	24.70	4.33

## DISPOSITIVOS DE INCUBACION

Para este propósito se usaron botellas de una capacidad aproximada de 2,000 ml. a las cuales se les eliminó la base (fig.2). En la parte del cuello de la botella se colocó grava del número 2 e inmediatamente después - un disco de alambre y sobre éste un disco de papel filtro, habiéndose colocado inicialmente en el orificio de salida un tapón de rosca con perforaciones el cuál permitió lixiviaciones posteriores.

Muestras y mejoradores fueron mezclados lo más homogéneamente posible y colocados en cada uno de los recipientes descritos anteriormente.

Con la finalidad de que los mejoradores químicos actuaran más eficazmente se mantuvieron los suelos a una humedad de capacidad de campo, calculada ésta por el método de la Olla de Presión y se dejó reposar al suelo - por un período de 80 días. Después de este lapso de tiempo se dispuso a agregar agua de riego a los recipientes con suelo , con el propósito de lavar las sales solubles originales y de reciente formación, recogiendo el lixiviado - y determinándole su conductividad eléctrica así como elementos alcalinos para observar la variación en la disminución de éstos conforme se efectuaba el lavado. Cuando el suelo fue liberado del exceso de sales solubles - éste fue removido del recipiente, secado, molido y tamizado con malla No. 10 con el objeto de practicarle nuevamente determinaciones de conductividad hidráulica, capacidad de intercambio catiónico, sodio intercambiable, pH y textura.

#### CAPITULO IV. EVALUACION DEL AGUA EMPLEADA.

#### IV. EVALUACION DEL AGUA EMPLEADA

Calidad del agua de riego es el término que se utiliza para indicar la conveniencia o limitación de ésta con fines de riego de cultivos agrícolas, para cuya determinación generalmente se toman como base las características químicas del agua, las propiedades de los suelos y las condiciones de los suelos mismos y aguas.

En el caso de recuperación de suelos salino-sódicos con ayuda de mejoradores químicos, la calidad del agua de riego es otro factor de importancia. Una agua de buena calidad que tenga suficiente calcio y magnesio en proporción de uno ó más con el sodio ayuda a la desodización durante la lixiviación y a reducir la cantidad de mejorador necesario para la eliminación del exceso de sodio.

En general las aguas que se emplean para riego presentan concentraciones relativamente bajas de sales, sin embargo ante el peligro de un mal drenaje o de riegos insuficientes para lixiviar las sales se puede favorecer la acumulación de ellas en el suelo y por consiguiente se llegará a precipitar el calcio, presentando modificaciones estructurales por el efecto del sodio.

La calidad del agua se determina de acuerdo a los siguientes factores:

1. Contenido total de sales solubles
2. Concentración relativa del sodio con respecto a otros cationes y su efecto en las características físicas del suelo o sea el peligro de acumulación de sodio en el suelo.
3. Concentraciones de iones tóxicos y su efecto en los cultivos agrícolas.

Para cada uno de estos criterios se tienen diferentes índices--  
cuantitativos como se ilustra en el cuadro No. 6.

CUADRO NO. 6 CRITERIOS E INDICES DE CLASIFICACION DE AGUAS DE RIEGO

CRITERIOS	INDICES	ABREVIATURAS
1. Contenido de sales solubles:	a) Conductividad Eléctrica	C E
	b) Salinidad Efectiva	S E
	c) Salinidad Potencial	S P
2. Efecto probable del sodio sobre las características físicas del suelo:	a) Relación de Adsorción de Sodio.	R A S
	b) Carbonato de Sodio Residual.	C S R
	c) Porcentaje de Sodio Posible.	P S P
3. Contenido de iones tóxicos para las plantas:*	a) Contenido de Boro	Bo
	b) Contenido de Cloruros	Cl

\* El estudio de estos elementos queda fuera de los objetivos de este trabajo de investigación, por lo tanto no se detallarán.

A continuación se discute cada uno de los índices y se explica la forma de calcularlos.

1. Contenido de sales solubles.

El efecto nocivo de las sales solubles, se debe principalmente al aumento de la presión osmótica en la solución del suelo que está en contacto con las raíces. La magnitud de este esfuerzo no solamente dependerá del contenido total de sales sino también del tipo de sales solubles en el agua de riego, dado que varias de ellas como los carbonatos de calcio y mag

nesio al formar parte de la solución del suelo y bajar el grado de humedad se favorece su precipitación con lo que el contenido total de sales disminuye y en consecuencia también la presión osmótica.

Se ha observado que la concentración total de sales del agua al incorporarse al suelo después de los procesos de evapotranspiración aumenta aproximadamente de 5 a 10 veces el valor de su concentración .

Para medir el efecto de las sales solubles en el agua de riego se tienen los siguientes índices.

1.a) Conductividad Eléctrica(CE)\* Generalmente se expresa en microhos/cm a 25°C. Su valor se determina en forma rápida y precisa en el laboratorio a través del puente de conductividad eléctrica (Conductímetro).

La clasificación de las aguas de acuerdo a su conductividad eléctrica se observa en el cuadro No. 7

CUADRO No. 7 CLASIFICACION DE LAS AGUAS DE RIEGO DE ACUERDO A SU CE A 25°C EN MICROMHOS/CM.

CLASIFICACION	INDICE	CLASE
Agua de Baja Salinidad	100-250	C <sub>1</sub>
Agua de salinidad media	250-750	C <sub>2</sub>
Agua altamente salina	750-2250	C <sub>3</sub>
Agua muy altamente salina	mayor de 2250	C <sub>4</sub>

\* La conductividad Eléctrica de un mho/cm es la recíproca de la resistencia eléctrica en ohm de un conductor metálico que tiene un centímetro de largo y un área transversal de 1 cm<sup>2</sup>.

1.b) Salinidad Efectiva: Es una estimación más real del peligro potencial de las sales del agua de riego al llegar a formar parte de la so



lución del suelo; pues toma en cuenta la precipitación probable de los carbonatos de calcio y magnesio y sulfato de calcio, los que por consiguiente dejan de participar en la elevación de la presión osmótica de la solución del suelo. Este proceso es más notable cuando las aguas tienen un alto contenido de carbonatos y bicarbonatos.

La salinidad efectiva se calcula con alguna de las siguientes fórmulas.

Si  $Ca > CO_3 + HCO_3 + SO_4$  entonces:

$$SE = \text{Suma de cationes} - (CO_3 + HCO_3 + SO_4)$$

Si  $Ca < CO_3 + HCO_3 + SO_4$  pero  $Ca > CO_3 + HCO_3$  entonces:

$$SE = \text{suma de cationes} - Ca$$

Si  $Ca < CO_3 + HCO_3$ ; pero  $Ca + Mg > CO_3 + HCO_3$  entonces:

$$SE = \text{Suma de cationes} - (CO_3 + HCO_3)$$

Si  $Ca + Mg < CO_3 + HCO_3$  entonces  $SE = \text{de cationes} * -(Ca + Mg)$

\* Si la suma de cationes es menor que la de aniones, deberá emplearse la suma de aniones en su lugar.

Todos los iones se expresan en meq/lt

1.c) Salinidad Potencial: (SP): Cuando la humedad aprovechable del suelo disminuye a niveles inferiores de 50%, las últimas sales que quedan en solución son los cloruros y parte de los sulfatos. La salinidad potencial es un índice para estimar el peligro de éstas últimas sales que quedan en solución a bajos niveles de humedad. Este índice se calcula por la siguiente fórmula:

$$SP = Cl + 1/2 SO_4 \quad (\text{ en meq/lt } )$$

Las aguas de riego se clasifican de acuerdo a los índices de salinidad efectiva tal y como se muestra en el cuadro No.8

CUADRO No. 8 CLASIFICACION DEL AGUA DE RIEGO DE ACUERDO A SU SALINIDAD EFECTIVA EN MEQ/LT.

CLASIFICACION	CLASE	INDICE
1) Primera clase	Buena (B)	Menor de 3
2) Segunda clase	Condicionado (C)	de 3 a 15
3) Tercera clase	No recomendable (NR)	Mayor de 15

La clasificación de las aguas de acuerdo a los índices de salinidad potencial se muestran en el cuadro No. 9

CUADRO No. 9 CLASIFICACION DEL AGUA DE RIEGO BASADA EN LA SALINIDAD POTENCIAL EXPRESADA EN MEQ/LT.

CLASIFICACION	CLASE	INDICE
1) Primera clase	Buena (B)	menor de 3
2) Segunda clase	Condicionada (C)	de 3-15
3) Tercera clase	No recomendable (NR)	mayor de 15

## 2. Efecto probable del Sodio sobre las características físicas del suelo:

Cuando las aguas de riego contiene cantidades considerables de sodio en solución, éste se acumula paulatinamente en el suelo y alcanza ciertas concentraciones elevadas en relación con los otros cationes disueltos, sustituye al Calcio y mercurio del complejo de intercambio, ocasionando un desequilibrio eléctrico en la mezcla coloidal, en la que deja cargas

negativas residuales por lo que las partículas se repelen y como consecuencia, el suelo se deflocula y pierde su estructura. Debido a esto, la permeabilidad del suelo al aire y al agua disminuye, se favorece la formación de costras, lo cual afecta e impide el desarrollo normal de los cultivos.

Para estimar este efecto se tienen los siguientes índices:

2.a) Relación de adsorción de sodio (R.A.S.): es uno de los índices más exactos para medir el peligro de sodificación que presenta el agua de riego. Su cálculo es sumamente sencillo y además está correlacionado con el porcentaje de sodio intercambiable del suelo que está en equilibrio con el agua. De acuerdo a esto entre mayor sea el valor del RAS mayor será el PSI del suelo existiendo un peligro mayor de sodificación del mismo.

La relación de adsorción de sodio se calcula con la siguiente fórmula:

$$RAS = \frac{Na^+}{\frac{Ca^{++} + Mg^{++}}{2}} *$$

\* Todos los cationes deben ser expresados en meq/lt.

Los rangos de clasificación del agua de acuerdo a este índice se muestran en el cuadro No. 10.

CUADRO No. 10 CLASIFICACION DEL AGUA DE RIEGO DE ACUERDO A SU RELACION DE ADSORCION DE SODIO.

CLASIFICACION	INDICE (RAS)	CLASE
Agua de bajo contenido de sodio	0-10	S <sub>1</sub>
Agua de contenido medio de sodio	10-18	S <sub>2</sub>
Agua con elevadas cantidades de sodio	18-26	S <sub>3</sub>
Agua con cantidades muy grandes de sodio	mayor de 26	S <sub>4</sub>

También se emplea para clasificar el agua de acuerdo a su conductividad eléctrica y a su relación de adsorción de sodio el diagrama de Wilcox que se muestra en la figura 3 del apéndice.

2.b) Carbonato de sodio residual (CSR): Cuando en el agua de riego el contenido de carbonatos y bicarbonatos es mayor que el calcio y magnesio, existe la posibilidad de que se forme carbonato de sodio y debido a su alta solubilidad puede permanecer en solución aún después de haber precipitado los carbonatos de calcio y magnesio. Bajo estas condiciones la concentración total y relativa del sodio puede ser suficiente para desplazar al calcio y magnesio del complejo de intercambio produciendo la defloculación del suelo.

Este índice se calcula por medio de la fórmula:

$$CSR = (CO_3^{2-} + HCO_3^{-}) - (Ca^{2+} + Mg^{2+})$$

Donde todos los iones se expresa en meq/lt

Cuando la diferencia es negativa no existe el problema y el valor del CSR se considera igual a cero.

La clasificación de las aguas de riego de acuerdo al índice anterior se puede observar en el cuadro No. 11.

CUADRO No. 11 CLASIFICACION DE LAS AGUAS DE RIEGO DE ACUERDO A LOS VALORES DE CARBONATO DE SODIO RESIDUAL (CSR).

CLASE	VALOR DEL CSR (meq/lt)
BUENA	Menor de 1.25
CONDICIONADA	De 1.25 a 2.50
NO RECOMENDABLE	Mayor de 2.50

2.c) Por ciento de Sodio Posible:(PSP): El peligro de desplazamiento del calcio y el magnesio por el sodio en el complejo de intercambio empieza cuando el contenido de sodio en solución es mayor que la mitad de los cationes disueltos. Se le denomina Por ciento de Sodio Posible a este peligro porque está calculado en base al ión sodio y a la salinidad efectiva :

$$PSP = \frac{Na^+}{SE} \times 100$$

Donde el sodio y Salinidad Efectiva se expresan en meq/lit.

Se puede apreciar en el cuadro No.12 la clasificación de las aguas de riego tomando en cuenta el índice Por ciento de Sodio Posible.

CUADRO No. 12 CLASIFICACION DE LAS AGUAS DE RIEGO DE ACUERDO A SU PORCIENTO DE SODIO POSIBLE.

CLASE	VALOR DEL PSP
BUENA	Menor de 50
CONDICIONADA	Mayor de 50

#### ANALISIS DEL AGUA DE RIEGO EMPLEADA

El agua de riego empleada para lavar el exceso de sales solubles en el suelo problema se tomó del canal principal Km 17 de la Unidad de Riego - Río Santiago Margen Izquierda, cuyas características químicas y físicas, así como los índices de clasificación se presentan a continuación.

CUADRO No. 13 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL AGUA DE RIEGO

COLOR	SABOR	OLOR	TURBIDEZ	SEDIMENTO
INCOLORA	INSIPIDA	INODORA	LIGERAMENTE TURBIA	ARCILLOSO

CUADRO No. 13 A. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DEL AGUA DE RIEGO

CE a 25°C (micromhos/cm)	pH	Miliequivalentes/ litro							
		Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>=</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	Cl <sup>-</sup>
0.14	7.4	0.7	0.3	0.35	0.05	0.0	1.0	0.35	0.30

CUADRO No.14 INDICES DE CLASIFICACION DEL AGUA DE RIEGO

RAS	CLASE	Miliequivalentes/litro			PSP
		SE	SP	CSR	
1.56	C <sub>1</sub> -S <sub>1</sub>	0.40	0.32	0.0	87.5

INTERPRETACION: El agua analizada de acuerdo a los índices de clasificación puede ser aplicada en todos los suelos normales sin peligro de acumulación de sales y sin requerir volúmenes de sobrieriego.

Para efectos de lavado de suelos salino-sódicos el único índice elevado es el PSP cuyo valor es 87.5%, lo que indica que el sodio será fijado al precipitarse todos los carbonatos y bicarbonatos que puede ocasionar una disminución lenta pero constante de la permeabilidad, sin embargo este peligro es contrarrestado por los mejoradores químicos que se incorporarán al suelo.

CAPITULO V. DISEÑO EXPERIMENTAL SELECCIONADO.

### V. DISEÑO EXPERIMENTAL SELECCIONADO

El diseño utilizado es de tipo factorial en donde intervienen como factores mejoradores químicos y dosis con tres niveles y tres repeticiones,-- haciendo un total de 27 unidades experimentales.

#### ANALISIS FISICO- QUIMICO DEL SUELO

Las principales características físicas y químicas que presentó el suelo bajo estudio originalmente se observan a continuación.

CUADRO No. 15 CARACTERISTICAS FISICAS Y QUIMICAS DE LA MUESTRA REPRESENTATIVA DEL SUELO PROBLEMA.

CATIONES	CONCENTRACION (meq/lt)	ANIONES	CONCENTRACION (meq/lt)
Ca <sup>++</sup>	58.0	CO <sub>3</sub> <sup>=</sup>	0.0
Mg <sup>++</sup>	37.0	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	9.0
Na <sup>+</sup>	146.0	SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	89.0
K <sup>+</sup>	2.0	Cl <sup>-</sup>	147.0
TOTAL	243.0	TOTAL	245.0
RAS	21.2	PSI calc.	23.1

CE a 25°C (mmhos/cm)	pH	CIC (meq/100grs suelo)	*SI (meq/100grs. suelo)	PSI	**CH (cm/hr)	TEXTURA
24.0	8.2	30.8	9.2	29.87	0.25	arcilla



\* Sodio Intercambiable

\*\* Conductividad Hidráulica.

Los resultados anteriores implican que el suelo es de clasificación salino-sódico, ya que la conductividad eléctrica (CE) a 25°C es mayor de 4 mmhos/cm y el PSI es mayor de 15. (FIGURA No.1.)

Debido al objetivo básico del presente estudio de disminuir el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) por medio de mejoradores químicos y lavados con agua, que consecuentemente incrementaría la velocidad de infiltración del terreno afectado, se procedió a determinar un nivel de PSI que no implicara futuros problemas en las condiciones físicas del suelo --tratado. Se acordó reducir de 29.87% el valor del PSI hasta 5%. Los cálculos que se hicieron para este propósito fueron los siguientes:

$$PSI = \frac{SI}{CIC} \times 100$$

$$PSI = \frac{9.2}{30.8} \times 100 \quad ; \quad PSI = 29.87$$

Como se determinó dejar 5% de PSI en el suelo se dispuso a usar el razonamiento siguiente:

$$SI \text{ final} = \frac{9.2 \text{ meq/ } 100 \text{ grs. de suelo } SI \text{ inicial} \times 5 \text{ PSI}}{29.87 \text{ PSI}}$$

$$SI \text{ final} = 1.54 \text{ meq/100 grs. de suelo}$$

El sodio por sustituir en meq/100 grs. de suelo se calcula sacando la diferencia aritmética del SI inicial en el suelo problema y el SI que se desea dejar en el suelo ó SI final.

SI por sustituir = SI inicial - SI final

SI por sustituir = (9.2 - 1.54 ) meq/100 grs. de suelo

SI por sustituir = 7.66 meq/100 grs de suelo.

La cantidad de Sodio Intercambiable en porciento por eliminar en el suelo problema se calcula de la diferencia del PSI inicial en el suelo y el PSI final , es decir el que se desea dejar en el suelo.

PSI por eliminar = PSI inicial - PSI final

PSI por eliminar =(29.87 - 5.0) %

PSI por eliminar = 24.87 %

Inmediatamente después del período de incubación de 80 días se procedió a verificar las lixiviaciones de los tratamientos de suelos para disminuir la concentración de sales solubles originales así como de reciente formación por efecto de los mejoradores químicos, las cuales fueron suspendidos al obtener una CE a 25°C de 2mmhos/cm en las aguas de drenaje de cada una de las unidades experimentales (fig.4). El cuadro No. 16 muestra los resultados de comparar el valor de CE a 25°C inicial del extracto de saturación del suelo problema con los valores de CE final a 25°C obtenidos en los extractos de saturación de cada tratamiento después del período de incubación.

CUADRO No. 16 CONDUCTIVIDADES ELECTRICAS INICIAL Y FINAL TOMADAS DE LOS EXTRAC  
TOS DE SATURACION Y LA DIFERENCIA ENTRE AMBAS.

MEJORADOR	DOSIS	REPETICION	mmhos/cm a 25°C		
			CE inicial	CE final	Diferencia de las CE
ACIDO SULFURICO	100%	1	24.0	1.28	22.72
		2	24.0	1.16	22.84
		3	24.0	2.65	21.35
	150%	1	24.0	1.62	22.38
		2	24.0	2.61	21.39
		3	24.0	1.42	22.58
	200%	1	24.0	3.42	20.58
		2	24.0	2.61	21.39
		3	24.0	4.95	19.05
YESO	100%	1	24.0	1.45	22.55
		2	24.0	2.56	21.44
		3	24.0	1.34	22.66
	150%	1	24.0	3.21	20.79
		2	24.0	3.32	20.68
		3	24.0	1.48	20.52
	200%	1	24.0	3.57	20.43
		2	24.0	2.13	21.87
		3	24.0	3.54	20.46
AZUFRE	100%	1	24.0	2.89	21.11
		2	24.0	4.05	19.95
		3	24.0	2.46	21.54
	150%	1	24.0	3.50	20.50
		2	24.0	3.16	20.84
		3	24.0	3.15	20.85
	200%	1	24.0	5.00	19.00
		2	24.0	6.20	17.80
		3	24.0	4.87	19.30

CUADRO No. 17 VALORES PROMEDIO DE LA CONDUCTIVIDAD ELECTRICA DE LAS TRES REPE  
TICIONES OBTENIDAS EN LOS EXTRACTOS DE SATURACION.

MEJORADOR	DOSIS	mmhos/cm a 25°C		
		CE inicial	CE final	Diferencia de la CE
ACIDO SULFURICO	100%	24.0	1.70	22.30
	150%	24.0	1.49	22.51
	200%	24.0	3.66	20.34
YESO	100%	24.0	1.78	22.22
	150%	24.0	2.67	21.33
	200%	24.0	3.08	20.92
AZUFRE	100%	24.0	3.13	20.87
	150%	24.0	3.27	20.73
	200%	24.0	5.36	18.64

La tabla que se presenta a continuación contiene los Porcentajes de Sodio Intercambiable logrados por los tres mejoradores químicos y las tres dosis de aplicación en cada una de las tres repeticiones.

CUADRO No. 18 PORCENTAJES LOGRADOS EN LA DISMINUCION DE SODIO INTERCAMBIABLE POR CADA TRATAMIENTO Y REPETICION (X).

REPETICIONES	TRATAMIENTOS									TOTAL POR REPETICIONES ( $X_R$ )
	Ac/100	Ac/150	Ac/200	Y/100	Y/150	Y/200	S/100	S/150	S/200	
I	22.35	21.12	26.83	22.99	25.19	25.04	22.01	20.80	22.81	209.14
II	21.43	22.76	25.37	22.92	27.22	24.89	18.91	23.32	22.76	209.58
III	20.84	21.48	24.97	23.05	23.20	24.95	20.32	24.34	22.78	205.93
TOTAL POR TRATAMIENTOS ( $X_T$ )	64.62	65.36	77.17	68.96	75.61	74.88	61.24	68.46	68.35	624.65

Promediando los valores de cada repetición se forma el cuadro siguiente.

CUADRO No. 19 PORCENTAJES DE SODIO INTERCAMBIABLE PROMEDIOS LOGRADOS DE TRES REPETICIONES LOGRADOS EN LA DISMINUCION DEL MISMO.

MEJORADORES	D O S I S		
	100%	150%	200%
ACIDO SULFURICO	21.54	21.79	25.72
YESO	22.99	25.20	24.96
AZUFRE	20.41	22.82	22.78

Si consideramos que el Porcentaje de Sodio Intercambiable que se planeó abatir teóricamente es de 24.87%, observando la tabla anterior se puede apreciar que el Yeso en las dosificaciones de 150% y 200% así como el Acido Sulfúrico en su dosificación de 200% cumplen en forma totalmente satisfactoria la sustitución esperada. Para comprobar ésto se hizo un estudio estadístico utilizando los datos del cuadro No. 18.

CUADRO No. 20 SUMA DE PORCENTAJES DE SODIO INTERCAMBIABLE Y TOTALES POR DOSIS Y POR MEJORADORES.

DOSIS	MEJORADORES			TOTAL POR DOSIS ( $X_b$ )
	ACIDO SULFURICO	YESO	AZUFRE	
100%	64.62	68.96	61.24	194.82
150%	65.36	75.61	68.46	209.43
200%	77.17	74.88	68.35	220.40
TOTAL POR MEJORADOR ( $X_a$ )	207.15	209.45	198.05	

$n$  = número de mejoradores = 3

$q$  = número de dosis = 3

$r$  = número de repeticiones = 3

$K$  = número de tratamientos =  $3 \times 3 = 9$

$N$  = número total de observaciones =  $9 \times 3 = 27$

$P$  = número de interacciones dosis/mejoradores = 3

Con los datos anteriores se calculó la suma general de cuadrados para poder efectuar el análisis de varianza .

$$\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{N} = (22.35)^2 + (21.12)^2 + (26.83)^2 + \dots + (22.78)^2 - \frac{(624.65)^2}{27}$$

$$\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{N} = 14543.17 - \frac{390187.62}{27} = 14543.17 - 14451.39$$

$$\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{N} = 91.78$$

La suma de los cuadrados correspondientes a los mejoradores será:

$$\frac{\sum(x_a)^2}{K} - \frac{(\sum X)^2}{N} = \frac{(207.15)^2 + (219.45)^2 + (198.05)^2}{9} - \frac{(624.65)^2}{27}$$

$$\frac{\sum(x_a)^2}{K} - \frac{(\sum X)^2}{N} = 14,477.02 - 14,451.39 = 25.63$$

La suma de los cuadrados correspondientes a las dosis será:

$$\frac{\sum(x_b)^2}{K} - \frac{(\sum X)^2}{N} = \frac{(194.82)^2 + (209.43)^2 + (220.40)^2}{9} - 14,451.39$$

$$\frac{\sum(x_b)}{K} - \frac{(\sum X)^2}{N} = \frac{130,391.91}{9} - 14,451.39 = 14,487.99 - 14,451.39$$

$$\frac{\sum(x_b)^2}{K} - \frac{(\sum X)^2}{N} = 36.60$$

La suma de cuadrados correspondientes a la variabilidad entre dosis y mejoradores será:

$$\frac{\sum(x_T)^2}{P} - \frac{(\sum X)^2}{N} = \frac{(64.62)^2 + (65.36)^2 + (77.17)^2 + \dots + (68.35)^2}{3} - 14,451.39$$

$$\frac{\sum(x_T)^2}{P} - \frac{(\sum X)^2}{N} = \frac{43,591.07}{3} - 14,451.39 = 14,530.36 - 14,451.39$$

$$\frac{\sum(x_T)}{P} - \frac{(\sum X)^2}{N} = 78.97$$

La suma general de cuadrados atribuible al error experimental será:

$$S.C.e = 91.78 - (25.63 + 36.60 + 16.74)$$

$$S.C.e = 12.81$$

El número de grados de independencia será como sigue:

Para la variación total:

$$N - 1 = 27 - 1 = 26$$

Para la variación entre mejoradores:

$$n - 1 = 3 - 1 = 2$$

Para la variación entre dosis:

$$q - 1 = 3 - 1 = 2$$

El correspondiente a la interacción entre dosis y mejoradores:

$$(n - 1) (q - 1) = 2 \times 2 = 4$$

El correspondiente al Error Experimental:

$$26 - (2 + 2 + 4) = 18$$

El análisis de varianza indica lo siguiente:

CUADRO No. 21 Análisis de la variación para mejoradores, dosis e interacciones de las mismas con respecto a disminución de valores de Porcentaje de Sodio Intercambiable. (Los valores de F se calculan utilizando la tabla del apéndice con los datos de G.I. del Error Experimental y de las subpoblaciones en estudio.).

CAUSAS	G. I.	S. C.	S <sup>2</sup>	F	F(0.05)	F(0.01)
Mejoradores	2	25.63	12.81	18.04**	3.55	6.01
Dosis	2	36.60	18.30	25.77**	3.55	6.01
Mejoradores/dosis	4	16.74	4.18	5.88*	2.93	4.58
Error Experimental	18	12.81	0.71			
Total	26	91.81				

\*\* Diferencia altamente significativa

\* Diferencia significativa.

La prueba "F" aplicada a la variabilidad entre mejoradores es altamente significativa pues el valor 18.04 es mucho mayor que 3.55 y 6.01 para las probabilidades de 5%(+) y de 1% (+) respectivamente de acuerdo a los Grados de Independencia de los mejoradores y del Error Experimental. Se deduce entonces que el tipo de mejorador influye en la obtención del Porcentaje de Sodio Intercambiable deseado para la recuperación del suelo que se está tratando.



En lo referente a la dosis el valor calculado de la prueba "F" resulta 10.56 que es mucho mayor que 3.55 al 5% de probabilidad y que 6.01 al 1% para los grados de independencia respectivos de las dosis y el error experimental. También existe una variabilidad altamente significativa y se puede concluir que la dosis también influye en la obtención del valor deseado de PSI para recuperar el suelo en las condiciones del estudio realizado.

La prueba "F" en interacción entre dosis y mejoradores nos indica que es significativa por lo tanto que también influyen en la recuperación del suelo problema hasta el valor de PSI deseado, ya que el valor "F" de 5.88 es mayor que 2.93 y 4.58 para las probabilidades al 5% y 1% respectivamente de acuerdo a los grados de independencia de la interacción entre dosis y mejoradores, y del error experimental; sin embargo en este caso como el número de subpoblaciones es superior a dos, la prueba de "F" no es suficiente para indicarnos cual de los mejoradores y las dosis en forma individual es el indicado ya que son diferentes entre sí. Es por ello que se procede a realizar la prueba "t".

El Error Típico de una diferencia entre valores de PSI de mejoradores a una misma dosis es:

$$E T_D = (\sqrt{2}) (E T_f), \text{ donde } E T_f = \sqrt{\frac{V_e}{K}}$$

Siendo que:

$E T_f$  = Error Típico de cada familia o subpoblación

$V_e$  = Varianza del Error Experimental

$K$  = Número de valores de cada familia

Efectuando cálculos:

$$E T_f = \sqrt{\frac{0.71}{3}} = 0.49$$

$$E T_D = (\sqrt{2}) (0.49) = 0.696$$

Con el número de Grados de Independencia (GI) para el error experimental que es 18 se busca en la tabla de "t" y se tiene para 0.05 un valor de 2.101; multiplicando este último valor por el Error Típico de la diferencia se obtiene:

$$(E T_D) (t_{0.05}) = 0.696 \times 2.101 = 1.46 \text{ Valor límite para las diferencias.}$$

Por tanto para que una diferencia sea significativa bastará que sea mayor que 1.46 ó sea:

$$\text{Si } E T_D \times t_{0.05} < D \text{ es significativa.}$$

Con los valores de PSI de cada mejorador a cada dosis del cuadro - No. 19 se tiene:

Para la dosis 100%                      Yeso = 22.99

Acido = 21.54

Azufre = 20.41

Yeso - Acido = 22.99 - 21.54 = 1.45 < 1.46 (equivalente)

Yeso - Azufre = 22.99 - 20.41 = 2.58 > 1.46

Acido - Azufre = 21.54 - 20.41 = 1.13 < 1.46 (equivalente)

Para la dosis 150%                      Yeso = 25.20

Azufre = 22.82

Acido = 21.79

Yeso - Azufre = 25.20 - 22.82 = 2.38 > 1.46

Yeso - Acido = 25.20 - 21.79 = 3.41 > 1.46

Azufre - Acido = 22.82 - 21.79 = 1.03 < 1.46 (equivalente)





CUADRO No. 22 VALORES PROMEDIO DE CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA DESPUES DE LOS TRATAMIENTOS DE RECUPERACION DEL SUELO.

MEJORADOR	C H EN LAS DOSIS (cm/hr)			C H (cm/hr) PROMEDIO
	100%	150%	200%	
ACIDO SULFURICO	0.73	0.93	1.56	1.07
YESO	1.48	2.74	2.84	2.35
AZUFRE	0.87	0.60	0.94	0.80

Como se observa en el cuadro anterior los valores muestran un gran incremento al comparar cualquiera de ellos con el valor original (0.25 cm/hr). Los resultados obtenidos señalan además que aún en el caso del azufre en que la cantidad de sodio sustituido en por ciento fue la más baja, se puede apreciar incremento en el valor de la Conductividad Hidráulica.

#### DISCUSION DE RESULTADOS

De acuerdo a los datos cuantitativamente obtenidos en esta investigación se discutirán los resultados en base a los objetivos fundamentales planteados inicialmente en este estudio de tesis.

- A) Velocidad de sustitución de sodio adsorbido ó intercambiable por los diferentes mejoradores químicos con sus distintas dosis.
- B) El incremento de Conductividad Hidráulica de los suelos tratados química y físicamente en este trabajo.

En la fase de desalinización del suelo llevado a cabo inmediatamente después del período de incubación se obtuvieron fluctuaciones en la concentración de sales del lixiviado. Estas fluctuaciones se refieren a las diferencias en Conductividades Eléctricas obtenidas entre adiciones consecutivas de volúmenes de agua (láminas), las cuales se siguieron presentando hasta que alcanzó una profundidad de lámina de 70 cms.

La Conductividad Eléctrica final de los lixiviados oscilaron para cada mejorador como sigue:

- a) Para el azufre en sus tres dosis de 1.14 a 1.62 mmhos/cm a 25°C.
- b) Para el yeso en sus tres dosis de 0.48 a 1.49 mmhos/cm a 25°C
- c) Para el ácido sulfúrico en sus tres dosis de 0.81 a 1.42 mmhos/cm a 25°C.

El comportamiento de los mejoradores químicos durante el proceso de lixiviación con respecto a la Conductividad Eléctrica de los lixiviados puede explicarse tentativamente basandose en la formación de sales solubles que se pudieron haber producido entre un lixiviado y su inmediato anterior.

Con respecto a la velocidad de sustitución de Sodio Intercambiable:

Los resultados indican que la mayor eficiencia para la sustitución de sodio adsorbido corresponde al yeso en sus tres dosis; en seguida el ácido sulfúrico y por último el azufre.

Como el suelo bajo estudio es salino sódico y se encontraron en él cantidades considerables de carbonatos alcalinotérreos, la magnitud de las eficiencias obtenidas pueden ser explicadas por los criterios siguientes:

El yeso aunque con solubilidad limitada (2.5 gr/lt H<sub>2</sub>O) presentó máxima sustitución de sodio adsorbido, probablemente debido a la introducción inmediata de suficientes cantidades de calcio, supuestamente más fácilmente accesibles para intercambiarse, incrementando de esta manera el calcio que se encontraba originalmente adsorbido sobre el material coloidal del suelo. Es posible que la concentración salina de estos suelos haya impedido notablemente una sustitución natural entre los iones alcalinotérreos procedentes de --

carbonatos nativos del suelo y el sodio adsorbido ó intercambiable, implicando en esto que la fuente de calcio libre fue restringida aún más por la presencia de sales solubles originalmente existentes en la solución del suelo.

Al ácido sulfúrico le correspondió una eficiencia media en lo referente a las sustituciones de sodio adsorbido. Basicamente se conoce que los sulfatos en soluciones ácidas incrementan su solubilidad, lo anterior es debido a la tendencia del ión sulfato a combinarse con el hidrógeno lo cual propicia una ionización del sulfato de calcio. Además y considerando los mismos principios básicos se conoce que los ácidos fuertes incrementan la solubilidad de aquéllas sales procedentes de ácidos débiles. En el presente caso las adiciones del ácido sulfúrico a los suelos debieron ocasionar un incremento en la ionización de la mayoría de las sales tanto aquéllas de menor solubilidad como en las de solubilidad media. Lo anterior implica que se incrementó el contenido original de sales solubles en la solución del suelo y por otra parte también se aumentó la posibilidad de que al tener sales de calcio de mayor solubilidad se incrementaran los intercambios del sodio adsorbido por el calcio y procedente de las sales ahora de mayor solubilidad.

Sin embargo lo anterior fue fundamentalmente notable en la dosis más alta de ácido sulfúrico en la que posiblemente hubo un reemplazamiento de iones hidrógeno procedentes directamente de ácido sulfúrico y sodio adsorbido. Lo anterior implica que el incremento de concentración de sales solubles probablemente obstruccionó hasta cierto punto las sustitución sódica y que no fué sino hasta en la dosis máxima de ácido sulfúrico cuando se logró la mayor sustitución.

En el azufre ocupó el tercer lugar en eficiencia por lo que se refiere a sustitución de sodio adsorbido. Como es conocido existen fundamentalmente cinco bacterias quimicautotróficas básicamente capaces de conducir la-

oxidación del azufre hasta llevarlo a su fase final de ácido sulfúrico. Los cinco microorganismos son: Thiobacillus Thiooxidans, Thiobacillus Ferroxi--dans, que funcionan a pH entre 2 a 3.5; los tres restantes que son Thiobacillus Denitrificans, Thiobacillus Thioparus y Thiobacillus Novellus, prefieren condiciones de pH cerca de la neutralidad o ligeramente alcalinos. La oxidación del azufre en polvo aplicado a los suelos es fundamentalmente conducida por intervención del Thiobacillus Thiooxidans, sin embargo el Thiobacillus Thioparus y el Thiobacillus Denitrificans también metabolizan al azufre libre.

Considerando que la reacción de las submuestras incubadas con azufre nunca descendió a valores de pH ácidos, se asume que las bacterias -- que condujeron la oxidación del azufre fueron principalmente la especies -- Thioparus y Denitrificans que funcionaron optimamente en los pH mantenidos durante el período de incubación.

De lo anterior se deduce que habiendose encontrado el Thiobacillus Thiooxidans en un valor de pH no ideal para máxima eficiencia y siendo este microorganismo el responsable principal de las oxidaciones del azufre se podría admitir que este mejorador químico no llegó en su totalidad a ser oxidado a la forma final de ácido sulfúrico y que por lo tanto fue posiblemente el de menor eficiencia con lo que respecta a sustituciones de sodio adsorbido.

#### Referente al incremento de los valores en Conductividad Hidráulica

El orden de eficiencia promedio para los mejoradores en sus tres dosis fue: yeso (2.35 cm/hr) mayor que ácido sulfúrico (1.07 cm/hr) mayor que azufre (0.80 cm/hr) mayor que el testigo (0.25 cm/hr). Puede apreciarse que el orden de eficiencia por lo que respecta a incremento en el valor de Conductividad Hidráulica coincide con el orden de eficiencia por lo que to-



ca a sustitución de sodio adsorbido de los mejoradores químicos estudiados.

Probablemente el yeso logró una mejor floculación en el suelo debido al calcio abastecido por este mejorador, logrando de esta manera una mejor estructura y en consecuencia una mejor geometría interna que propició el incremento en valores de Conductividad Hidráulica.

El ácido sulfúrico al reaccionar con compuestos cálcicos del suelo muy insolubles debió lograr la formación de anhidrita ( $\text{CaSO}_4$ ) que posteriormente al hidratarse llegó a su forma más estable de yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ); esto implica que el calcio solubilizado en esta manera pudo intervenir en la floculación del suelo produciendo una mejor estructura del mismo.

El avance alcanzado por el azufre en la recuperación del suelo puede explicarse en base a su transformación por oxidación hasta ácido sulfúrico, después a anhidrita y yeso mejorando así la estructura del suelo y por lo tanto la Conductividad Hidráulica del mismo, aunque más lentamente que con los otros mejoradores debido a que el proceso de oxidación es tardado.

## CAPITULO VI. EVALUACION ECONOMICA

## VI. EVALUACION ECONOMICA

Los costos de los mejoradores químicos varían de acuerdo a su pureza y al lugar donde se adquieran. Para este estudio se consiguieron precios directos de fabricantes para evitar intermediarios y lograr costos más bajos.

El yeso agrícola con 80% de pureza tiene un precio de \$700.00 por tonelada puesto en el lugar de aplicación (Distrito de Riego No.43) de Guadalajara, Jal. por Yesera El Tigre S.A.

El ácido sulfúrico con 1.84 de densidad tiene un costo por tonelada de \$1,800.00 en las mismas condiciones de entrega que el anterior, enviado por Distribuidora Química de Guadalajara S.A., Jalisco .

El azufre de 85% de pureza cuesta \$1,500.00 /Ton. ,enviado desde Veracruz por Azufrera Panamericana,S.A.

Con los precios anteriores y calculando las condiciones del presente trabajo, de acuerdo a los datos del cuadro No. 5 se obtienen como resultado los costos individuales de cada mejorador químico en sus tres dosis los cuales se muestran en los cuadros 23, 24, y 25.

CUADRO No. 23 COSTO DE ACIDO SULFURICO POR MILILITRO Y POR DOSIS NECESARIA PARA RECUPERAR 1,500 GRAMOS DE SUELO SALINO-SODICO.

DOSIS	ACIDO SULFURICO (mililitros)	COSTO/ML* (centavos)	COSTO TOTAL (centavos)
100%	3.06	0.331	1.01
150%	4.59	0.331	1.52
200%	6.12	0.331	2.03

\*El costo por ml se tomó en base al ácido sulfúrico de densidad 1.84, por lo que 1 Kg. de ácido cuesta \$ 1.80 y el litro \$3.31.

CUADRO No. 24 COSTO DEL YESO AGRICOLA AL 80% DE PUREZA POR GRAMO Y POR DOSIFICACION PARA RECUPERAR 1,500 GRAMOS DE SUELO SALINO-SODICO.

DOSIS	YESO (gramos)	COSTO/GR. (centavos)	COSTO TOTAL (centavos)
100%	12.35	0.07	0.86
150%	18.53	0.07	1.30
200%	24.70	0.07	1.73

CUADRO No. 25 COSTO DE AZUFRE AL 85% DE PUREZA POR GRAMO Y POR DOSIFICACION PARA RECUPERAR 1,500 GRAMOS DE SUELO SALINO-SODICO.

DOSIS	AZUFRE (gramos)	COSTO/GR (centavos)	COSTO TOTAL (centavos)
100%	2.16	0.15	0.324
150%	3.24	0.15	0.486
200%	4.33	0.15	0.650

Conjuntando los costos de los tres mejoradores a las tres dosis ya conocidas tenemos el cuadro No. 26.

CUADRO No. 26 COSTOS DE CADA UNO DE LOS MEJORADORES UTILIZADOS EN CADA DOSIS PARA RECUPERAR 1,500 GRAMOS DE SUELO SALINO-SODICO.

DOSIS	ACIDO SULFURICO (centavos)	YESO 80% (centavos)	AZUFRE 85% (centavos)
100%	1.01	0.86	0.324
150%	1.52	1.30	0.486
200%	2.03	1.73	0.650

Considerando los resultados obtenidos respecto a la disminución del Porcentaje de Sodio Intercambiable el yeso es el que actúa con mayor eficiencia como se vió en el capítulo anterior en las dosis de 150% y 200%, observando el cuadro No. 25 se notará que para recuperar 1,500 grs. de suelo el yeso resulta ser notablemente más económico a excepción del azufre, pero de acuerdo a los resultados este último no es muy efectivo .Lo anterior confirma que el uso del yeso además de ser eficaz resulta lo más económico y - como la dosis de 150% logra reducir el PSI del suelo tratado hasta el valor deseado ;se deduce entonces que es la dosis más recomendable siguiendo en - orden la de 200%. En cambio aunque la dosis de 200% de ácido sulfúrico es eficiente no es costeable porque el costo es demasiado alto.

## CAPITULO VII. CONCLUSIONES

## VII CONCLUSIONES

1. El orden de eficiencia en lo que se refiere a sustituciones de sodio adsorbido considerando los valores promedio de los tres mejoradores en sus tres dosis fue: Yeso mayor que Acido Sulfúrico mayor que Azufre.
2. El orden de eficiencia en lo referente a incrementos de los valores de Conductividad Hidráulica, tomando en cuenta los valores promedio de los tres mejoradores en sus tres dosis fue: Yeso mayor que Acido Sulfúrico mayor que Azufre.
3. El orden de conveniencia económica respecto a costos de los mejoradores químicos y considerando la eficiencia de éstos en cada una de sus dosis fue: Yeso 150% mayor que Yeso 200% mayor que Acido Sulfúrico 200%. Las dosis Yeso 100% ,Acido Sulúrico 100% y 150% , y las tres de Azufre no resultan técnica y económicamente recomendables.
4. Durante el proceso de desalinización no se observó ningún efecto especial de los mejoradores químicos utilizados por lo que respecta a la Conductividad Eléctrica del lixiviado final como estaba programado (CE menor de 2 milimhos/cm a 25°C) .
5. La lámina total necesaria para la desalinización del suelo fue de aproximadamente 70 cms. en los tres casos sin importar el mejorador químico que se utilizó.

## RESUMEN

Conociendo el problema que representan los suelos afectados por sales y por sodio de cualquier región agrícola y tomando en cuenta en forma cualitativa los problemas básicos de las zonas bajas del Distrito de Riego No. 43 , se decidió conducir el presente trabajo experimental con el objeto de tener un conocimiento más preciso de las características físicas y químicas de estos suelos y así clasificarlos debidamente. Una vez hecho esto se procedió a llevar a cabo tratamientos físico-químicos que permitieran eliminar el exceso de sales solubles y disminuir el Porcentaje de Sodio Intercambiable.

El tratamiento preliminar antes de proceder a la recuperación del suelo bajo estudio consistió en las instalaciones de unidades experimentales (botellas de 2 litros de capacidad), las cuales fueron acondicionadas para alojar 1,500 grs. de suelo secado al aire y tamizado. Antes de la colocación de las muestras de suelo en los recipientes se procedió a mezclar tres mejoradores químicos en tres diferentes dosis con el suelo por tratar obteniéndose tres repeticiones de cada tratamiento.

Los tratamientos fueron incubados por un período de 80 días al final de los cuales se procedió a verificar una desalinización para la cuál se utilizó una lámina total de 70 cms. de agua lograndose de esta manera una Conductividad Eléctrica menor de 2 mmhos/cm. a 25°C en el lixiviado final que correspondió a valores de Conductividad Eléctrica de extractos de saturación hasta de 5.33 mmhos/cm. a 25°C representando el 7.7 % de reducción de esta última cifra con respecto al valor inicial (24.0 mmhos/cm.).



El orden de eficiencia respecto a sustitución de sodio adsorbido o intercambiable (considerando el valor inicial de 29.87%) fue como sigue: - yeso mayor que ácido sulfúrico mayor que azufre.

Los valores de Conductividad Hidráulica determinados después del período de recuperación del suelo indicaron fuertes incrementos con respecto al valor inicial (antes de la recuperación). El orden de eficiencia de acuerdo al incremento de Conductividad Hidráulica quedó establecido de la manera siguiente: yeso mayor que ácido sulfúrico mayor que azufre.

El costo de disminución del Porcentaje de Sodio Intercambiable -- del valor inicial 29.87% al que se debía llegar 5% resulta más económico - empleando el yeso en la dosis 150% siguiéndole la de 200% y por último el ácido sulfúrico en su dosis de 200%.

Lo anterior implica que es posible llevar a cabo una recuperación de los suelos de estas áreas siempre y cuando se esté dispuesto a mantener el terreno en reposo por un período mínimo de 90 días y en condiciones de - humedad aproximadamente de capacidad de campo; también que haya disposición y recursos económicos para aplicar un mejorador químico y finalmente se cuente con un drenaje interno apropiado para poder llevar a cabo el desalojamiento de las sales solubles originales y de reciente formación del lavado con - agua de riego.

B I B L I O G R A F I A

1. Personal del Laboratorio de Salinidad de Los E.U.A.  
Richard L.A. (Editor)      Diagnóstico y Rehabilitación de Suelos Salinos y Sódicos (1974)
2. Chapman H.D. y P.F. Pratt      Métodos de Análisis de Suelos,- Plantas y Aguas (1975)
3. Bouyoucos G.J.      A Recalibration of Hydrometer - Method for Making Mechanical Analysis of Soils (Agronomy Journal 43,1951)
4. Palacios Velez O. y Aceves E.      Instructivo para el Muestreo, Registro de Datos e Interpretación de la Calidad del Agua Para el Riego Agrícola. E.N.A. Chapingo, México.
5. Departamento de Ingeniería de Riego y Drenaje de la Dirección General de Distritos de Riego de la S.R.H.      Instructivo e Interpretación de la Calidad de las Aguas de los Distritos de Riego.
6. Ortíz Villanueva B.      Edafología (1975)
7. Bonnet B.J.A.      Edafología de los Suelos Salinos y Sódicos (1960)
8. Dawn C.L.      Mejora de los Suelos Alcalinos. S.R.H. Memorandum Técnico No. 85 Bis.

9. Palacio Velez O.L. Fundamentos de la Prevención y Combate del Empantanamiento y Ensalitrado de Terrenos. Tesis 1969 E.N.A. Chapingo, México.
10. Aceves Navarro L.A. Terrenos Ensalitrados y los Métodos para su Recuperación. Tesis-Profesional Tomo 2 1976 E.N.A. - Chapingo, México.
11. Ortega Torres E. Química de Suelos (1976)
12. Fassbender H.W. Química de Suelos (1975)
13. Bear F.E. Chemistry of The Soil (1964)
14. Chena-González R. Importancia de la Profundidad de Aplicación del Yeso en la Recuperación de un Suelo Salino y/o Sódico. Agricultura Técnica de México S.A.G.
15. Wiklander L. Chemistry of The Soil (1955)
16. Alexander M. Introduction to Soil Microbiology (1961)
17. Kelley W.P. Cation Exchange in Soils (1948)
18. Dixon J.W. Introducción al Análisis Estadístico (1970).
19. Santaló L.A. Probabilidad E Inferencia Estadística. (1968)

## GLOSARIO DE TERMINOS

## G L O S A R I O

Absorción.- Proceso por el cual una sustancia es tomada dentro de otra; por ejemplo: agua tomada por el suelo; agua, nutrientes, y otras sustancias tomadas por las plantas.

Adsorción.- Concentración excesiva de moléculas ó iones en una superficie,- incluyendo cationes y aniones intercambiables en las partículas del suelo.

Capacidad de Campo.-Contenido de humedad del suelo dos ó tres días después de humedecer el perfil del suelo con lluvia o por riego. La capacidad de campo se expresa en porciento de humedad en base al suelo seco.

Capacidad de Intercambio de Cationes.- La cantidad total de Cationes que puede adsorber un suelo y que se expresa generalmente en miliequivalentes-- por 100 gramos.

Capa Freática.- El límite superior del agua subterránea.

Cación Intercambiable.- Un catión adsorbido en el complejo de intercambio que es capaz de intercambiarse con otros cationes.

Complejo de Intercambio.- Los constituyentes en la superficie activa de los suelos que son capaces de intercambiar cationes.

Conductividad Eléctrica.- Recíproca de la resistencia eléctrica; medida en mmhos/cm y que también se denomina comunmente Conductividad Eléctrica específica.

Conductividad Hidráulica.- Es la velocidad efectiva de escurrimiento a la unidad de gradiente hidráulica y tienen dimensiones de velocidad ( $LT^{-1}$ )

Drenaje.-El proceso de descarga de agua de un suelo por corriente superficial (drenaje superficial) y eliminación de agua excesiva dentro del suelo por movimiento descendiente a través del mismo (drenaje interno).

Esfuerzo de la Humedad del Suelo.- La suma de la tensión de humedad del suelo y de la presión osmótica de la solución del suelo. Es la succión ó presión negativa a la cual debe sujetarse el agua para estar en equilibrio en la solución del suelo a través de una membrana semipermeable.

Extracto de Saturación.- La solución que se extrae al suelo cuando éste contiene agua a su porcentaje de saturación.

Gradiente Hidráulico.- La disminución de carga hidráulica por unidad de distancia en el suelo en la dirección del mayor grado de disminución de la carga hidráulica.

Infiltración.- Entrando hacia abajo del agua en el suelo.

Intercambio de Cationes.- El intercambio de un ión en solución con otro en la superficie de un material activo.

Lavado.- El proceso de remoción del material soluble del suelo cuando pasa agua a través del mismo.

Membrana Semipermeable.- Una membrana que permite la difusión de un componente de una solución pero no la de otro.

Pasta Saturada del Suelo.- Una mezcla de suelo y agua. A saturación la pasta brilla al reflejar la luz; escurre ligeramente al inclinar el recipiente y la pasta se desliza libremente de una espátula, excepto en suelos de alto contenido de arcilla.

Permeabilidad.- El estado de un medio con relación a la rapidez con la cual dicho medio conduce o transmite fluidos.

Porciento de Saturación.- Porciento de humedad de una pasta saturada de suelo expresado en base a suelo seco.

Porciento de Sodio Intercambiable.- Grado de saturación con sodio del complejo de intercambio de sodio.

Presión Osmótica.- La presión negativa equivalente que tiene influencia en el grado de difusión del agua a través de una membrana semipermeable.

Relación de Adsorción de Sodio.- Una relación para extracto del suelo y aguas de irrigación que se usa para expresar la actividad relativa de iones de sodio en reacciones de intercambio con el suelo.

Salinización.- El proceso de acumulación de sales en el suelo.

Sodificación.- Proceso por el cual se aumenta el contenido de sodio intercambiable en el suelo.

Suelo Alcalino.- Un suelo con reacción alcalina o sea aquél cuyo pH de la pasta saturada es mayor de 7.

Tensión de Humedad del Suelo.- El equilibrio de la presión negativa o succión de agua en el suelo.

Velocidad de Infiltración.- El grado máximo a que un suelo bajo condiciones y en un tiempo dado puede absorber lluvia.

APENDICE



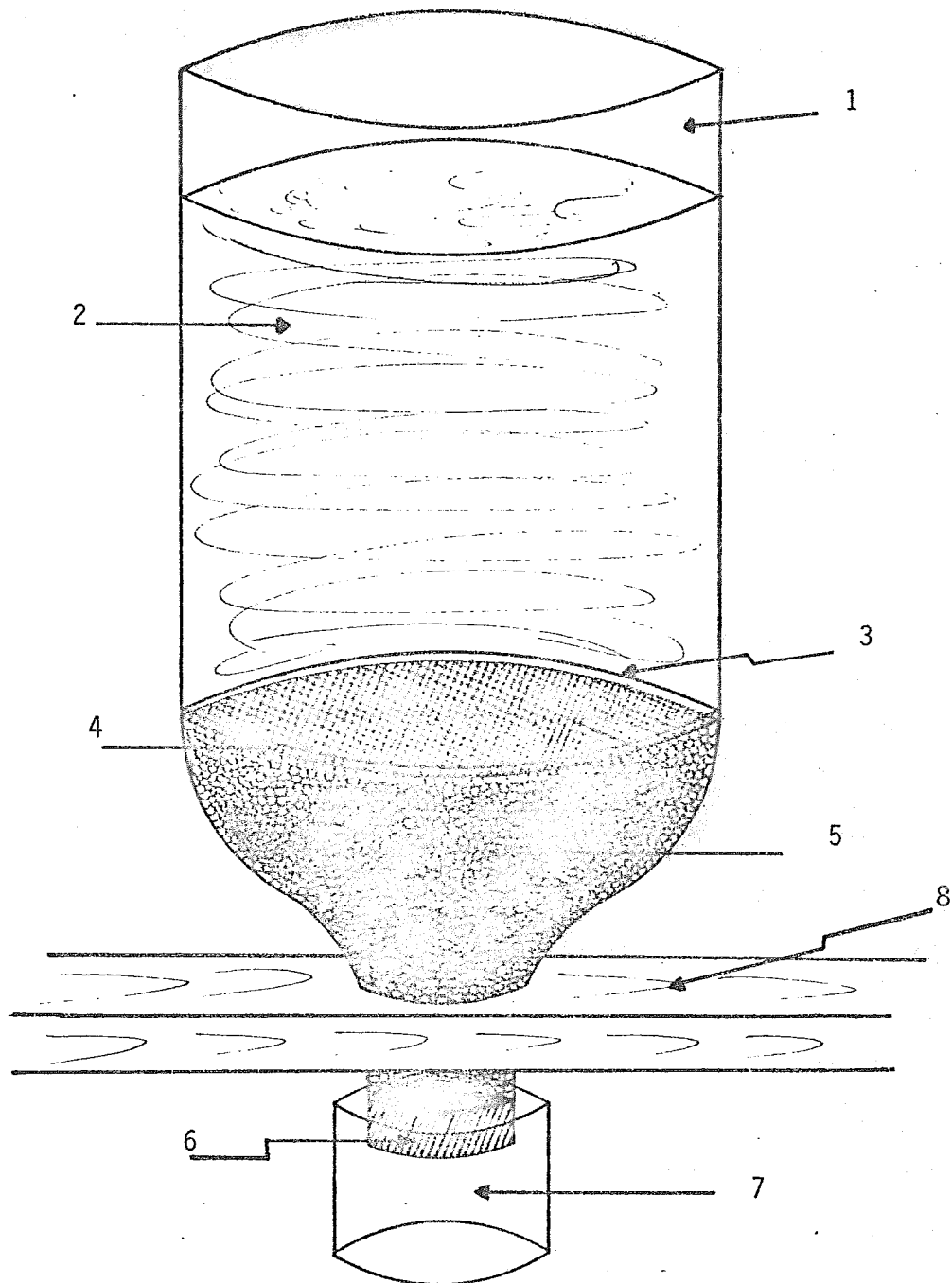


Figura No. 2.- DISPOSITIVO DE INCUBACION O UNIDAD EXPERIMENTAL.

1) Botella de plástico sin base; 2) Mezcla homogénea de suelo y mejorador químico, a la cual se mantuvo ochenta días a humedad aproximada de capacidad de campo; 3) Disco de papel filtro; 4) disco de alambre; 5) Grava de número dos; 6) Tapón de plástico de rosca con perforaciones para permitir lixiviaciones; 7) Vaso de precipitado para recoger lixiviados cuando se efectuen los lavados; 8) gradilla de madera para sostener las unidades experimentales.

# SUELOS SALINOS Y SODICOS

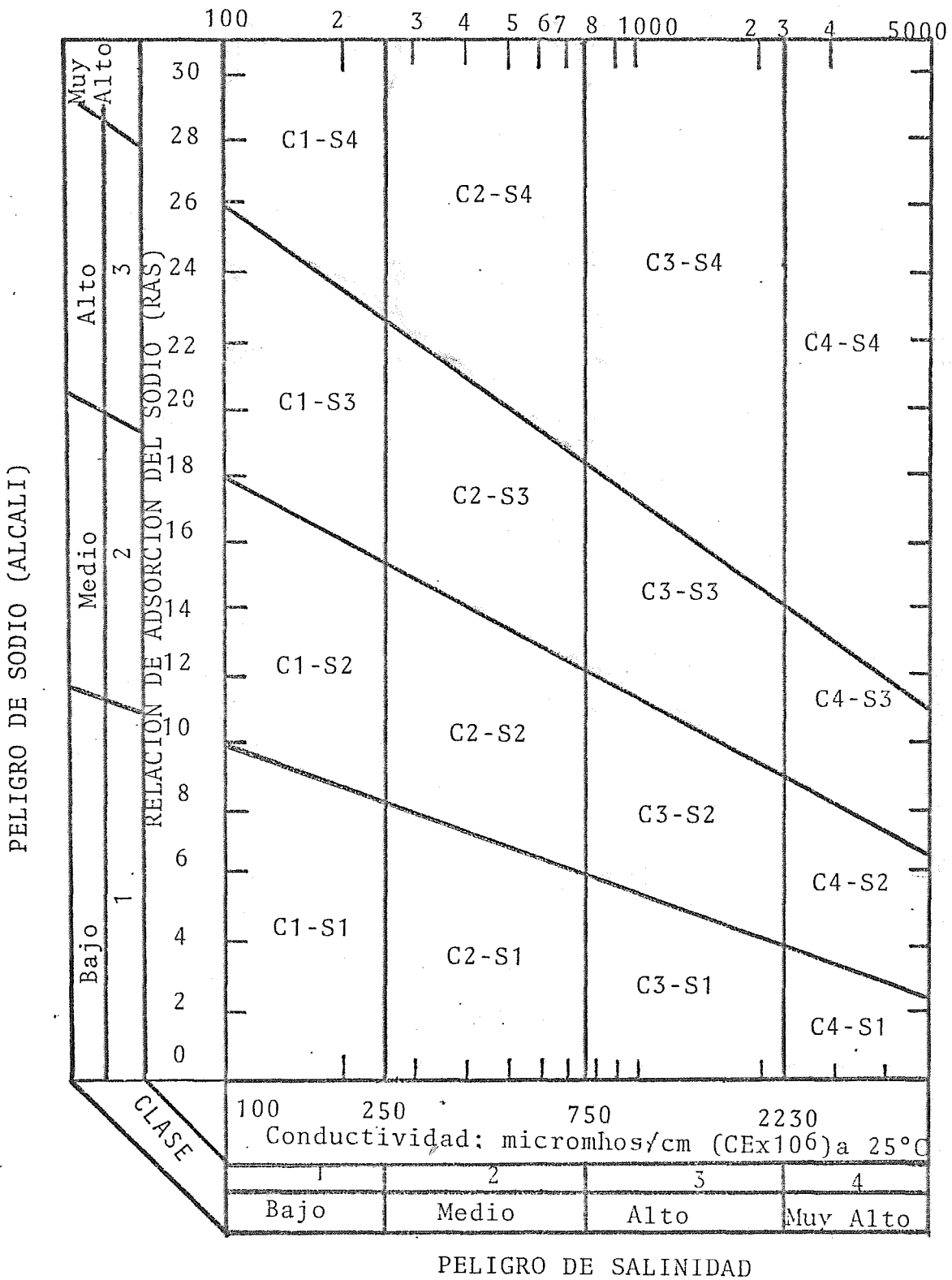


Figura No. 3.- Diagrama para la clasificación de las aguas para riego.

TABLA A-7a. DISTRIBUCIÓN  $F$ , NIVEL DE SIGNIFICACIÓN DEL 5 % ( $F_{.05}$ )\*

		Grados de libertad para el numerador																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	$\infty$	
Grados de libertad para el denominador.	1	161	200	216	225	230	234	237	239	241	242	244	246	248	249	250	251	252	253	254	
	2	18.5	19.0	19.2	19.2	19.3	19.3	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5
	3	10.1	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.70	8.66	8.64	8.62	8.59	8.57	8.55	8.53	8.53
	4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.69	5.66	5.63	5.63
	5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.62	4.56	4.53	4.50	4.46	4.43	4.40	4.37	4.37
	6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.94	3.87	3.84	3.81	3.77	3.74	3.70	3.67	3.67
	7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51	3.44	3.41	3.38	3.34	3.30	3.27	3.23	3.23
	8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22	3.15	3.12	3.08	3.04	3.01	2.97	2.93	2.93
	9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01	2.94	2.90	2.86	2.83	2.79	2.75	2.71	2.71
	10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85	2.77	2.74	2.70	2.66	2.62	2.58	2.54	2.54
	11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.72	2.65	2.61	2.57	2.53	2.49	2.45	2.40	2.40
	12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.62	2.54	2.51	2.47	2.43	2.38	2.34	2.30	2.30
	13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.53	2.46	2.42	2.38	2.34	2.30	2.25	2.21	2.21
	14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53	2.46	2.39	2.35	2.31	2.27	2.22	2.18	2.13	2.13
	15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.40	2.33	2.29	2.25	2.20	2.16	2.11	2.07	2.07
	16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.35	2.28	2.24	2.19	2.15	2.11	2.06	2.01	2.01
	17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.31	2.23	2.19	2.15	2.10	2.06	2.01	1.96	1.96
	18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.27	2.19	2.15	2.11	2.06	2.02	1.97	1.92	1.92
	19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	1.98	1.93	1.88	1.88
	20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.20	2.12	2.08	2.04	1.99	1.95	1.90	1.84	1.84
	21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.92	1.87	1.81	1.81
	22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.23	2.15	2.07	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.78	1.78
	23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.20	2.13	2.05	2.01	1.96	1.91	1.86	1.81	1.76	1.76
	24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.18	2.11	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.79	1.73	1.73
	25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82	1.77	1.71	1.71
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.01	1.93	1.89	1.84	1.79	1.74	1.68	1.62	1.62	
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.00	1.92	1.84	1.79	1.74	1.69	1.64	1.58	1.51	1.51	
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.92	1.84	1.75	1.70	1.65	1.59	1.53	1.47	1.39	1.39	
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.18	2.09	2.02	1.96	1.91	1.83	1.75	1.66	1.61	1.55	1.50	1.43	1.35	1.25	1.25	
$\infty$	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	1.83	1.75	1.67	1.57	1.52	1.46	1.39	1.32	1.22	1.00	1.00	

La interpolación debe realizarse utilizando los recíprocos de los grados de libertad.

\* Esta tabla se ha reproducido de M. Merrington, C.M. Thompson, Tables of percentage points of the inverted beta ( $F$ ) distributions, *Biometrika*, vol. 33 (1943), p. 73, con la autorización del Profesor E. S. Pearson.

TABLA A-7b. DISTRIBUCIÓN  $F$ , NIVEL DE SIGNIFICACIÓN DEL 1% ( $F_{.01}$ )\*

	Grados de libertad para el numerador																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	$\infty$
1	4,052	5,000	5,403	5,625	5,764	5,859	5,928	5,982	6,023	6,056	6,106	6,157	6,209	6,235	6,261	6,287	6,313	6,339	6,366
2	98.5	99.0	99.2	99.2	99.3	99.3	99.4	99.4	99.4	99.4	99.4	99.4	99.4	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5
3	34.1	30.8	29.5	28.7	28.2	27.9	27.7	27.5	27.3	27.2	27.1	26.9	26.7	26.6	26.5	26.4	26.3	26.2	26.1
4	21.2	18.0	16.7	16.0	15.5	15.2	15.0	14.8	14.7	14.5	14.4	14.2	14.0	13.9	13.8	13.7	13.7	13.6	13.5
5	16.3	13.3	12.1	11.4	11.0	10.7	10.5	10.3	10.2	10.1	9.89	9.72	9.55	9.47	9.38	9.29	9.20	9.11	9.02
6	13.7	10.9	9.78	9.15	8.75	8.47	8.26	8.10	7.98	7.87	7.72	7.56	7.40	7.31	7.23	7.14	7.06	6.97	6.88
7	12.2	9.55	8.45	7.85	7.46	7.19	6.99	6.84	6.72	6.62	6.47	6.31	6.16	6.07	5.99	5.91	5.82	5.74	5.65
8	11.3	8.65	7.59	7.01	6.63	6.37	6.18	6.03	5.91	5.81	5.67	5.52	5.36	5.28	5.20	5.12	5.03	4.95	4.86
9	10.6	8.02	6.99	6.42	6.06	5.80	5.61	5.47	5.35	5.26	5.11	4.96	4.81	4.73	4.65	4.57	4.48	4.40	4.31
10	10.0	7.56	6.55	5.99	5.64	5.39	5.20	5.06	4.94	4.85	4.71	4.56	4.41	4.33	4.25	4.17	4.08	4.00	3.91
11	9.65	7.21	6.22	5.67	5.32	5.07	4.89	4.74	4.63	4.54	4.40	4.25	4.10	4.02	3.94	3.86	3.78	3.69	3.60
12	9.33	6.93	5.95	5.41	5.06	4.82	4.64	4.50	4.39	4.30	4.16	4.01	3.86	3.78	3.70	3.62	3.54	3.45	3.36
13	9.07	6.70	5.74	5.21	4.86	4.62	4.44	4.30	4.19	4.10	3.96	3.82	3.66	3.59	3.51	3.43	3.34	3.25	3.17
14	8.86	6.51	5.56	5.04	4.70	4.46	4.28	4.14	4.03	3.94	3.80	3.66	3.51	3.43	3.35	3.27	3.18	3.09	3.00
15	8.68	6.36	5.42	4.89	4.56	4.32	4.14	4.00	3.89	3.80	3.67	3.52	3.37	3.29	3.21	3.13	3.05	2.96	2.87
16	8.53	6.23	5.29	4.77	4.44	4.20	4.03	3.89	3.78	3.69	3.55	3.41	3.26	3.18	3.10	3.02	2.93	2.84	2.75
17	8.40	6.11	5.19	4.67	4.34	4.10	3.93	3.79	3.68	3.59	3.46	3.31	3.16	3.08	3.00	2.92	2.83	2.75	2.65
18	8.29	6.01	5.09	4.58	4.25	4.01	3.84	3.71	3.60	3.51	3.37	3.23	3.08	3.00	2.92	2.84	2.75	2.66	2.57
19	8.19	5.93	5.01	4.50	4.17	3.94	3.77	3.63	3.52	3.43	3.30	3.15	3.00	2.92	2.84	2.76	2.67	2.58	2.49
20	8.10	5.85	4.94	4.43	4.10	3.87	3.70	3.56	3.46	3.37	3.23	3.09	2.94	2.86	2.78	2.69	2.61	2.52	2.42
21	8.02	5.78	4.87	4.37	4.04	3.81	3.64	3.51	3.40	3.31	3.17	3.03	2.88	2.80	2.72	2.64	2.55	2.46	2.36
22	7.95	5.72	4.82	4.31	3.99	3.76	3.59	3.45	3.35	3.26	3.12	2.98	2.83	2.75	2.67	2.58	2.50	2.40	2.31
23	7.88	5.66	4.76	4.26	3.94	3.71	3.54	3.41	3.30	3.21	3.07	2.93	2.78	2.70	2.62	2.54	2.45	2.35	2.26
24	7.82	5.61	4.72	4.22	3.90	3.67	3.50	3.36	3.26	3.17	3.03	2.89	2.74	2.66	2.58	2.49	2.40	2.31	2.21
25	7.77	5.57	4.68	4.18	3.86	3.63	3.46	3.32	3.22	3.13	2.99	2.85	2.70	2.62	2.53	2.45	2.36	2.27	2.17
30	7.56	5.39	4.51	4.02	3.70	3.47	3.30	3.17	3.07	2.98	2.84	2.70	2.55	2.47	2.39	2.30	2.21	2.11	2.01
40	7.31	5.18	4.31	3.83	3.51	3.29	3.12	2.99	2.89	2.80	2.66	2.52	2.37	2.29	2.20	2.11	2.02	1.92	1.80
60	7.08	4.98	4.13	3.65	3.34	3.12	2.95	2.82	2.72	2.63	2.50	2.35	2.20	2.12	2.03	1.94	1.84	1.73	1.60
120	6.85	4.79	3.95	3.48	3.17	2.96	2.79	2.66	2.56	2.47	2.34	2.19	2.03	1.95	1.86	1.76	1.66	1.53	1.38
$\infty$	6.63	4.61	3.78	3.32	3.02	2.80	2.64	2.51	2.41	2.32	2.18	2.04	1.88	1.79	1.70	1.59	1.47	1.32	1.00

Grados de libertad para el denominador.

APENDICE

La interpolación debe realizarse utilizando los recíprocos de los grados de libertad.  
 \* Esta tabla se ha reproducido de M. Merrington, C. M. Thompson, «Tables of percentage points of the inverted beta ( $F$ ) distributions», *Biometrika*, vol. 33 (1943), p. 73, con la autorización del Profesor E. S. Pearson.

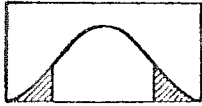


Table II. Distribution of *t*

Degrees of freedom	Probability												
	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01	0.001
1	0.158	0.325	0.510	0.727	1.000	1.376	1.963	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	636.619
2	0.142	0.289	0.445	0.617	0.816	1.061	1.386	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	31.598
3	0.137	0.277	0.424	0.584	0.765	0.978	1.250	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	12.924
4	0.134	0.271	0.414	0.569	0.741	0.941	1.190	1.533	2.132	2.778	3.747	4.604	8.610
5	0.132	0.267	0.408	0.559	0.727	0.920	1.156	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	6.869
6	0.131	0.265	0.404	0.553	0.718	0.906	1.134	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.959
7	0.130	0.263	0.402	0.549	0.711	0.896	1.119	1.415	1.895	2.365	2.993	3.499	5.408
8	0.130	0.262	0.399	0.546	0.706	0.889	1.108	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	5.041
9	0.129	0.261	0.398	0.543	0.703	0.883	1.100	1.383	1.833	2.282	2.821	3.250	4.781
10	0.129	0.260	0.397	0.542	0.700	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.587
11	0.129	0.260	0.396	0.540	0.697	0.876	1.088	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.437
12	0.128	0.259	0.395	0.539	0.695	0.873	1.083	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	4.318
13	0.128	0.259	0.394	0.538	0.694	0.870	1.079	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	4.221
14	0.128	0.258	0.393	0.537	0.692	0.868	1.076	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	4.140
15	0.128	0.258	0.393	0.536	0.691	0.866	1.074	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	4.073
16	0.128	0.258	0.392	0.535	0.690	0.865	1.071	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	4.015
17	0.128	0.257	0.392	0.534	0.689	0.863	1.069	1.333	1.740	2.110	2.567	2.895	3.965
18	0.127	0.257	0.392	0.534	0.688	0.862	1.067	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.922
19	0.127	0.257	0.391	0.533	0.688	0.861	1.066	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.883
20	0.127	0.257	0.391	0.533	0.687	0.860	1.064	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.850
21	0.127	0.257	0.391	0.532	0.686	0.859	1.063	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.819
22	0.127	0.256	0.390	0.532	0.686	0.858	1.061	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.792
23	0.127	0.256	0.390	0.532	0.685	0.858	1.060	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.767
24	0.127	0.256	0.390	0.531	0.685	0.857	1.059	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.745
25	0.127	0.256	0.390	0.531	0.684	0.856	1.058	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.725
26	0.127	0.256	0.390	0.531	0.684	0.856	1.058	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.707
27	0.127	0.256	0.389	0.531	0.684	0.855	1.057	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.690
28	0.127	0.256	0.389	0.530	0.683	0.855	1.056	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.674
29	0.127	0.256	0.389	0.530	0.683	0.854	1.055	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.659
30	0.127	0.256	0.389	0.530	0.683	0.854	1.055	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.646
40	0.126	0.255	0.388	0.529	0.681	0.851	1.050	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	3.551
60	0.126	0.254	0.387	0.527	0.679	0.848	1.046	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	3.460
120	0.126	0.254	0.386	0.526	0.677	0.845	1.041	1.289	1.658	1.980	2.358	2.617	3.373
∞	0.126	0.253	0.385	0.524	0.674	0.842	1.036	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	3.291

SOURCE: Table II is reprinted from Table III of Ronald A. Fisher and Frank Yates, *Statistical Tables for Biological, Agricultural, and Medical Research*, 4 ed., 1953, published by Oliver & Boyd, Ltd., Edinburgh, by permission of the authors and publishers.