

6
2ej.

00361



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Estudio sobre la utilización de los licores ácidos
de la industria metalúrgica, en la recuperación
de suelos salino-sódicos

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS (BIOLOGIA)

P R E S E N T A :
FRANCISCO BAUTISTA ZUÑIGA

México, D.F. febrero de 1992



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

INDICE DE CONTENIDO

1	INTRODUCCION	1
	1.2 OBJETIVOS Y METAS	4
2	ANTECEDENTES	
	2.1 LA INDUSTRIA DEL HIERRO Y EL ACERO	5
	2.1.1 Descripción del proceso	5
	2.2 CARACTERISTICAS DE LA ZONA DE APLICACION	
	2.2.1 Localización	7
	2.2.2 Geología	7
	2.2.3 Hidrología	9
	2.2.4 Clima	12
	2.2.5 Suelos	12
	2.3 CLASIFICACION DE LOS SUELOS AFECTADOS POR SALES	
	2.3.1 Suelos salinos	15
	2.3.2 Suelos sódicos	15
	2.3.3 Suelos salino- sódicos	16
	2.4 LOS METALES PESADOS EN LA CONTAMINACION DE LOS SUELOS	16
	2.4.1 Método de fraccionamiento	18
3	MATERIAL Y METODOS	
	3.1 LICORES ACIDOS	
	3.1.1 Muestreo	24
	3.1.2 Técnicas y métodos de análisis	24
	3.2 SUELOS	
	3.2.1 Selección de la zona de aplicación	26
	3.2.2 Diseño de la toma de muestra	26
	3.2.3 Análisis	27
	3.2.4 Determinación de la dosis de mejorado	28
	3.2.5 Experimento con columnas de suelo	31
4	RESULTADOS	
	4.1 LICORES ACIDOS	33
	4.2 SUELOS	41
	4.2.1 Características químicas del suelo	41
	4.2.3 Características físicas del suelo	51
	4.2.5 Experimento con columnas	53
5	CONCLUSIONES	75
6	REFERENCIAS	79
	APENDICE I	86

INDICE DE TABLAS

Tabla 1	Clasificación de los suelos de la zona de aplicación	14
Tabla 2	Suelos salinos	15
Tabla 3	Suelos sódicos	16
Tabla 4	Metales pesados	18
Tabla 5	Características del licor ácido de las diferentes tinajas de decapado	33
Tabla 6	Características del licor ácido	34
Tabla 7	Extracto de la pasta de saturación	42
Tabla 8	Análisis de extracto 1/5 suelo/agua	44
Tabla 9	Correlaciones de pH y CE con los aniones y cationes solubles	47
Tabla 10	Análisis cualitativo en la solución 1/5	47
Tabla 11	Identificación de los minerales menores de dos micras	49
Tabla 12	Propiedades químicas del suelo antes de adicionar el licor ácido	49
Tabla 13	Propiedades físicas del suelo	51
Tabla 14	Retención de humedad y distribución del espacio poroso	51
Tabla 15	Valores de los suelos recuperados	65
Tabla 16	Comparación de los suelos antes y después de aplicar el mejorador	67
Tabla 17	Concentraciones de plomo y de zinc en los suelos sin tratar	71
Tabla 18	Concentraciones extraíbles de zinc, en HNO ₃ (ppm) antes y después del tratamiento	71
Tabla 19	Concentraciones extraíbles de plomo, en HNO ₃ (ppm) antes y después del tratamiento	71
Tabla 20	Comparación de las concentraciones de metales pesados contenidos en el licor, en el suelo y los valores informados en la bibliografía	73

INDICE DE FIGURAS

Figura 1	Opciones de solución al problema de contaminación por licores ácidos. Villalobos, et al. 1990.	3
Figura 2	Localización de AHMSA-División Sur. Béjar, 1990.	6
Figura 3	Localización de la zona de aplicación. Rudolph, et al. 1989.	8
Figura 4	Sección transversal norte sur de la zona de aplicación. Rudolph, et al. 1989.	10
Figura 5	Sección transversal este oeste de la zona de aplicación. Rudolph, et al. 1989.	11
Figura 6	Diagramas ombrotérmicos de las estaciones meteorológicas cercanas a la zona de aplicación. Datos tomados de García, 1988.	13
Figura 7	Dispositivo diseñado para el experimento con columnas de suelo.	32
Figura 8	Componentes principales de los licores ácidos.	36
Figura 9	Metales más abundantes en los licores ácidos.	37
Figura 10	Metales menos abundantes en los licores ácidos.	38
Figura 11	Conductividad eléctrica del extracto de la pasta de saturación por punto de muestreo y profundidad (a= 0-20 y b= 20-40 cm).	43
Figura 12	Sodio y potasio en solución en la relación 1/5 por punto de muestreo y profundidad (a= 0-20 y b= 20-40 cm).	45
Figura 13	Aniones en solución en la relación 1/5 por punto de muestreo y profundidad (a= 0-20 y b= 20-40 cm).	46
Figura 14	Materia orgánica y carbonatos totales por punto de muestreo y profundidad (a= 0-20 y b= 20-40 cm).	50
Figura 15	Valores medios de pH de los suelos recuperados por punto de muestreo, por tratamiento al suelo (C= compactos y S= sueltos) y por profundidad (a= 0-20 y b= 20-40 cm).	55
Figura 16	pH de los suelos recuperados con el licor ácido por tratamiento al suelo (C= compactos y S= sueltos).	56
Figura 17	Valores medios de la conductividad eléctrica de los suelos recuperados por punto de muestreo, por tratamiento al suelo (C= compactos y S= sueltos) y por profundidad (a= 0-20 y b= 20-40 cm).	57
Figura 18	Conductividad eléctrica de los suelos recuperados con el licor ácido por tratamiento al suelo (C= compactos y S= sueltos).	58
Figura 19	Valores medios de calcio intercambiable de los suelos recuperados por punto de muestreo, por tratamiento al suelo (C= compactos y S= sueltos) y por profundidad (a= 0-20 y b= 20-40 cm).	59
Figura 20	Calcio de los suelos recuperados con el licor ácido por tratamiento al suelo (C= compactos y S= sueltos).	60
Figura 21	Valores medios de sodio intercambiable de los suelos recuperados por punto de muestreo, por tratamiento al suelo (C= compactos y S= sueltos) y por profundidad (a= 0-20 y b= 20-40 cm).	61

Figura 22	Sodio de los suelos recuperados con el licor ácido por tratamiento al suelo (C= compactos y S= sueltos).	62
Figura 23	Valores medios de potasio intercambiable de los suelos recuperados por punto de muestreo, por tratamiento al suelo (C= compactos y S= sueltos) y por profundidad (a= 0-20 y b= 20-40 cm).	63
Figura 24	Potasio de los suelos recuperados con el licor ácido por tratamiento al suelo (C= compactos y S= sueltos).	64
Figura 25	Porcentajes de cationes totales en los suelos sin tratar con los licores ácidos.	68
Figura 26	Porcentajes de cationes totales en los suelos "compactos" tratados con los licores ácidos.	69
Figura 27	Porcentajes de cationes totales en los suelos "suelos" tratados con los licores ácidos.	70
Figura 28	Modelo de manejo de los licores ácidos en la recuperación de los suelos salinosódicos de Texcoco.	78

RESUMEN

La industria del hierro y el acero utiliza H_2SO_4 en los procesos de decapado, y genera un licor ácido residual con alto contenido de Fe y pequeñas concentraciones de otros metales como Zn y Pb. Los efluentes de esta industria se desechan al drenaje municipal, sin tratamiento previo, y se destina al riego agrícola. Una solución a este problema ambiental lo conforma el reuso de los licores ácidos para su utilización como mejorador de suelos salino-sódicos. Para instrumentar esta solución se llevó a cabo un estudio, en el cual se:

- calculó la dosis necesaria del ácido residual para recuperar suelos del noreste de la cuenca de México, mediante un experimento con columnas de suelo.
- evaluaron los cambios físicos y químicos de los suelos recuperados,
- cuantificó la variación en la concentración de los metales pesados presentes en el licor.
- calculó la solubilidad del hierro, en condiciones reductoras (pE mínimo) y de neutralidad (pH=7.3).

Los suelos originales presentan un intervalo de pH de 9.5 a 10.1 y una conductividad eléctrica de 18 a 86 mmhos/cm. Contiene una gran cantidad de sodio, cloruros, carbonatos y bicarbonatos solubles. Los carbonatos totales también son altos (3.3 a 50.5 %), al igual que el % C (0.4- 2.4). La capacidad de intercambio de cationes es mayor de 50 meq/100g y el sodio varía de 20.3 a 141.2 meq/100g. El análisis mineral de las partículas < 0.002mm indica la presencia de vidrio volcánico, calcita, cristobalita, haloisita y clorita, principalmente. Las propiedades físicas no se correlacionan como normalmente ocurre en los suelos debido a la presencia de los carbonatos de calcio y amorfos. La dosis adecuada para recuperar el suelo fue de 666.7 mL diluidos a 5 L de ácido residual por columna, con una lámina de lavado de 5 L de agua.

La destrucción de los carbonatos de calcio que presentan tamaños de arcilla, limos y arenas, libera altas concentraciones de calcio que desplaza el sodio intercambiable. Este fenómeno aumenta la porosidad textural (por disminución de las partículas finas) y estructural (por disminución del espesor de la doble capa) y, en consecuencia, la velocidad de infiltración y el desalojo de las sales del suelo, permitiendo una más rápida recuperación de los suelos. Se logran condiciones de pH y conductividad eléctrica adecuadas para el desarrollo vegetal. La concentración del Pb disminuyó debido al lavado, excepto en una columna en donde se observó un ligero aumento. En cambio, la concentración de Zn aumentó en todas las columnas, en concentraciones consideradas benéficas. Aún en condiciones extremas de pH y pE, hierro soluble no es peligroso.

1 INTRODUCCION

En la actualidad el área total de los suelos afectados por sales en el mundo no es conocida con exactitud, pero se sabe que es muy grande (Szabolcs, 1989). En las regiones áridas y semiáridas, a menudo existen problemas de salinidad, debido a la baja precipitación. Estas zonas comprenden el 25% de la superficie terrestre. Un estudio realizado en 1970, indica que el área de riego de 103 países es de 203 millones de hectáreas y señala que el 25% están afectadas por sales (Szabolcs, 1989).

La trascendencia de los problemas agrícolas debidos a la salinidad del suelo es diferente en cada país, pero en el caso de México es sumamente importante ya que, como menciona Fernández (1973), citado por Lugo (1984), alrededor del 50% de la superficie se encuentra alterada por problemas de salinidad y de esta superficie un alto porcentaje tiene problemas de sodicidad. Esta área comprende gran parte de las zonas áridas y semiáridas, algunos distritos de riego y de las cuencas cerradas como la de Puebla y la del Distrito Federal.

"La recuperación de los suelos salinosódicos es relativamente simple en teoría, únicamente se requiere de gran cantidad de agua, mejoradores químicos y drenaje. No obstante, la obtención del agua necesaria, la construcción del sistema de drenaje requerido y la compra de mejoradores químicos representan un costo tal, que en muchos casos los terrenos agrícolas una vez salinizados, son simplemente abandonados, con todos los problemas sociales, económicos y ecológicos que esto pueda ocasionar" (Ortiz, 1988).

Si se considera que día a día el crecimiento de la población se acelera y que, consecuentemente, cada vez resulta más difícil encontrar, seleccionar y abrir nuevas zonas de cultivo, se puede afirmar que la salinidad del suelo constituye, sin duda alguna, uno de los grandes problemas del país y que, por lo mismo, es necesario adoptar medidas tendientes a su resolución.

Entre los mejoradores de suelos sódicos más utilizados, se encuentra el sulfato de calcio, o sustancias que facilitan la disolución de los carbonatos de calcio presentes en el suelo. Por ejemplo, es usado el azufre que se transforma por la acción de los Tiobacilos del suelo en ácido sulfúrico que disuelve al carbonato de calcio y libera iones calcio que sustituyen al sodio del complejo de intercambio. También, son usadas sales ácidas como el sulfato férrico que al disolverse forman ácido sulfúrico o en ocasiones se utiliza el ácido directamente.

Por otro lado, la industria metal mecánica y de acabado de metales utiliza grandes cantidades de ácido sulfúrico para limpiar de óxidos sus productos, como la varilla, tornillos, etc,

fabricados básicamente de hierro. Hasta ahora, los efluentes de estas industrias son enviados al drenaje directamente o, en algunos casos, neutralizados con hidróxido de sodio. Cabe aclarar que este tratamiento únicamente disminuye la acidez del efluente, pero no evita la contaminación por metales y, además, aumenta la concentración de sodio. Las características de estas descargas constituyen un peligro potencial, especialmente si su destino final lo constituye el riego agrícola (Gutiérrez, 1982).

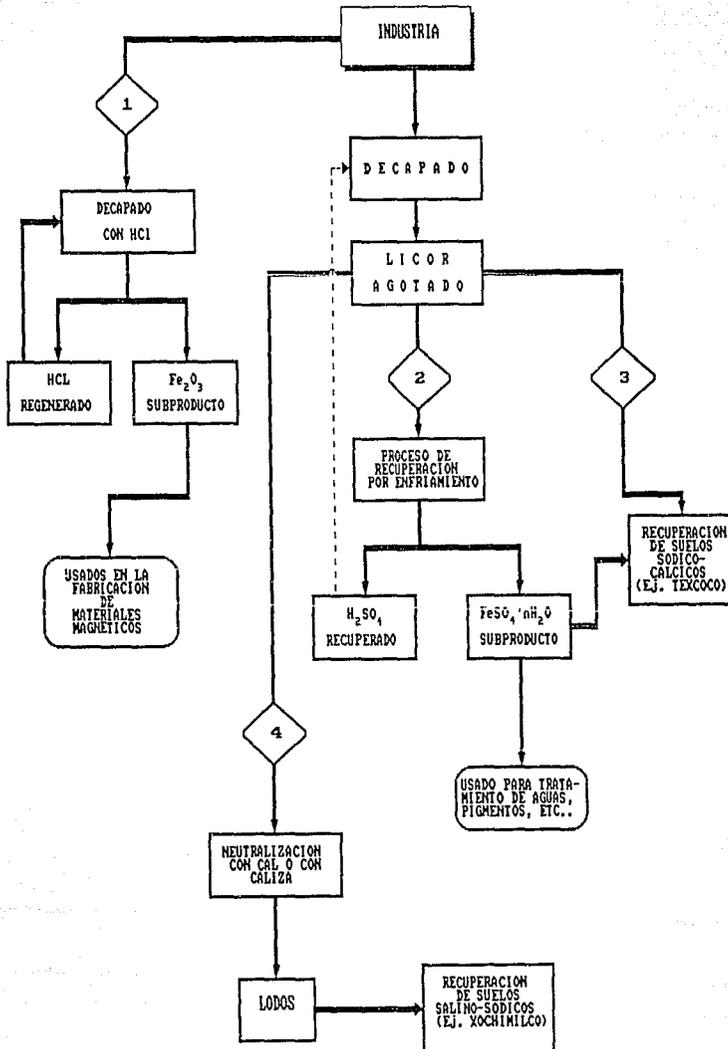
La planta de Altos Hornos de México División Sur (AHMSA) ubicada en el Edo. de México, preocupada por el impacto que producen sus efluentes, cuyo destino final lo constituye el distrito de riego agrícola 63, encargó al Programa de Ingeniería Química Ambiental y Química Ambiental un estudio para analizar las diversas opciones de solución a este problema (Béjar, 1990., Villalobos et al. 1990 ; Bautista et al. 1991a, b). Se presentaron las siguientes posibilidades (fig. 1):

- el cambio de ácido sulfúrico por ácido clorhídrico, lo cual permite reciclar el ácido y obtener como subproducto Fe_2O_3 , pero que exige una alta producción y el cambio total del equipo;
- el reciclado del ácido sulfúrico mediante la precipitación de sulfato ferroso a través de un proceso de evaporación y enfriamiento;
- la neutralización con cal o caliza y la utilización del sulfato de calcio producido para la recuperación de suelos sódicos no cálcicos;
- y, finalmente el uso directo del ácido como mejorador de suelos de la zona de Texcoco, aledana a la empresa, cuyos suelos presentan graves problemas de sodicidad y contienen gran cantidad de carbonatos de calcio.

Esta última solución, conforma la mejor opción ya que puede instrumentarse fácilmente, pues no requiere de ningún equipo especial: únicamente de un transporte adecuado y un tanque receptor. Una vez adicionado el ácido diluido al suelo, el calcio solubilizado sustituye a los iones sodio del complejo de intercambio, los cuales se eliminan a través de un drenaje. De acuerdo a la composición y condición de pH y pE del suelo, algunos de los iones presentes como hierro, manganeso y demás deben formar especies insolubles y precipitarse. El uso de un reactivo gratuito facilitará la labor de recuperación de los suelos de Texcoco que está a cargo de la Comisión del Lago de Texcoco, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulico (SARH). Una vez recuperados, es posible establecer una cubierta vegetal -por ejemplo, *Lolium sp.*, *Muhlenbergia sp.*, *Cynodon sp.*- que evite la formación de tolvaneras y la contaminación del área metropolitana.

Si se considera que los problemas de sodicidad, como ya se comentó, se presentan en muchas regiones de México en las cuales

FIGURA 1 Opciones de solución al problema de contaminación por licores ácidos. Villalobos, et al. 1990.



están ubicadas ciudades con industria generadora de ácidos residuales, este tipo de alternativa en que se resuelven conjuntamente dos graves problemas, puede conformar un prototipo de solución aplicable a muchos otras áreas afectadas.

Por lo tanto, se consideró importante determinar en una primera etapa la viabilidad de esta opción. Para lo cual se determinó estudiar la composición del ácido residual y de los suelos y, con los datos obtenidos, establecer un experimento de recuperación a nivel de laboratorio, realizando los análisis pertinentes.

1.2. OBJETIVOS Y METAS

- Estudiar la composición del ácido residual, para analizar si es adecuado determinar su posible uso.
- Caracterizar química y físicamente una parcela agrícola con problemas de salinidad y sodicidad del exlago de Texcoco.
- Establecer un experimento en columnas de suelo, para determinar: cantidades de ácido necesarias, determinar los cambios en las propiedades químicas y físicas del suelo.
- Determinar el efecto de la estructura del suelo en la eficiencia del mejorador (licor ácido).
- Cuantificar la adición de metales pesados a los suelos por el uso de ácido residual industrial y determinar las especies estables en condiciones extremas de pH y pe.
- Evaluar la efectividad del tratamiento y determinar las condiciones del experimento de campo.

2 ANTECEDENTES

2.1 LA INDUSTRIA DEL HIERRO Y EL ACERO

La planta de AHMSA-SUR está ubicada en Lechería, Tultitlán, Edo. de México y produce diversos productos metálicos, entre los que se pueden nombrar: varilla, alambón, malla ciclón, alambre galvanizado, clavos, alambre piano y tela de gallinero (fig. 2).

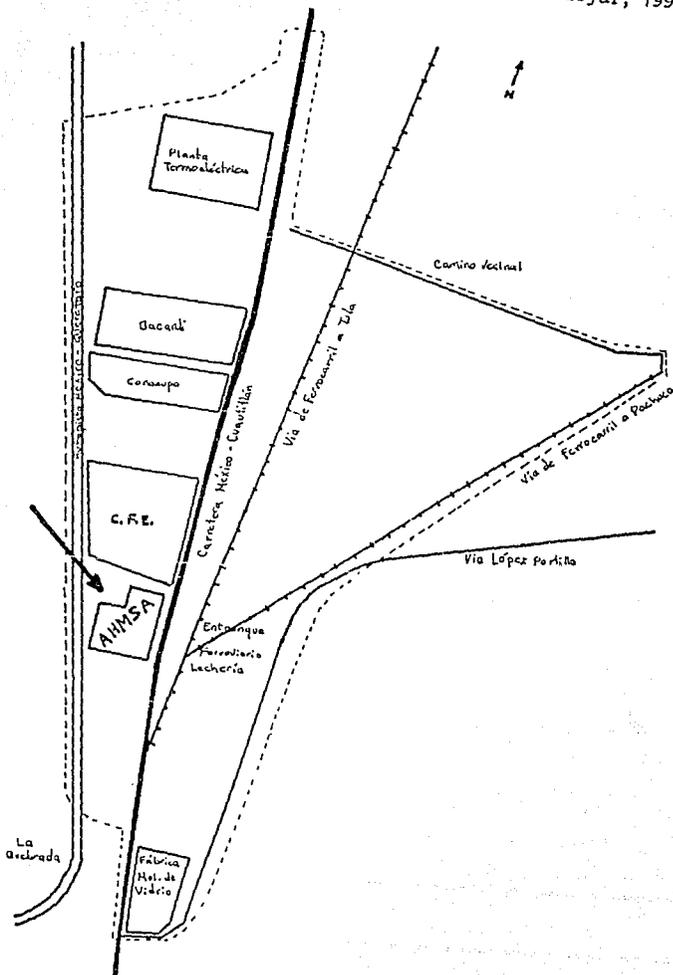
"Según datos proporcionados por la Camara Nacional del Acero (Canacero) en su informe de 1988 -el más reciente a la fecha-, México por su producción de acero ocupa el vigesimosegundo sitio a nivel mundial y el segundo en Latinoamérica (después de Brasil). En 1988, el total de las exportaciones superó al de las importaciones en un 6% y los volúmenes de producción rebasaron a los de 1987 en un 1.9%. De la producción nacional de acero, el 54% estuvo a cargo de industrias paraestatales y el 46% restante de la iniciativa privada; en cuanto a la modernización de los procedimientos cabe señalar que en 1988 se incrementó la producción a través del proceso por horno eléctrico en un 6%" (Bejar, 1990).

2.1.1 Descripción del proceso

Los procesos que producen residuos líquidos ácidos en AHMSA son los siguientes:

- a) **Decapado químico.** Proceso en que se elimina el óxido de hierro que cubre las varillas, mediante su inmersión en una solución de H_2SO_4 al 10%. Una vez que esta solución se "gasta", se almacena temporalmente en tanques de cemento y con cierta regularidad se tira al desagüe. Mientras el licor se almacena ocurren diferentes reacciones, por ejemplo el hierro II se oxida a III, aumenta el pH y se precipitan sulfatos, óxidos e hidróxidos y posiblemente pequeñas cantidades de fosfatos de los iones metálicos presentes, principalmente del hierro. Estos residuos sólidos presentan un aspecto lodoso y, de tiempo en tiempo, son recolectados y desechados en cualquier sitio aldeaño que se encuentre disponible (no se tiene información exacta).
- b) **Fosfatado.** Al término del proceso de decapado se introducen las varillas en tinas de neutralización y enjuague. Posteriormente y para finalizar el proceso, la varilla se sumerge en un lubricante comercial compuesto principalmente por fosfatos, que forma una capa brillante y anticorrosiva. Estas tinas también se desechan con cierta periodicidad al drenaje, pasando los residuos a los mismos tanques que en el caso del ácido gastado.

FIGURA 2 Localización de AHMSA-División Sur. Béjar, 1990.



c) Galvanizado. Este proceso se realiza en una área independiente de los procesos ya señalados. En el primer paso, se eliminan del alambre las grasas y aceites que provienen de los lubricantes mecánicos de las máquinas, para lo cual se sumerge el material metálico en tinas que contienen una solución de HCl. Posteriormente, se realiza el tratamiento químico y el galvanizado en tinas independientes que contienen plomo y zinc fundidos(1).

El drenaje de este último proceso es independiente pero se junta en el cárcamo final con los otros desagües y con las aguas residuales domésticas procedentes de las oficinas y sanitarios. De ahí pasa al drenaje municipal, el cual finalmente desemboca en el gran canal, cuyas aguas son usadas para el riego agrícola de los distritos 63 y 88.

La planta funciona seis días de la semana, durante las 24 horas de día y produce 36,686 litros al mes de licor ácido proveniente del área de decapado, es decir, 440,232 litros anuales.

2.2 CARACTERISTICAS DE LA ZONA DE APLICACION

2.2.1 Localización

El ex-lago de Texcoco se encuentra dentro de la cuenca de México y ocupa la parte sur de la mesa central de la República Mexicana. Presenta una altitud media de 2 200 msnm y se encuentra ubicado entre los 19° 22' y 19° 37' de latitud norte, y entre los 98° 54' y 99° 03' de longitud oeste, (Velázquez y Luna, 1981).

Las parcela de estudio se encuentran en la zona denominada "La Tubera" y "Churubusco" (fig. 3). Estas áreas fueron seleccionadas por el personal de la SARH, por corresponder a la zona que actualmente se está recuperando.

2.2.2 Geología

Como resultado de los estudios realizados en la perforación del pozo geológico Texcoco y el hallazgo del conglomerado Texcoco, se ha supuesto que la cuenca se formó como consecuencia del levantamiento de rocas cretácicas a fines de la Revolución Laramide, lo que permitió el almacenamiento de agua y la formación de varios lagos. Posteriormente, la cuenca se subdividió debido a la actividad ignea en el terciario lo que, combinado con la alta evaporación, influyó para que se formara anhidrita. Después del depósito de anhidrita, sobrevinieron depositaciones de materiales volcánicos construidos

(1) Para mayor información sobre la empresa consultar a Bejar, (1990)

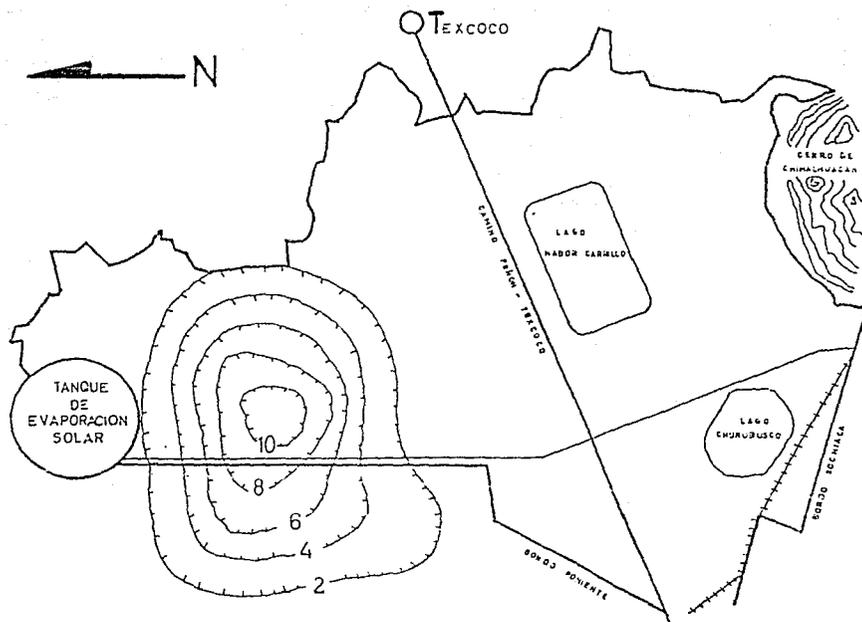


Figura 3 Localización de la zona de aplicación

principalmente por abundantes lavas y materiales piroclásticos, mezclados con material aluvial.

Mediante determinaciones radiométricas, se ha concluido que el relleno de la cuenca se efectuó con mayor intensidad entre el oligoceno superior y el mioceno superior. El espesor de estos materiales indica la gran profundidad de la cuenca, o bien, el levantamiento de las partes altas que rodeaban a la cuenca, ya que en la actualidad se encuentran afloramientos de caliza a 1 600 msnm tanto al norte como al sur. Estos levantamientos continuos deben haber sido fundamentales para el relleno constante de la cuenca.

Los materiales geológicos hasta los 180 m de profundidad que caracterizan a la zona, están constituidos por estratos predominantemente arcillosos, aunque desde luego existen también lechos arenosos, limosos y en menor cantidad orgánicos. Dentro de esta planicie también hay sedimentos de origen químico y biológico; entre los primeros se tienen evaporitas, sulfatos, carbonatos de calcio, hidróxidos de hierro y demás; entre los biológicos se encuentran restos de organismos animales y vegetales acuáticos, como son ostracodos, moluscos y diatomeas (Velázquez y Luna, 1981).

2.2.3 Hidrología

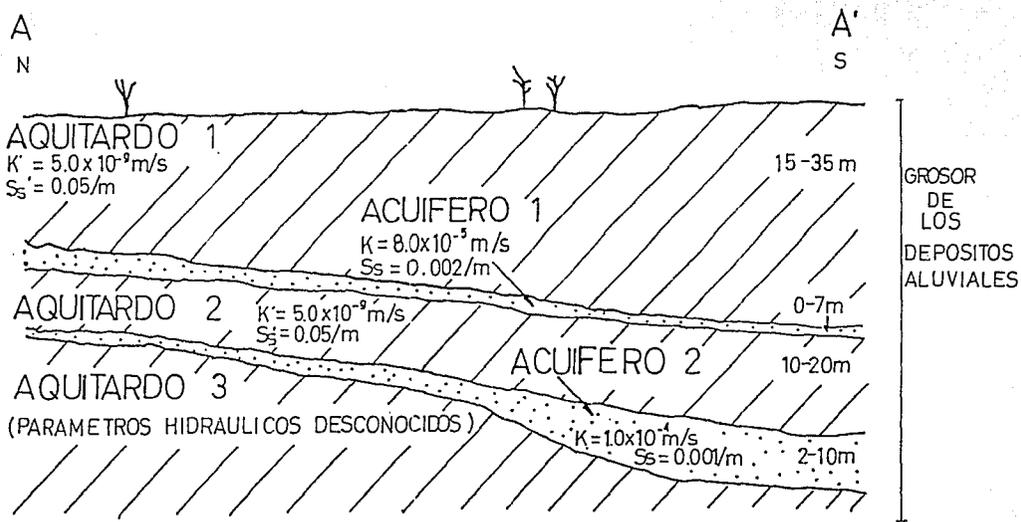
Sobre el lecho del ex-lago de Texcoco se concentran los escurrimientos de los siguientes ríos: San Juan Teotihuacán, Papalotla, Xalapango, Coxcacaco, Texcoco, Chapingo, San Bernardino, Santa Mónica, Coatepec, San Francisco, La Compañía y Churubusco.

El río Churubusco aporta gran cantidad de aguas negras y pluviales de la Ciudad de México. También son desfogadas en esta área las aguas negras de Ciudad Netzahualcóyotl por medio de plantas de bombeo.

Una característica de las aguas subterráneas de la zona del exlago de Texcoco, es la existencia de tres acuíferos, dos de alta concentración salina y un tercero de agua dulce, el primero se localiza a 30 m de profundidad (fig. 4 y 5).

El lago de Texcoco no tiene un flujo natural de salida. La capa de arcillas (aquitarado) puede abastecer de sales al acuífero salino por flujos a través de las grietas del aquitarado, pero debido a la sobreextracción de agua del acuífero, se ha formado un cono de succión y múltiples grietas por las cuales el agua de lluvia atraviesa el aquitarado y diluye sus concentraciones salinas y el acuífero (fig. 4 y 5) (Rudolph et al. 1989).

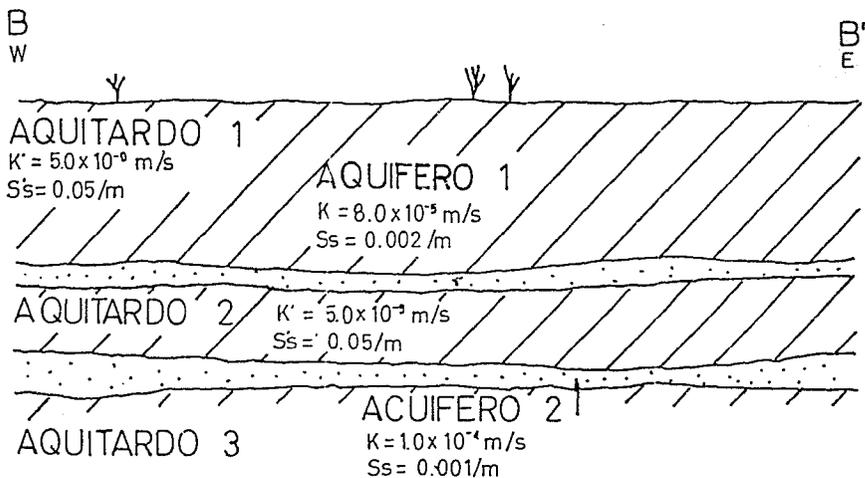
FIGURA 4 Sección transversal norte sur de la zona de aplicación. Rudolph, et al. 1989.



K - K' : CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA

S_s - S'_s : ALMACENAMIENTO ESPECIFICO

FIGURA 5 Sección transversal oeste este de la zona de aplicación. Rudolph, et al. 1989.



K-K': CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA

Ss-Ss: ALMACENAMIENTO ESPECIFICO

Por último, el Lago de Texcoco ha tenido como función principal la de servir como vaso regulador de las aguas negras y escurrimientos pluviales que fluyen hacia él, mediante el almacenamiento de éstos durante la época de lluvias y manteniendo a su vez, una descarga permanente dentro de los límites permisibles de las obras de desagüe de dicho ex-lago. Como el hundimiento de la Ciudad de México ha alterado el nivel relativo entre ésta y el fondo del lago, actualmente las partes más bajas de la Ciudad están varios metros abajo del fondo del lecho del Lago de Texcoco, lo que ha reducido la utilidad de dicho lago como regulador hidráulico, debido al peligro que representa para las zonas bajas de la Ciudad de México (Velázquez y Luna, 1981).

2.2.4 Clima

Según el sistema de clasificación climática de Koepen, modificado por García (1988), el clima es BS, Kw(x) (i), que corresponde a un semiseco con verano fresco (temperatura del mes más caliente inferior a 18⁰ C) y lluviosos, e invierno con un total de lluvia menor al 5% del total anual (Velázquez y Luna, 1981). Además de la estación meteorológica Chapingo, se encuentran otras tres: San Miguel, Tejocote y Texcoco, las cuales son muy parecidas en cuanto a la precipitación, ya que se encuentran valores de 636.5 mm, 621 mm, 558.5 mm y 691 mm, respectivamente. Para el presente estudio, la precipitación y la temperatura del lugar son muy importantes ya que con estos valores es posible realizar diagramas ombrotérmicos y calcular en qué meses hay déficit hídrico y en cuáles excesos de humedad y, por lo tanto, saber en qué meses puede ser más conveniente la aplicación del licor ácido (fig. 6).

2.2.5 Suelos

La zona del exlago de Texcoco comprende una área de 14,375 hectáreas, que se clasifican como Vertic Halaquept con 17 series. Entre ellas destaca la salada, que ocupa el 32% del área total y la cual representa los mayores problemas de salinidad de la zona.

"Las características generales de los suelos del exlago de Texcoco son las siguientes: se encuentran en terrenos planos y se clasifican como salinosódicos, con valores de pH que varían de 7.8 a 10.5, siendo las más frecuentes de 9 a 10. La conductividad eléctrica de los suelos varía de 0.337 a 87.0 mmhos/cm y con mayor frecuencia se presentan entre 10 y 30 mmhos/cm. Las texturas dominantes son las francas aunque varían de francos a arcillas" (Velázquez y Luna, 1981).

"Con respecto a los perfiles de suelos, generalmente, se identifican tres estratos: un horizonte A, caracterizado por la presencia de raíces; una capa denominada jaboncillo altamente salina y sódica, húmeda, de color verdoso o rojizo; y una capa de color negro, de textura arenosa. La presencia o ausencia de estas

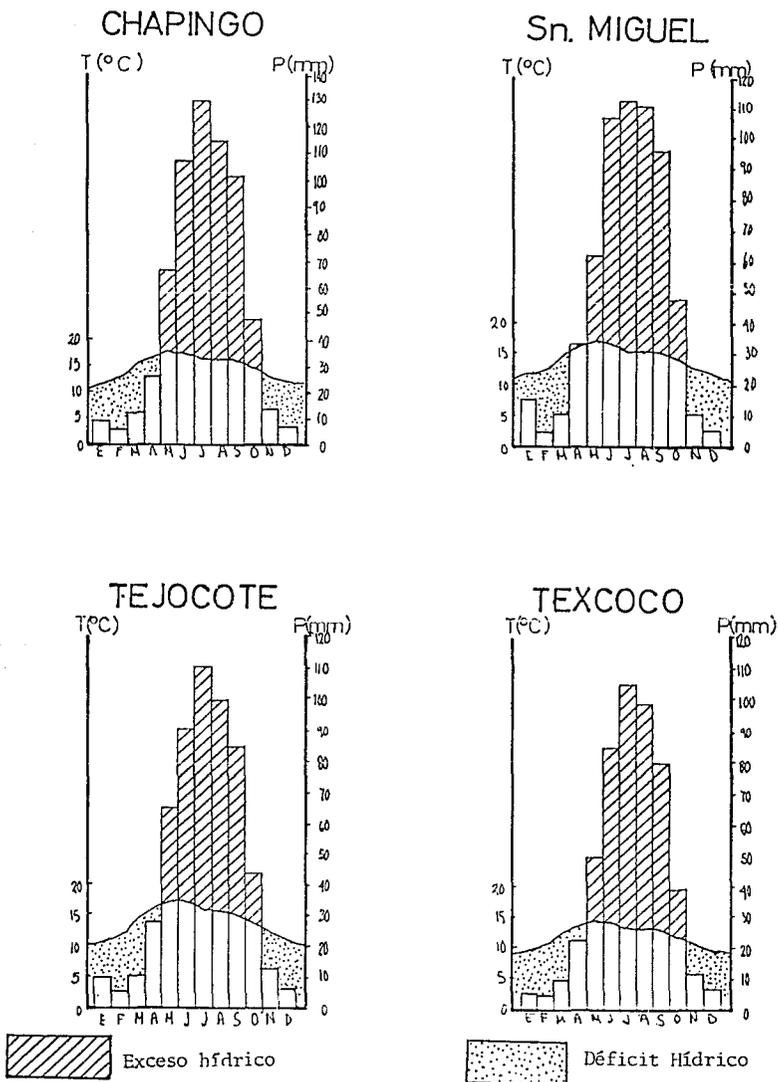


FIGURA 6 Diagramas ombrotérmicos de las estaciones metereológicas cercanas a la zona de aplicación.

tres capas o su orden de colocación en el perfil, son los principales aspectos que se tomaron en cuenta para definir cada una de las series (Velázquez y Luna, 1981).

Tabla 1. Clasificación de los suelos de la zona de aplicación

serie	subgrupo
1.- Agua negra	Typic Halaquept
2.- Aguila	Vertic Halaquept
3.- Ahuehuetes	Typic Ustifluvent
4.- Charco	Typic Ustifluvent
5.- Chimalhuacan	Typic Halaquept
6.- Gaviotas	Typic Halaquept
7.- Liebres	Typic Halaquept
8.- Nabor Carrillo	Typic Halaquept
9.- Patos	Typic Ustifluvent
10.- Potreros	Typic Halaquept
11.- Ranchito	Typic Durustoll
12.- Salada	Vertic Halaquept
13.- Sumidero	Typic Halaquept
14.- Taralanes	Typic Halaquept
15.- Torres	Vertic Halaquept
16.- Vivoras	Vertic Halaquept
17.- Xochiaca	Typic Halaquept

Tomado de Velázquez y Luna, 1981

2.3 CLASIFICACION DE LOS SUELOS AFECTADOS POR SALES

La clasificación adoptada se basa en la propuesta por el USDA Salinity Laboratory y perfeccionada por Massoud (Pizarro, 1978). La clasificación utiliza fundamentalmente dos parámetros para caracterizar los suelos: la conductividad eléctrica (CE) y el porcentaje de sodio intercambiable (PSI). La CE indica los efectos de la salinidad sobre las plantas y el PSI es un índice de los efectos sobre las propiedades del suelo. Existen otras clasificaciones como la propuesta por Szabolcs (1989), que realiza una revisión muy amplia de los suelos afectados por sales en el mundo y describe a los solonchaks según su hidrología, morfología y características químicas y los divide en: activos, residuales secos, minerales húmedos, hinchados, con costras, nitratos, cloruros, clorurosulfatados, sulfatoclorados, sulfatados, sosasulfatados, sosa y boratosolonchak.

Los suelos afectados por sales se clasifican en tres categorías:

2.3.1 Suelos salinos

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

Durante mucho tiempo se ha aceptado como límite de la salinidad un valor de conductividad eléctrica mayor de 4 mmhos/cm a 25°C. De acuerdo con esto, se consideraba no salino todo suelo de $CE < 4$ mmhos/cm a 25°C, sin embargo en la siguiente tabla se admite como límite inferior 2 mmhos/cm a 25°C porque se ha observado que a este límite de salinidad existen reducciones de rendimientos en algunos cultivos de hasta 25% (Pizarro, 1978).

Tabla 2. "Suelos salinos"

clase	CE mmhos/cm 25°C
ligeramente salino	2 - 4
medianamente salino	4 - 8
fuertemente salino	8 - 16
extremadamente salino	> 16

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

2.3.2 Suelos sódicos

Se definen como los que contienen en la zona radicular suficiente sodio adsorbido por el complejo de cambio para desarrollar propiedades químicas y físicas desfavorables, restringiendo el crecimiento normal de las plantas. La reacción de estos suelos varía según el PSI y la presencia o ausencia de CO_3^{2-} o HCO_3^- , el pH va de 8 hasta más de 9.5. El contenido de sales de estos suelos es generalmente bajo, menor de 2 mmhos/cm a 25°C.

Según el PSI los suelos se clasifican en:

Tabla 3. "Suelos sódicos"

clase	PSI	% Producción
ligeramente sódicos	7 - 15	80 - 60
medianamente sódicos	15 - 20	60 - 40
fuertemente sódicos	20 - 30	40 - 20
extremadamente sódicos	> 30	< 20

En estos suelos las arcillas se dispersan; son arrastradas por el agua de lavado y pueden acumularse a pocos centímetros de profundidad, formando una capa pesada de estructura prismática o columnar, poco permeable y asfixiante. La capa superior presenta textura gruesa y quebradiza. El PSI afecta a las propiedades del suelo y no directamente a las plantas, ya que éstas se ven perjudicadas por el deterioro de ciertas propiedades como la estructura y la permeabilidad.

2.3.3 Suelos salino-sódicos

Son aquéllos que contienen en la zona radicular una cantidad de sales solubles y un PSI suficientes para restringir el crecimiento de las plantas. Como límites se adoptan $CE= 2$ mmhos/cm a $25^{\circ}C$ y PSI mayor de 7. La reacción de estos suelos varía con su grado de salinidad y con la presencia de carbonatos o bicarbonatos.

Siempre que contengan un exceso de sales, su apariencia y propiedades son similares a las de los suelos salinos. En ese caso el pH raramente es mayor de 8.5 y las partículas permanecen floculadas. Si el exceso de sales solubles es lavado, las propiedades de estos suelos pueden cambiar notablemente, llegando a ser idénticas a las de los suelos sódicos (Pizarro, 1978).

2.4 LOS METALES PESADOS EN LA CONTAMINACION DE LOS SUELOS

En condiciones normales, la mayoría de los compuestos de los metales potencialmente tóxicos, se encuentran en cantidades fijadas por consideraciones de orden geológico y en formas químicas muy insolubles, por lo tanto, no representan un peligro para la biota.

Sin embargo, como consecuencia de las diversas actividades humanas, en estas últimas décadas, esta situación ha cambiado radicalmente. Se han acumulado en los suelos, diversos compuestos de estos elementos, en grandes cantidades y/o en formas solubles, rompiendo el equilibrio natural y causando la contaminación de acuíferos y, en ocasiones, la incorporación de estos elementos en la cadena trófica.

Cuando se quiere evaluar el grado de contaminación de un suelo, no basta con conocer el contenido total del elemento contaminante, ya que el resultado no expresa en que proporción y bajo qué condiciones este elemento puede solubilizarse y causar los problemas antes descritos. Es necesario utilizar técnicas y métodos que permitan obtener datos para conocer en qué fase(s) se acumulan los contaminantes y cuáles son los posibles cambios que pueden ocurrir, de acuerdo a las condiciones externas ya sean de origen natural o antrópico.

A pesar de que la termodinámica química proporciona la estructura conceptual del trabajo que permite describir los estados de los metales vestigiales en el suelo, en la práctica, el estudio de las especies químicas resulta muy complicado. Los análisis termodinámicos están restringidos por el importante papel que juegan los estados de no equilibrio relacionados a los organismos vivos, como es el caso de la absorción de metales por las plantas.

Las cantidades de elementos tóxicos, respecto al resto de los componentes del suelo, son muy pequeñas, por lo que generalmente se les denomina elementos vestigiales. La compleja composición del suelo dificulta el aislamiento de estas especies, por lo que en la práctica se han desarrollado métodos analíticos diferentes a los tradicionales, que permiten determinar las cantidades presentes en las diversas fracciones que componen la fase sólida, la acuosa y su interfase. Los datos sobre los tipos de especies presentes, aumentan la comprensión de su comportamiento, por lo cual es posible predecir su movilidad y por ende, su posible peligrosidad.

A partir del fraccionamiento se determinan los compuestos inorgánicos y orgánicos que forman el elemento vestigial en estudio; se investigan sus solubilidades y, con la información generada, se predice su acumulación y/o desplazamiento a través del perfil. En los casos de toxicidad, se pueden proponer acciones para resolver el problema y si el elemento estudiado es esencial en la nutrición vegetal (micronutriente), también es posible utilizar los datos para resolver problemas de deficiencia.

Algunos ejemplos de uso de la técnica de fraccionamiento de extracción de metales vestigiales son las siguientes: Gupta y Chen (1975) usaron un esquema de extracción secuencial para estudiar el fraccionamiento de metales pesados entre las varias fases geoquímicas de sedimentos. Lindau y Hossner (1982), también emplearon esta técnica para estudiar fracciones pantanosas y determinaron uniones de metales vestigiales en sedimentos superficiales. (Harrison et al. 1981) utilizaron extracción secuencial para investigar metales vestigiales como contaminantes en polvos de la calle y suelos en las orillas de la carretera. La extracción secuencial ha sido también importante en estudios de contaminación de fundiciones de metales (Kuo et al. 1983) y complejos industriales (Miller y McFee, 1983). Otro campo que usa ampliamente procedimientos de fraccionamiento está relacionado con investigaciones sobre lodos de aguas negras como en Sposito,

Lund y Chang (1982). La técnica tiene otros usos agronómicos (Iyengar et al. 1981; LeRiche y Weir, 1963 ; Shuman, 1979 y 1985).

Tabla 4. "Metales pesados"

elemento	densidad g/cc	conc. rocas ppm	esencial para veg/anim	contaminante "conocido"
Ag	10.5	0.07		X
Au	19.3	0.05		
Bi	9.8	0.17		X
Cd	8.7	0.2		X
Cr	7.2	100.0	X	X
Co	8.9	25.0	X	X
Cu	8.9	55.0	X	X
Fe	7.9	6x10 ⁴	X	X
Hg	13.6	0.08		X
La	6.2	25.0		
Mn	7.4	950.0	X	
Pb	11.3	13.0		X
Mo	10.2	1.5	X	X
Ni	8.9	75.0	X	X
Pt	21.5	0.05		
Tl	11.9	0.45		X
Th	11.5	9.6		X
Sn	7.3	2.0	X	X
U	19.1	2.7		X
V	6.1	135.0	X	
W	19.3	1.5	X	X
Zn	7.1	70.0	X	X
Zr	6.5	165.0		

Tomado de Davis (1980)

2.4.1. Metodo de fraccionamiento

Existen varios esquemas de fraccionamiento para la extracción secuencial de especies de los metales vestigiales (LeRiche y Weir 1963; Gibbs 1973; McLaren y Crawford 1973; Gupta y Chen 1975; Stover, 1976; Tessler et al. 1979; Shuman 1979; Hickey y Kittrick 1984; Shuman, 1985y Gibson y Farmer, 1986) que en general, se pueden clasificar en 5 grupos:

a) Metales pesados intercambiables

Se refiere a los metales pesados adsorbidos por las cargas superficiales de los coloides edáficos como arcillas y humus y a la fracción soluble, la cual puede ser separada de la intercambiable, realizando la extracción con un disolvente no polar para que no interfiera con los intercambiables, pero que sea capaz de

disolver las sales de interés, por ejemplo alcohol etílico.

Las concentraciones de metales intercambiables varían debido a la composición del agua de riego o más generalmente a la composición iónica del agua suministrada al suelo, independiente del fin con el cual se le agregó. Otra forma de cambio en las cantidades de metales intercambiables se debe a la actividad biológica de intercambio de H^+ por cationes adsorbidos a los coloides.

Los reactivos utilizados en el desplazamiento de los metales vestigio intercambiables son: $MgCl_2$ 1 M pH 7.0; $CaCl_2$ 0.01 M; acetato de sodio 1 M pH 8.2; acetato de amonio 1 M pH 7.0; $Mg(NO_3)_2$ 1 M pH 7.0.

b) Metales pesados ligados a carbonatos

Algunos investigadores han encontrado cantidades importantes de metales vestigiales ligadas a carbonatos, (Tessler et al. 1979; Hickey y Kittrick, 1984; Gibson y Farmer 1986) y como esta fracción es susceptible a cambios en el pH la extracción se realiza con una solución ácida pH 5.0 de acetato de sodio 1 M. En el campo se pueden tener cambios ligeros de pH a nivel de la rizósfera debido a la actividad vegetal y microbiana, estos cambios aunque pequeños (pH 0.2) pueden llegar a bio-disponibilizar algunos metales vestigio como el Cd y otros elementos, (Sposito et al. 1982, Glinski y Lipiec, 1990). Este efecto también puede llevarse a cabo debido al riego agrícola cuando se utilizan aguas residuales, por lluvia ácida y por la adición de abonos.

c) Metales pesados ligados a óxidos de hierro y manganeso

Los óxidos de hierro y manganeso se encuentran en el suelo como nódulos, concreciones, partículas cementantes o, simplemente, como revestimientos de otras partículas y agregados. Los metales vestigiales pueden ser adsorbidos a los óxidos de hierro y manganeso, pero como estos últimos son termodinámicamente inestables bajo condiciones anaerobias, -condiciones de campo en suelos mal aerados, sin estructura, sodificados, sin drenaje o con riegos por inundación-, los óxidos se reducen y los iones adsorbidos, se liberan y pasan a la solución.

Shuman (1985) plantea una metodología que permite diferenciar entre los metales vestigiales adsorbidos a óxidos amorfos y cristalinos del hierro. Este investigador extrae en forma secuencial, los iones intercambiables con nitrato de magnesio a pH 7, después separa a los metales unidos a la materia orgánica con hipoclorito de sodio a pH 8.5 y posteriormente separa los óxidos de manganeso con $NH_2OH-HCl$, pH 2; los óxidos amorfos de hierro con solución 0.2M de oxalato de amonio y óxido oxálico 0.2M a pH 3 y, finalmente, los óxidos cristalinos con la misma solución adicionada con ácido ascórbico 0.1 M.

Tessler et al. (1979), utilizan dos tipos de soluciones para extraer los metales ligados a los óxidos de hierro y manganeso amorfos y cristalinos. La primera es una mezcla de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ 0.3 M, citrato de sodio 0.175 M y ácido cítrico 0.025 M y la segunda se prepara con $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ 0.04 M en HOAC al 25% (v/v). Gibson y Farmer (1986) dividen esta fracción en fácil y moderadamente reducible para lo cual utiliza las soluciones siguientes: 0.1 $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}/0.01 \text{ HNO}_3$ y $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ 1.0 M/HAC 25%, respectivamente.

d) Metales pesados incorporados a la materia orgánica

Los metales pesados pueden encontrarse, y en algunos casos acumularse en la fase orgánica, en múltiples formas. Estos elementos pueden encontrarse en organismos vivos y sus restos, por ejemplo en bacterias, protozoarios, algas, hongos, artrópodos, gusanos, plantas, etc, o estar unidos a la materia orgánica degradada como las huminas, ácidos húmicos, ácidos fúlvicos y demás moléculas provenientes de las actividades de los organismos y que forman parte del suelo.

Al cambiar las condiciones de equilibrio del suelo, los metales vestigiales que se encuentran en la materia orgánica, pueden solubilizarse y diseminarse o, en caso contrario, formar compuestos insolubles y acumularse. La actividad humana frecuentemente altera el equilibrio del ecosistema suelo, debido principalmente a los métodos de labranza, aplicación de plaguicidas, utilización de aguas residuales, abonamiento y otras prácticas agrícolas (Aulio, 1980 ; Albasel y Cottenie 1985).

La metodología utilizada para la separación de esta fracción se basa en el uso de un oxidante. El más empleado es H_2O_2 , pero en los últimos años varios investigadores han utilizado otras sustancias como Gibson y Farmer (1986) que recomienda ácido nítrico 0.02 M; Shuman, (1985), NaOCl 0.7 M pH 8.5 y Tessler, et al. 1979) una solución de HNO_3 0.02 M + H_2O_2 a pH 2.0.

e) Metales pesados residuales

En esta fracción están considerados los metales vestigiales que se encuentran formando parte de la estructura de los minerales primarios y secundarios. La metodología para medir la disponibilidad de estos metales es, en general, muy compleja pues es necesario realizar una ataque total. Generalmente, se utiliza una digestión con una mezcla de ácidos, por ejemplo HF-HClO_4 . En el caso de que no se haya destruido la materia orgánica previamente, se requiere adicionar HNO_3 .

Shuman, (1985), divide la fracción mineral de acuerdo al tamaño de las partículas, es decir arcillas, limos y arenas y encuentra cambios importantes en el contenido de los metales vestigiales en cada una de ellas.

Existen otros componentes que sólo son considerados en casos específicos, ya que su concentración en comparación con las otras especies que conforman la fracción mineral, es baja. Este es el caso de los fosfatos, sulfuros y sulfatos.

Los fosfatos aunque raramente se encuentran en los suelos, algunos compuestos fosfatados forman compuestos metaestables y metamórficos de importancia en los procesos pedogénicos (Kabata y Pendias, 1989), un ejemplo son la apatita e hidroxiapatita, además algunas rocas fosfatadas contienen gran cantidad de elementos vestigiales, como F y Cd y algunos otros que también pueden ser incorporados, como el Ba, Bi, Cu, Mn, Pb, Re, Sr, Th, U, y Zn. Norrish, citado por Kabata y Pendias, (1989), reporta altas concentraciones de PbO (1-35%) incorporados a fosfatos en suelos ferralíticos y podzoles lateríticos.

Las concentraciones de sulfuros y sulfatos en suelos de regiones húmedas son muy bajas. En cambio, en los suelos áridos estas especies dominan o juegan un papel muy importante en la conducta de los metales pesados. Algunos metales vestigiales como Cd, Co, Ni, Sn, Ti y Zn pueden fácilmente coprecipitar con sulfuros de hierro.

Los sulfuros de metales vestigiales se convierten en formas más solubles cuando las condiciones de inundación disminuyen por drenaje y aeración (cambio en las condiciones reductoras). Por el contrario, los sulfatos se encuentran bajo condiciones oxidantes y son fácilmente solubles e intervienen fuertemente en los procesos de equilibrio edáfico y son también fácilmente disponibles para las plantas.

Después de analizar la información anterior, queda claro que la tendencia actual en los estudios ambientales, exige estudiar las diferentes formas químicas en que se pueden encontrar los metales pesados en el suelo, para poder interpretar adecuadamente los datos analíticos. No obstante, no existe un criterio uniforme acerca de qué tipo de extractantes es el óptimo. Esta discrepancia se relaciona con la dificultad de poder extraer selectivamente cada tipo de enlace que forman los metales pesados, como es el caso de los quelatos (materia orgánica), fuerzas coulómbicas en las posiciones de intercambio (arcillas, óxidos, oxo-hidróxidos, etc), fuerzas propiamente iónicas (minerales) y solubles.

Es más, diversos investigadores no consideran válidas las metodologías disponibles para fraccionar secuencialmente los metales, por lo que solamente informan los resultados obtenidos como la fracción soluble⁽²⁾ en CaCl_2 0.01 M y la extraíble con

(2) El análisis realizado con CaCl_2 , determina los metales solubles junto con los adsorbidos por las arcillas y la materia orgánica. Hay que considerar

HNO_3 0.43 M⁽³⁾. Aducen, que si lo que se busca es conocer la cantidad de metales solubles o potencialmente solubles, es suficiente con estos tipos de extracción. En el caso de que se requiera determinar la cantidad de los metales que pueden solubilizarse con un cambio de pH, recomiendan llevar a cabo una extracción con una solución ácida al pH que se escoja. Cuando se están estudiando los efectos de un cambio del potencial de óxido-reducción, sobre la disponibilidad de metales vestigiales, -especialmente Cu, Zn, Pb, y Cd-, agregan agua en exceso al suelo y, posteriormente, determinan las concentraciones de los elementos en la solución a diferentes tiempos (Tiller et al. 1984a y 1984b; Baghday, 1987; Reddy y Patrick, 1977; Pulford, 1986; Elliott y Linn, 1987 y Sommers y Lindsay, 1979).

El análisis tradicional para evaluar los metales pesados en el suelo se limita a estudiar las concentraciones solubles, intercambiables y totales, que son útiles principalmente en el diagnóstico edáfico. Los contenidos totales también permiten determinar los casos extremos de deficiencias y/o toxicidades. Por ejemplo, son utilizados para evaluar un problema nutricional, y definir si se debe adicionar el elemento a través de una fertilización o si basta con cambiar alguna condición del suelo para aumentar o disminuir la solubilidad de los compuestos presentes de dicho elemento.

Cuando se va a realizar un estudio de contaminación que se relacione con los suelos, deben seleccionarse métodos adecuados al alcance del proyecto, para no llegar a conclusiones mas allá de lo que permiten los métodos empleados. Comúnmente es necesario aplicar algún tipo de fraccionamiento, pues como ya se mencionó anteriormente, se puede conocer qué tipo de especies forman los metales, y en consecuencia visualizar el efecto de los cambios (composición del agua de riego, lluvia ácida, tiempo de degradación de la materia orgánica, uso de abonos, drenaje, etc.) sobre la disponibilidad de las concentraciones de los metales pesados y corregir deficiencias de aquéllos que actúan como micronutrientes, predecir su acumulación y/o desplazamiento a través del perfil y proponer soluciones en casos de toxicidad.

Para seleccionar los métodos de fraccionamiento, en primer término se deben considerar los resultados de los análisis de rutina (carbonatos, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, color, textura, etc.). Con base en estos resultados y los datos termodinámicos disponibles, se debe prever qué tipos de compuestos deben de estar formando los metales en ese suelo y entonces escoger a las soluciones extractantes adecuadas. También se deben considerar el número de muestras y el alcance y costo del proyecto.

que los metales potencialmente tóxicos, en general son transicionales por lo que en lugar de ocupar posiciones de intercambio, de preferencia forman quelatos.

(3) La extracción con HNO_3 da información sobre las cantidades de metales pesados en sus fracciones solubles, intercambiables y los retenidos débilmente en otras fracciones

En muchos casos, resulta recomendable complementar la información recabada con un análisis estadístico y con un fraccionamiento secuencial (realizado al menos con unas pocas muestras), que permita contrastar la suma de las concentraciones en cada fracción con el contenido total. Además, se debe considerar que esta metodología no permite medir la actividad biológica, que juega un papel fundamental en la disponibilidad de los metales, pues influye fuertemente en la cinética de las reacciones de los metales vestigiales.

A continuación se presenta el capítulo que describe las metodologías empleadas en este trabajo.

3. MATERIALES Y METODOS

3.1 LICORES ACIDOS

3.1.1 Muestreo

Se muestrearon licores ácidos de cada una de las cuatro tinas de decapado por duplicado a diferentes tiempos, antes de que el contenido de las tinas de procedencia se descargaran a la fosa (receptor final de los licores ácidos). Los ácidos se vertieron en frascos de polietileno de 1 L y se mantuvieron en refrigeración (5°C) para evitar la oxidación del Fe (II).

3.1.2. Técnicas y métodos de análisis

En general, se utilizaron reactivos grado analítico marcas Baker y Merck y soluciones patrón preparadas a partir de pastillas marca Metrepack.

En primer término, se determinaron los parámetros que podían proveer información para determinar los elementos a cuantificar y las condiciones de los análisis: pH (dilución 1:100) y conductividad eléctrica (dilución 1:100) de acuerdo a APHA, AWWA y WPCF (1985).

Para determinar exactamente la concentración de protones, ya que en un ácido tan concentrado el pH no puede medirse directamente, se determinaron las curvas de neutralización. Para lo cual, se calibró el potenciómetro con soluciones amortiguadoras de pH 7 y 4, se introdujo el electrodo de vidrio/calomel en vasos de precipitados de 100 mL, que contenían 25 mL de muestra y un imán de agitación y se colocaron sobre un agitador magnético. Por medio de una bureta de 50 mL, se añadió gradualmente una solución de NaOH de normalidad conocida (1.565 N), valorada por triplicado utilizando biftalato de potasio según Ayres (1970) y se mantuvo una agitación vigorosa y constante. Una vez obtenidos los datos se trazaron las curvas de neutralización.

Se realizaron análisis cualitativos por difracción y fluorescencia de rayos X y microscopía electrónica. La muestra sólida se obtuvo neutralizando 250 mL de licores con NaOH 1.5N hasta alcanzar un pH 11, de acuerdo con el procedimiento descrito para las curvas de neutralización. Los precipitados se filtraron al vacío con papel Whatman de poro fino, colocados en embudos Büchner, al vacío. Los filtrados se colectaron y evaporaron a 105°C y los sólidos cristalinos obtenidos se molieron en un mortero de ágata, al que igual que los precipitados previamente secados, hasta obtener una mezcla homogénea.

Las pastillas para el análisis de fluorescencia de rayos X, se prepararon mezclando 1 g de cada muestra molida, con 2 o 3 g de tetraborato de litio. Posteriormente, se colocaron en crisoles de platino y se fundieron en la mufla a 1100°C por 3 minutos. Los crisoles se manejaron con pinzas de cromo-niquel o níquel puro y guantes de asbesto. Para evitar el rompimiento de la pastilla al solidificar, el fundido se vació inmediatamente sobre una base plana de porcelana, colocada sobre una parrilla con graduación de temperatura alta (≈250°C). Una vez, preparadas las pastillas, se corrieron los espectros de las pastillas en un espectrofotómetro de fluorescencia de rayos X Philips modelo 1410, a 40 kV y 40 mA. Para el análisis por difracción de rayos X se montaron las muestras molidas, con ayuda de una espátula sobre portaobjetos cortados a la mitad y esmerilados de un lado, formando capas finas y homogéneas. El equipo utilizado fue un difractómetro de rayos X, marca Philips, y las condiciones del equipo fueron de 40 mA y 40 kV.

Para el barrido con el microscopio electrónico, se compactaron los sólidos mecánicamente en seco, formando un área plana para la incidencia de los electrones. Se utilizó un microscopio Jeol 35 C y un sistema de análisis por energía dispersiva Tracor. El voltaje aplicado fue de 15 kV.

Análisis de metales: se cuantificaron en los licores los metales que se determinaron en los análisis cualitativos y que conforman a los hierros y aceros: Fe, Cr, Mn, Al, Cu, Mg, Ca, Ti, Ni, Na; o se utilizan en otros procesos de la planta y que, desde un punto de vista ecológico, pueden ser importantes como es el caso del K, Zn y Pb

Determinación de hierro total soluble: se prepararon diluciones 1/25000 de las muestras, por dilución sucesiva 1/100 y 1/250, añadiendo 1 mL de H₂SO₄ concentrado (95-98 %) antes del último aforo para ajustar la concentración de ácido a 0.14 N (Pinta, 1972). Se hicieron las determinaciones en un espectrofotómetro de absorción atómica Varian Spectra 400 tomando 10 lecturas de absorbancia para cada muestra y estándar.

Determinación de sodio y potasio por fotometría de flama: se prepararon soluciones estándar en intervalos de 0-2 meq/L de K y 0-5 meq/L de Na. Las muestras se diluyeron 1/10, para determinar potasio, y 1/100 para determinar sodio. Se leyeron los valores de emisión de los estándares y muestras en un fotómetro de flama marca Corning 400.

Determinación de metales por absorción atómica: el análisis de metales se realizó de acuerdo con las condiciones especificadas en los manuales de los espectrofotómetros de absorción atómica Varian (1989) y Perkin-Elmer (1982), utilizando el espectrofotómetro Varian Spectra 400.

Los patrones se prepararon de manera que las concentraciones de ácido sulfúrico y hierro fueran muy similares a las de las muestras o sus diluciones. Por esta razón, los análisis de Fe y H_2SO_4 debieron preceder a los de los metales y, dado que sus concentraciones variaron muy poco, se tomaron como base los promedios: 5.5% w/v Fe y 1.2 N H_2SO_4 para preparar las muestras concentradas.

Los siguientes metales se determinaron en las muestras sin diluir: Al, Co, Cu, Ni, Pb y Ti. Las determinaciones de Cr y Mg requirieron diluciones 1/10, las de Ca 1/25 y las de Mn y Zn, 1/250.

Para determinar Al, Ca, Cr, Mg, Ni y Ti se utilizó una flama de óxido nitroso-acetileno para evitar interferencias químicas por ácido, Fe y otros metales. Las determinaciones de Ca y Mg requirieron de un supresor de ionización (K^+ 2000 ppm). Para todos los metales con longitudes de onda de absorción menores a 250 nm se utilizó una lámpara de deuterio como corrector de fondo para eliminar absorciones no atómicas.

Determinación de sulfatos: se utilizó el método turbidimétrico (SARH 1982) utilizando un espectrofotómetro visible marca Zeiss PM2K. La solución acondicionadora se preparó añadiendo, en orden: 300 mL de agua destilada, 75 g de NaCl con agitación hasta su disolución, 30 mL de HCl concentrado, 100 mL de etanol 95% y 50 mL de glicerina.

3.2 SUELOS

3.2.1 Selección de la zona de aplicación

Se escogieron los suelos del exlago de Texcoco por contar con las características deseadas para la elaboración de este proyecto: ubicación cercana a la industria generadora de los licores, suelos salino-sódicos y cálcicos y facilidades para la toma de muestra. Además, se consideró el ofrecimiento hecho por la Comisión del Lago de Texcoco, sobre la posibilidad de realizar posteriormente, los experimentos necesarios para confirmar en campo los resultados de este estudio.

3.2.2 Diseño de la toma de muestra

De acuerdo a las características del área seleccionada y con base en la bibliografía (Velázquez y Luna, 1981), se escogieron dos zonas, una de mediana salinidad denominada "La Tubera" y otra de extrema salinidad cercana al río "Churubusco".

En "La Tubera" se seleccionaron cinco puntos de muestreo a "juicio" (Barnett, 1984; Keith, 1991), uno al centro y cuatro más en los extremos de la zona. En "Churubusco" solamente se muestreó un punto, ya que esta área no cuenta con drenes para realizar un trabajo de campo y, por lo tanto, no interesa conocer las diferencias espaciales en las propiedades del suelo, sino únicamente confirmar la efectividad del licor en condiciones extremas.

Se tomaron 5 muestras por punto de muestreo con el fin de utilizar una de ellas para realizar la caracterización química y física del suelo, y las restantes para preparar las columnas del experimento. Con el fin de obtener columnas representativas, se tomaron las muestras con tubos de plástico (PVC), de diámetro 10.5 cm y de largo 60 cm, los cuales se introdujeron manualmente en el suelo. Las muestras se dividieron en dos niveles de profundidad 0-20 y 20-40 cm:

total de muestras de suelo para análisis físicos y químicos =
6 puntos de muestreo X 1 muestra X 2 profundidades = 12

total de muestras de suelo para experimento de columnas
= puntos de muestreo X 4 muestras X 2 profundidades = 48

3.2.3 Análisis

Se realizaron los siguientes análisis:

- materia orgánica con el método de Walkley y Black (Page et al. 1987) corrigiendo la interferencia por cloruros (Hesse, 1971).
- capacidad de intercambio catiónico (CIC), con acetato de sodio, alcohol etílico y acetato de amonio (Houba et al. 1988 ; Bascomb, 1964).
- total de bases intercambiables (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+), con el método de Bascomb (1964) modificado para suelos calcáreos utilizando BaCl_2 -TEA. Los dos primeros iones se cuantifican por espectroscopia de absorción atómica y los restantes por flama (Houba et al. 1988).
- metales extraíbles con ácido nítrico 0.43 M: hierro, manganeso, zinc y plomo. Se analizaron en un espectrofotómetro de absorción atómica modelo 1475 (Houba et al. 1988). Debido a la presencia de carbonatos, antes de adicionar la solución extractante, se destruyeron los carbonatos.
- porcentaje de sodio intercambiable: El valor teórico se calculó utilizando los valores de la CICT y del Na^+ intercambiable. Este último dato se obtuvo restando el sodio soluble del extracto de saturación del que fue extraído con BaCl_2 -TEA (trietanolamina). Además, antes de

leer el valor de emisión del sodio, se adicionó un amortiguador electrónico (solución de Cs y Al), con el fin de eliminar las interferencias de iones fácilmente ionizables (Kamphorst y Vens, 1980).

- Conductividad eléctrica. Se determinó en el extracto de la pasta de saturación y en una solución 1:5 suelo agua, en un puente de conductividad de Wheatstone (Kamphorst y Vens, 1980).
- Aniones solubles ($\text{CO}_3^{=}$, HCO_3^- , $\text{SO}_4^{=}$ y Cl^-). Se determinaron en el extracto de saturación y en una solución 1:5. Los dos primeros titulando con H_2SO_4 y midiendo el pH, los sulfatos se midieron indirectamente determinando bario por absorción atómica, y los cloruros por el método de Mohr (Varian, 1989 ; Kamphorst y Vens, 1980).
- Carbonatos totales. Método del calcímetro (Bascomb, 1961).
- Determinación cualitativa de fósforo soluble con FeCl_3 (Hall, 1979).
- Determinación cualitativa de nitratos solubles con H_2SO_4 -difenilamina, (Kamphorst y Vens, 1980).
- Determinación cualitativa de boro soluble con curcumina, (Hall, 1979).
- Color, por comparación con las tablas Munsell.
- Densidad aparente en campo con cilindros de volumen conocido.
- Densidad real por el método del picnómetro.
- Textura por el método de Bouyoucos.
- Potencial matricial (pF) con la olla de presión a 0.05 y 0.3 atms de presión (capacidad de campo).

3.2.4 Determinación de la dosis de mejorador (licor ácido)

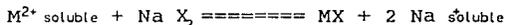
Preliminarmente se determinó la efectividad del licor ácido como mejorador de suelos salino-sódicos, para lo cual se adicionaron 50 mL de licor, lentamente y con agitación, a 10 gramos de suelo de cada una de 12 muestras. Después se filtraron las muestras y se lavaron con 50 mL de agua destilada. Posteriormente se secaron las muestras y se determinaron pH, CE y los principales cationes intercambiables: Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} .

Como se observó que funcionaba adecuadamente, la siguiente actividad consistió en calcular la dosis de licor ácido idónea. Para ello se utilizó la ecuación que recomienda Kamphorst (en Bolt, 1982) para estimar la concentración de iones divalentes que debe ser añadida:

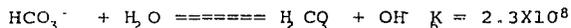
$$(Ca^{2+} + Mg^{2+}) = (PSI_{inicial} - PSI_{final}) \times CIC \times d \times h/100$$

donde $PSI_{inicial}$ indica el valor del porcentaje de sodio intercambiable que tiene el suelo, y el PSI_{final} el valor que se desea alcanzar. La CIC corresponde a la capacidad de intercambio cationica en meq/100 g, "d" la densidad del suelo en g/cm³ y "h" la altura en cm, de la capa de suelo que se quiere recuperar.

Este tipo de ecuación se basa en la reacción de sustitución del sodio intercambiable por el ion divalente:



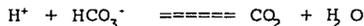
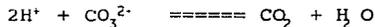
El pH de estos suelos generalmente es básico, porque los contraiones del sodio son carbonatos y bicarbonatos que se hidrolizan de acuerdo a la siguiente reacción:



Como en este caso no se adicionó directamente yeso o sales de calcio solubles, sino licor ácido impuro que disuelve al carbonato de calcio presente en el suelo y reacciona con los carbonatos y bicarbonatos solubles, se llevaron a cabo las siguientes reacciones:



Los H^+ provienen del ácido sulfúrico y el sulfato ferroso que son los principales componentes del licor que también reaccionan con los carbonatos y bicarbonatos solubles



Por lo tanto, para determinar la dosis de licor se realizaron los siguientes cálculos:

a) se aplicó la ecuación ya mencionada, recomendada por Kamphorst (en Bolt, 1982), a los valores del suelo muestreado en el punto 4 (esta muestra presenta valores extremos de salinidad y sodicidad).

b) se calculó la cantidad liberada de calcio con 50 mL de licor agotado.

- c) se determinó la cantidad total de meq de sodio intercambiable más los carbonatos y bicarbonatos solubles.
- d) se calculó la cantidad de ácido concentrado y diluido (2:15) que se requería adicionar a cada columna.
- e) se confirmó el efecto de esta cantidad de ácido, calculada mediante una prueba experimental con dos columnas que contenían suelo del punto 4, una con la estructura original del suelo y la otra preparada en el laboratorio (columna sin estructura).

Esta última columna se preparó dividiendo la tomada en campo (con estructura), en dos partes -cada una de 20 cm-. Posteriormente, cada porción se homogeneizó y, respetando la profundidad original, se empacó la nueva columna denominada sin estructura. A ambas columnas se les adicionó la dosis calculada de licor, se colectaron los lixiviados y el agua de lavado en matraces aforados de 250 mL, que se conservaron en frascos de polietileno. Se midió el pH, la conductividad eléctrica y el sodio soluble de estas soluciones y el pH final del suelo ya lavado.

$$(\text{Ca}^{2+}) = (63\% - 10\%) \times 72.5 \text{ meq}/100 \text{ g} \times 0.77 \text{ g}/\text{cm}^3 \times 40 \text{ cm}^3/100$$

$$(\text{Ca}^{2+}) = 11.84 \text{ meq}/\text{cm}^2 \times 86.6 \text{ cm}^2 \text{ (área de la columna)} \\ = 1025 \text{ meq}/\text{columna}.$$

Al realizar la neutralización del licor ácido hasta pH 7, se determinó que 50 mL de licor ácido concentrado liberan 165 meq de calcio, o sea 3.3 meq/mL. Por lo tanto,

licor concentrado requerido por columna = 311 mL

licor diluido (2:15) requerido por columna = 2332.5 mL

Si en el cálculo se consideran los carbonatos y bicarbonatos solubles presentes (tabla), se tiene:

meq de sodio intercambiable = 46 meq/100 g (aprox 63%)

meq de sodio intercambiable a sustituir = 36 meq/100g

meq de carbonatos y bicarbonatos solubles = 43 meq/100g

total = 79 meq/100 g de suelo

$$= 79 \times 2765/100 = 2184 \text{ meq}/\text{columna}$$

conc de licor ácido sin diluir = 2184/3.3 = 662 mL

conc de licor ácido diluido = 662 X 15/2 = 4964 mL

Por lo tanto, se definió una dosis de 5 000 mL que corresponde a 666.7 mL de licor original. Al probarla experimentalmente, se obtuvieron los siguientes resultados: existe un marcado efecto de la estructura de las columnas, entre mayor sea la superficie de contacto más efectivo es el mejorador, no importando el tiempo de retención. En el suelo sin estructura se requirieron aproximadamente 3000 mL para que el lavado del licor tuviera un pH de 7, mientras que en el suelo con estructura bastó con 2500 mL, a pesar de que el tiempo de retención fue menor. La dosis seleccionada fue suficiente para que el suelo cambiara ya lavado, su pH original de 10.21 a 7 y la conductividad de 15.7 mmhos/cm a 1.94.

La lámina de lavado (461.95 mm) se calculó con base en la conductividad eléctrica del agua de lavado. Se midió el volumen gastado hasta que la conductividad del agua de lavado fue menor a 10 mmhos/cm. También se consideró la precipitación anual media reportada por las estaciones climatológicas de la zona.

3.2.5 Experimentos con columnas de suelo

De la misma manera como se describió en el apartado anterior se prepararon 12 columnas (fig. 7) con suelo homogeneizado procedentes de 6 puntos de muestreo:

6 puntos de muestreo X 2 estructuras X 2 repeticiones = 24 columnas

Se colocaron las columnas con y sin estructura (24) con un diámetro de 10.5 cm y con 40 cm de altura, en una gradilla diseñada exprofeso para poder recolectar los lixiviados y el agua de lavado. Se adicionaron a cada columna 5 L de licor diluido (2:15). Cuando ya no se recuperaron lixiviados, se aplicó la lámina de lavado y, posteriormente, se realizaron los siguientes análisis en el suelo recuperado:

- conductividad eléctrica y pH en relación 1:5 suelo:agua
- capacidad de intercambio catiónica; sodio, potasio, calcio, magnesio intercambiables; y carbonatos totales (Houba, 1980 ; Bascomb, 1964)
- concentraciones extraíbles en ácido nítrico 0.4 M, del Zn y Pb ⁽⁴⁾ (Houba et al. 1980). Para determinar el efecto del licor sobre la disponibilidad de los metales pesados, se seleccionaron estos elementos como trazadores ya que presentan similitudes y diferencias importantes. Ambos están presentes en el licor, son anfóteros y forman complejos; pero el zinc es un micronutriente y el plomo es un elemento tóxico no esencial

(4) Antes de adicionar el ácido nítrico se destruyeron los carbonatos de acuerdo a la técnica señalada.

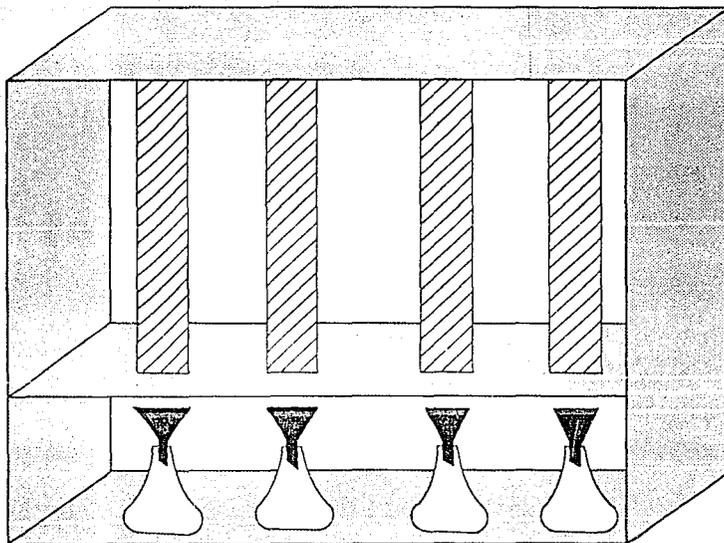


Figura 7 Dispositivo diseñado para el experimento con columnas de suelo.

4 RESULTADOS

4.1 LICORES ACIDOS

Los principales constituyentes de los licores ácidos son: ácido sulfúrico y hierro, aunque están presentes concentraciones menores (en orden descendente de concentración) de: manganeso, sodio, calcio, potasio, zinc, aluminio, plomo, cromo, níquel, magnesio, y cobalto (tabla 5).

Tabla 5. "Características del licor ácido de las diferentes tinajas de decapado"

No. muestra.	pH	pH 1/100	C.E. mmhos/cm (1/100)	Fe soluble (%)	sólidos totales. (g/L)	H ₂ SO ₄ (N)	FeSO ₄ ·7H ₂ O (% p/v)
1	0.36	2.19	3.89	6.0	448.8	1.309	29.9
2	0.31	2.12	4.15	5.8	515.0	1.143	28.9
3	0.36	2.19	3.51	4.8	420.1	0.968	23.9
4	0.22	2.13	4.02	5.6	670.7	1.233	27.9
5	0.29	2.12	3.93	5.0	1636.0	1.158	24.9
6	0.28	2.14	4.03	5.6	510.1	1.102	27.9
7	0.37	2.22	3.57	5.9	585.3	0.912	29.4
8	0.16	2.03	4.73	5.3	728.0	1.465	26.4

Tabla 5. (continuación)

No. muestra.	Co ppm	Cr ppm	Zn ppm	Mn ppm	Pb ppm	Al ppm	Ni ppm	Mg ppm	Ca ppm	Na ppm	K ppm
1	0.78	8.9	10.0	335	11.5	20.2	5.0	2.2	40	223	33
2	1.14	10.2	145.0	296	12.4	17.9	6.0	2.0	46	212	35
3	0.45	14.4	12.5	300	12.1	23.8	8.0	2.4	42	212	27
4	0.57	9.3	145.0	330	11.9	15.0	5.0	2.5	87	200	34
5	0.83	20.95	15.0	353	12.1	22.8	16.0	2.3	41	208	33
6	1.04	17.0	70.0	409	12.4	15.3	13.0	2.2	100	298	42
7	0.78	11.2	105.0	342	12.1	20.7	8.0	2.1	74	292	32
8	1.05	16.70	57.5	284	23.9	17.3	7.0	1.8	70	232	35

Los resultados del análisis de los licores ácidos (neutralizados) por fluorescencia de rayos X indican la presencia de gran cantidad de hierro y concentraciones menores de calcio y potasio. Los elementos presentes en cantidades vestigiales no se detectaron. El análisis por barrido, realizado en el microscopio electrónico, confirma la presencia de Fe y S. La difracción de

rayos X en las fracciones sólida y soluble muestra la presencia de óxidos hidróxidos de hierro (FeOOH), sulfatos de sodio y de hierro, así como, sulfatos dobles de sodio y de hierro.

El hierro presenta un valor promedio de 5.5% (que varía de 4.8 a 6.0). El manganeso se encuentra en concentraciones de 284 a 409 ppm, con una media de 331 ppm. El sodio tiene un intervalo de concentraciones de 200 y 298 ppm, con un valor promedio de 234 ppm. El calcio varía de 40 a 100 ppm, con una media de 62.5 ppm. El zinc varía de 10 a 145 ppm, con un promedio de 70 ppm. El potasio presenta valores desde 27.0 hasta 42.0 ppm, con un valor medio de 33 ppm. El aluminio varía de 15 a 23.8 ppm, con una media de 19.1 ppm. El plomo presenta valores entre 11.5 hasta 23.9 ppm, con un valor promedio de 13.6 ppm. En cromo, el valor mínimo es de 8.9 y el más alto de 20.9, con un valor medio de 13.6. El níquel presenta un intervalo de 5.0 a 16.0 ppm con una media de 8.5 ppm. El magnesio varía desde 1.8 hasta 2.5 ppm, con una media de 2.2 y por último el cobalto presenta concentraciones 0.45 hasta 1.14 ppm, con una media de 0.8 (tabla 6).

Tabla 6. "Características del licor ácido"

parámetro	x	s	c.v.
pH	0.29	0.066	23.6
pH (1/100)	2.14	0.055	0.35
C.E. (1/100)	3.98	0.35	8.9
H ₂ SO ₄ (N)	1.16	0.17	14.4
Fe (%)	5.5	0.4	7.3
FeSO ₄ (%)	27.4	2.0	7.3
Mn (ppm)	331.0	37.0	11.2
Na (ppm)	234.0	36.0	15.4
Ca (ppm)	62.5	21.0	35.1
Zn (ppm)	70.0	53.0	75.9
K (ppm)	33.0	3.0	11.5
Pb (ppm)	13.6	3.0	28.9
Al (ppm)	19.1	3.0	16.1
Cr (ppm)	13.6	4.0	30.0
Ni (ppm)	8.5	3.0	43.6
Mg (ppm)	2.2	0.2	9.5
Co (ppm)	0.8	0.2	27.1

C.E. = mmhos/cm a 25° C. N= 8.

x = media estadística

s = desviación tipo (estándar)

c.v. = coeficiente de variación

ppm = mg/L

Los resultados del análisis de los licores ácidos (neutralizados) por fluorescencia de rayos X indican la presencia de gran cantidad de hierro y concentraciones menores de calcio y potasio. Los elementos presentes en cantidades vestigiales no se detectaron. El análisis por barrido realizado en el microscopio electrónico, confirma la presencia de Fe y S. La difracción de rayos X en las fracciones sólida y soluble muestra la presencia

de óxidos hidróxidos de hierro (FeOOH), sulfatos de sodio y de hierro, así como, sulfatos dobles de sodio y de hierro.

El hierro presenta un valor promedio de 5.5 % (que varía de 4.8 a 6.0). El manganeso se encuentra en concentraciones de 284 a 409 ppm, con una media de 331 ppm. El sodio tiene un intervalo de concentraciones de 200 y 298 ppm, con un valor promedio de 234 ppm. El calcio varía de 40 a 100 ppm, con una media de 62.5 ppm. El zinc varía de 10 a 145 ppm, con un promedio de 70 ppm. El potasio presenta valores desde 27.0 hasta 42.0 ppm, con un valor medio de 33 ppm. El aluminio varía de 15 a 23.8 ppm, con una media de 19.1 ppm. El plomo presenta valores entre 11.5 hasta 23.9 ppm, con un valor promedio de 13.6 ppm. El cromo el valor mínimo es de 8.9 y el más alto de 20.9, con un valor medio de 13.6. El níquel presenta un intervalo de 5.0 a 16.0 ppm con una media de 8.5 ppm. El magnesio varía desde 1.8 hasta 2.5 ppm, con una media de 2.2 y por último el cobalto presenta concentraciones 0.45 hasta 1.14 ppm, con una media de 0.8 (tabla 6), (figs. 8, 9 y 10).

Los contenidos del plomo y el aluminio están relacionados con la acidez (r del plomo vs $\text{pH} = 0.75$ y r del aluminio vs $\text{pH} = 0.6$), ya que la solubilidad de estos metales es mayor a menor pH . Esta relación no se observó con los otros elementos metálicos, cuya concentración posiblemente depende en mayor grado de la composición de la varilla decapada, de la chatarra utilizada para su fabricación y/o de los aditivos utilizados como anticorrosivos (producto comercial Turco que contiene principalmente ácido fosfórico, sulfato de zinc y vestigios de níquel y otros metales).

La composición de los licores agotados de las diferentes tinas de decapado es homogénea, sobre todo en lo que respecta al ácido sulfúrico y hierro, que son los componentes principales; los cuales se encuentran dentro de los intervalos informados en la literatura para otras industrias del mismo tipo (ECE, 1981). Se observó que los elementos presentaron diferentes coeficientes de variabilidad, el zinc, níquel, calcio, cromo, plomo, y cobalto presentaron los mayores valores; el sodio, potasio, aluminio y magnesio valores medios y el hierro y manganeso bajos (tabla 6). Aparte de los sulfatos, el licor contiene vestigios de fosfatos.

Los metales contenidos en el ácido, se pueden clasificar por su comportamiento químico, como sigue:

Na y K: metales alcalinos que forman sales solubles en todo el intervalo de pH . Presentan potencial iónico (Z/r) menor de 3.

Ca y Mg: metales alcalinotérreos, forman compuestos menos solubles que los alcalinos y disminuye su solubilidad al aumentar el pH . Presentan potencial iónico (Z/r) alrededor de 3.

ANALISIS DEL LICOR ACIDO UTILIZADO COMO MEJORADOR

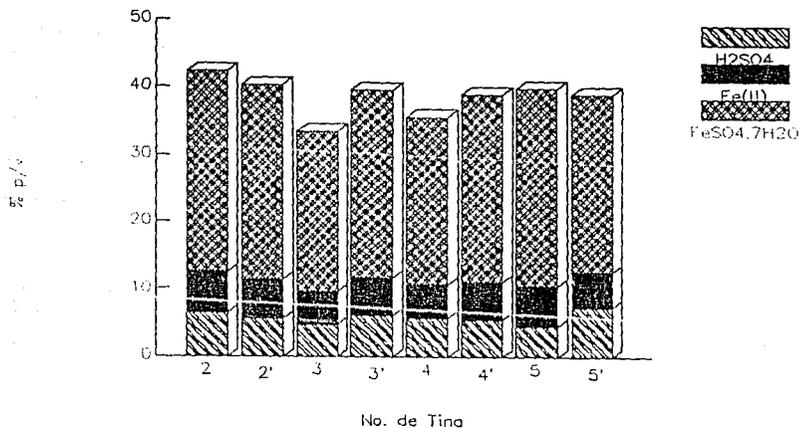


Figura 8 Componentes principales de los licores ácidos.

ANALISIS DEL LICOR ACIDO UTILIZADO COMO MEJORADOR

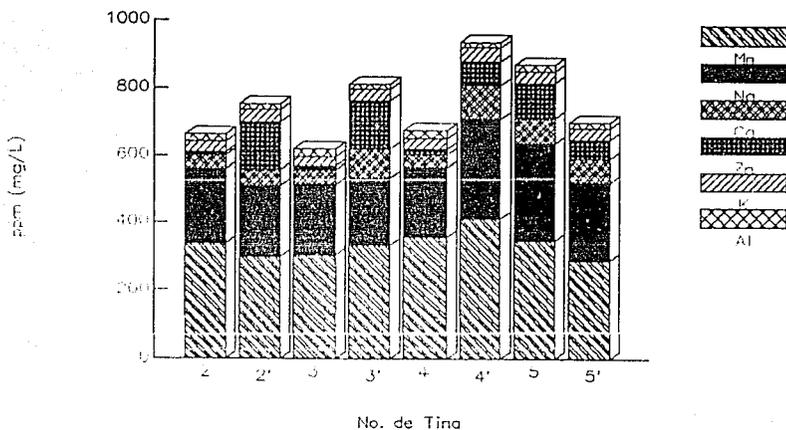


Figura 9 Metales más abundantes en los licores ácidos.

ANALISIS DEL LICOR ACIDO UTILIZADO COMO MEJORADOR

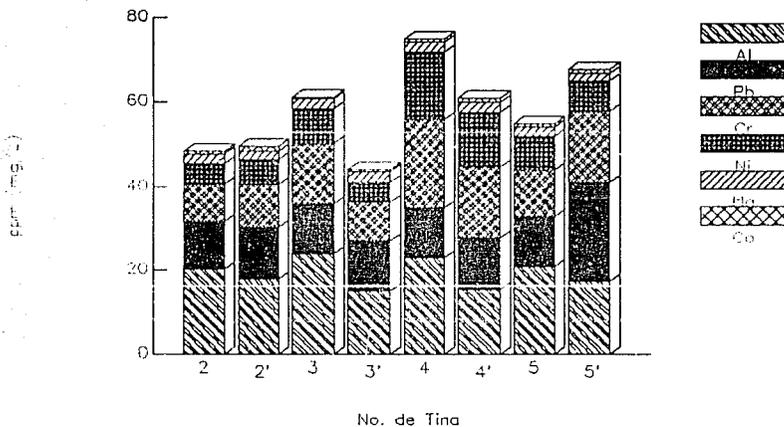


Figura 10 Metales menos abundantes en los licores ácidos.

Al, Mn, Zn, Cr, Co y Ni: presentan potencial iónico (Z/r) alto entre 3 y 12. A excepción del níquel, todos presentan carácter marcadamente anfótero. Son solubles en medio ácido y forman hidróxidos, oxohidróxidos insolubles a pH alcalinos los cuales se redisuelven en medios fuertemente ácidos. Todos forman compuestos de coordinación.

También pueden clasificarse con base en su actividad sobre la biota:

Na: relativamente inofensivo para las plantas (Spinacea oleracea, esencial para plantas C4) y tóxico en concentraciones muy altas, esencial para mamíferos e importante para animales (por ejem. Ahuautlea mexicana) y plantas marinas y plantas de ambientes salinos como: *Distichlis spicata*, Suaeda sp, etc. (Richards, 1980, Menguel y Kirkby 1987).

K, Ca y Mg: elementos esenciales para todos los organismos, son macronutrientes importantes en la nutrición vegetal.

Mn, Zn y Co: esenciales para todos los organismos, importantes micronutrientes en la nutrición vegetal, pero en altas concentraciones son tóxicos (200-5300 ppm de Mn, 150-200 ppm de zinc y más de 0.6 ppm de cobalto).

Al, Pb y Ni: los tres elementos son tóxicos para las plantas y los dos primeros lo son también para los animales. El níquel es esencial para la nutrición animal.

La composición del licor, de acuerdo a las normas ecológicas internacionales y nacionales, se clasifica como un desecho peligroso, pues es muy ácido y contiene metales tóxicos en solución. No obstante, si se analiza su composición para su reuso como mejorador de suelos salino-sódicos, se obtienen las siguientes conclusiones:

La acidez es muy útil, pues reacciona con los carbonatos de sodio y calcio, disminuyendo la basicidad del suelo y liberando calcio que sustituye al sodio de las posiciones de intercambio. Por lo tanto, durante el proceso de recuperación la acidez del suelo disminuye drásticamente, pues el licor reacciona con los carbonatos y bicarbonatos.

El destino y efecto de los metales depende de la concentración final y las propiedades químicas de los elementos. El sodio permanece soluble en la fase acuosa del suelo. La concentración relativa de este elemento presente en el licor respecto al del suelo es despreciable. Cuando se aplica el lavado del suelo se elimina todo el sodio el cual se drena o se lixivia. En el primer caso, generalmente se envía a un evaporador solar que pertenece a la empresa Sosa Texcoco, donde se utiliza para obtener carbonato

de sodio o para producir *Spirulina sp.*, que es una alga que requiere de un medio básico (el sodio es un elemento esencial para los mamíferos y muy importante para plantas y animales que viven en aguas saladas). En el caso de que la solución se lixivie y viaje a estratos más profundos, no hay peligro de que contamine el acuífero, pues éste es naturalmente salino y de pH básico.

La adición de potasio es benéfica, pues es un elemento esencial para todos los organismos. Por su solubilidad se pierde durante el lavado, junto con la solución del suelo. Si el tiempo de residencia es grande, puede ocupar sitios de intercambio en el complejo de adsorción del suelo.

El calcio y el magnesio son elementos esenciales para todos los organismos y se requieren para sustituir al sodio del complejo de intercambio, por lo que su adición en formas solubles a suelos sódicos siempre es favorable.

El Mn, Zn y el Co son esenciales para todos los organismos y solamente si las condiciones del suelo permiten una concentración soluble muy alta, se pueden presentar diversos grados de toxicidad. Durante el tratamiento de recuperación, dependiendo del tiempo de residencia y la velocidad de neutralización del licor, pueden insolubilizarse o mantenerse en solución. Al efectuarse el lavado se precipitan en capas más profundas del suelo (aproximadamente la profundidad de la capa rica en carbonato de sodio alcanza un espesor de 0 a 15 m en algunas áreas y de 0 a 35 m en otras). Debido a la alta concentración de carbonatos, y el alto pH, aun en condiciones reductoras no forman quelatos con la materia orgánica.

Los elementos Al, Pb y Ni no son esenciales, como ya se comentó. Por el contrario son tóxicos para las plantas (los intervalos de toxicidad son muy grandes y dependen de las especies vegetales). Para animales el níquel en bajas concentraciones es esencial. Su comportamiento es muy dependiente del pH, como lo indican los análisis de los licores y precipitan rápidamente a valores de pH neutros, especialmente el plomo forma carbonatos muy insolubles, por lo que en forma análoga al manganeso, zinc y cobalto, durante el lavado se precipitan paulatinamente en capas inferiores.

Respecto a los aniones presentes en el licor, los sulfatos se encuentran principalmente como sulfatos de sodio, calcio y hierro. Durante el tratamiento se forman sulfatos de calcio y sodio, los cuales presentan diferente solubilidad. Los de sodio son altamente solubles y viajan con la solución del suelo, mientras que los de calcio son menos solubles, por lo que se distribuirán en diferentes estratos. Los fosfatos forman compuestos insolubles que son útiles en la nutrición vegetal.

4.2 SUELOS

4.2.1 Características químicas del suelo

IONES SOLUBLES:

El pH, conductividad eléctrica y concentración de iones solubles se determinaron en extractos de saturación (fig. 11), y también en relación suelo:agua de 1:5, ya que por ser suelos sódicos y tener amorfos, el extracto obtenido fue muy pequeño y el punto de saturación difícil de observar. No obstante estas limitantes, los parámetros determinados son similares en ambos extractos. Por ejemplo, la cantidad de sodio soluble/100g de suelo determinada en el extracto 1:5, comparada con la de saturación, presenta un factor de correlación 0.972 y las valores promedios son, respectivamente, 112.7 y 107.0 meq/100 g.

El pH determinado en extracto 1:5 es mayor que el de saturación, ya que la solución es más diluida y la concentración de cationes es menor, por lo que algunos protones quedan retenidos en la zona de influencia de las partículas coloidales del suelo.

El pH del extracto de la pasta de las 12 muestras analizadas es mayor de 9.53. Estos altos valores de pH se deben a las altas concentraciones de carbonatos y bicarbonatos, que al hidrolizarse liberan OH^- (tabla 7). Las sales que se encuentran en estos suelos son de mayor a menor concentración: cloruros, carbonatos, bicarbonatos y sulfatos de sodio, ya que es el catión predominante. Únicamente se observaron diferencias en algunas muestras de los puntos 2, 5 y 6. La muestra 2a contiene mayor cantidad de bicarbonatos que de carbonatos, la 2b, 5b y 6a presentan una mayor concentración de sulfatos, por lo que presentan pH menores que el resto de las muestras analizadas.

Los cationes determinados en la solución del suelo fueron sodio, potasio, magnesio y calcio. El sodio es el ion predominante, las concentraciones de los otros cationes son bajas, especialmente de calcio y magnesio por la presencia de carbonatos (tablas 7 y 8).

La suma de cationes no corresponde a la de los aniones en todos los casos, debido a que únicamente se cuantificaron los aniones principales: sulfatos, carbonatos, bicarbonatos y cloruros. Al comparar el cálculo de la concentración de sales solubles con base en la suma de cationes, con la efectuada a partir de la suma de aniones o de la conductividad eléctrica, los valores encontrados fueron muy similares (tablas 7 y 8). La correlación, entre estos cálculos utilizando los extractos 1:5 fue mejor que con los de la pasta de saturación (fig. 12 y 13).

Tabla 7 "Extracto de la pasta de saturación"

M	P.S. %	pH	C.E.	CO ₃ = HCO ₃ - Cl- SO ₄ = K+ Na+					
				-----meq/L-----					
1a	82.8	9.7	33.1	94.0	75.2	158.9	85.3	27.5	454.5
1b	116.5	9.6	49.4	159.8	84.6	272.4	56.9	40.8	715.9
2a	85.5	9.5	18.0	23.5	40.0	71.5	31.7	13.3	181.8
2b	84.5	9.6	45.6	75.2	82.3	274.7	108.3	39.5	477.3
3a	161.8	9.8	40.8	117.5	58.8	215.7	75.2	30.5	500.0
3b	195.9	10.1	63.2	202.1	65.8	342.8	59.0	34.5	670.5
4a	133.1	9.9	53.8	178.6	122.2	384.8	114.2	40.8	704.5
4b	104.1	10.1	53.3	188.0	35.3	380.5	162.9	37.5	795.5
5a	120.3	9.8	52.0	145.7	63.5	325.7	87.7	40.8	863.6
5b	176.2	9.7	45.0	65.8	58.8	289.4	69.5	36.4	590.9
6a	76.2	9.9	86.6	1146.8	211.5	978.6	82.8	66.0	1545.4
6b	31.8	9.9	60.7	197.4	61.1	610.6	58.0	43.8	954.5

M= muestra. La conductividad eléctrica (CE) está expresada en mmhos/cm a 25°C. PS= Porcentaje de saturación a= profundidad de la columna de 0-20 cm, b= profundidad de la columna de 20-40 cm

Tabla 7 Continuación

M	S-	S+	CE/S-	CE/S+	PO atm	N		
						S-	N C.E.	S+
1a	413.4	482.0	34.4	40.2	12.7	0.41	0.40	0.48
1b	573.7	756.7	47.8	63.1	20.1	0.57	0.59	0.76
2a	166.6	195.1	13.9	16.3	4.4	0.17	0.22	0.20
2b	540.4	516.8	45.0	43.1	11.7	0.54	0.55	0.52
3a	467.1	530.5	38.9	44.2	14.5	0.47	0.49	0.53
3b	669.6	705.0	55.8	58.7	22.8	0.67	0.76	0.70
4a	799.8	745.3	66.6	62.1	18.5	0.80	0.65	0.75
4b	766.6	833.0	63.9	69.4	19.2	0.77	0.64	0.83
5a	622.6	904.4	51.9	75.4	20.9	0.62	0.62	0.90
5b	483.5	627.3	40.3	52.3	15.1	0.48	0.54	0.63
6a	2419.7	1611.4	201.6	34.3	102.6	2.42	1.04	1.61
6b	927.2	998.3	77.3	83.2	21.9	0.93	0.73	1.00

M= muestra. La conductividad eléctrica (CE) está expresada en mmhos/cm a 25°C. S= Sumatoria de aniones. S+= Sumatoria de cationes. CE/S=- conductividad eléctrica calculada con la sumatoria de los aniones. CE/S+= Conductividad eléctrica calculada con la sumatoria de los cationes. PO= Presión osmótica en atmósferas calculado con la conductividad eléctrica. N= Concentración normal de sales calculada con la sumatoria de aniones, cationes y con la conductividad eléctrica. a= profundidad de la columna de 0-20 cm, b= profundidad de la columna de 20-40 cm

En los puntos de muestreo 1, 2, 3, la concentración de sales en el horizonte profundo (20-40 cm) fue mayor que la del estrato superficial (0-20).

Otro aspecto importante es el alto valor de la conductividad eléctrica de esta zona. En un suelo sin problemas de salinidad los valores de CE son menores a 4 mmhos/cm y en estas muestras se obtuvieron resultados de 18 a 86 mmhos/cm (tabla 7), que corresponden a las altas concentraciones de iones solubles presentes (extracto en la pasta de saturación 0.2-1.61 N).

EXTRACTO DE LA PASTA DE SATURACION

SALES SOLUBLES

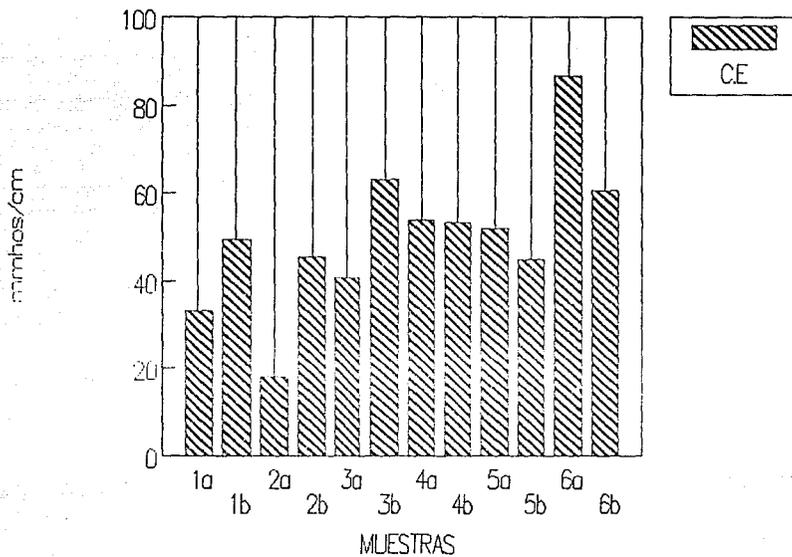


FIGURA 11 Conductividad eléctrica del extracto de la pasta de saturación por punto de muestreo y profundidad (a= 0-20 y b= 20-40 cm).

Tabla 8 "Análisis de extracto 1/5 suelo/agua"

M	pH	C.E. mmhos/cm	CO ₃ =	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁼	N CE eq/L
			-----meq/L-----				
1a	9.96	5.6	13.9	13.1	21.0	26.4	0.06
1b	10.08	11.4	35.0	18.5	58.5	26.7	0.136
2a	9.92	2.7	4.0	17.0	8.5	25.9	0.032
2b	10.06	6.4	18.0	18.0	50.0	26.4	0.076
3a	10.08	14.0	46.0	24.5	65.9	29.0	0.168
3b	10.05	17.7	62.0	30.0	88.7	26.9	0.212
4a	10.21	15.7	64.0	22.0	79.5	30.5	0.188
4b	10.11	9.3	28.0	18.0	44.9	26.7	0.111
5a	9.91	13.2	36.0	25.0	71.0	28.5	0.158
5b	9.84	17.6	40.0	38.0	100.0	28.2	0.211
6a	10.36	18.3	76.0	27.0	100.0	26.7	0.219
6b	10.03	5.6	14.0	12.0	31.3	25.8	0.067

C.E.= Conductividad eléctrica en mmhos/cm a 25°C. N CE= concentración normal de sales calculada con la conductividad eléctrica.

Tabla 8. Continuación

M	Na+	K+	Ca++	Mg++	SUM-	SUM+	N-	N+
	-----meq/l-----						--eq/l--	
1a	76.0	3.7	0.3	0.2	74.5	80.2	0.07	0.08
1b	140.0	8.6	0.2	1.8	138.7	150.6	0.14	0.15
2a	39.0	7.5	0.2	0.1	55.4	46.8	0.06	0.04
2b	79.0	4.5	0.2	0.1	112.4	83.8	0.11	0.08
3a	162.0	10.2	0.3	0.0	165.4	172.5	0.17	0.17
3b	211.0	13.5	0.2	0.1	207.6	224.8	0.21	0.22
4a	198.0	10.7	0.3	0.0	196.0	209.0	0.20	0.21
4b	118.0	6.6	0.0	0.0	117.6	124.6	0.12	0.12
5a	170.0	9.2	0.1	0.0	160.5	179.3	0.16	0.18
5b	210.0	13.5	0.2	0.0	206.2	223.8	0.21	0.22
6a	232.0	11.9	0.1	0.0	229.7	244.0	0.23	0.24
6b	74.0	3.3	0.1	0.2	83.0	77.6	0.08	0.08

N- = concentración normal de sales calculada con la sumatoria de los aniones. N+ = concentración normal de sales calculada con la sumatoria de los cationes. SUM- = Sumatoria de los aniones. SUM+ = Sumatoria de los cationes. a= profundidad de la columna 0-20 cm. b= profundidad de la columna 20-40 cm.

Las conductividades eléctricas calculadas a partir de la sumatoria de aniones son más parecidas a las medidas directamente por medio de un puente de Wheastone, que las obtenidas a partir de la sumatoria de cationes. Esta diferencia se puede deber a que para cuantificar al sodio se requirió realizar diluciones sucesivas.

PRINCIPALES ANIONES EN SOLUCION

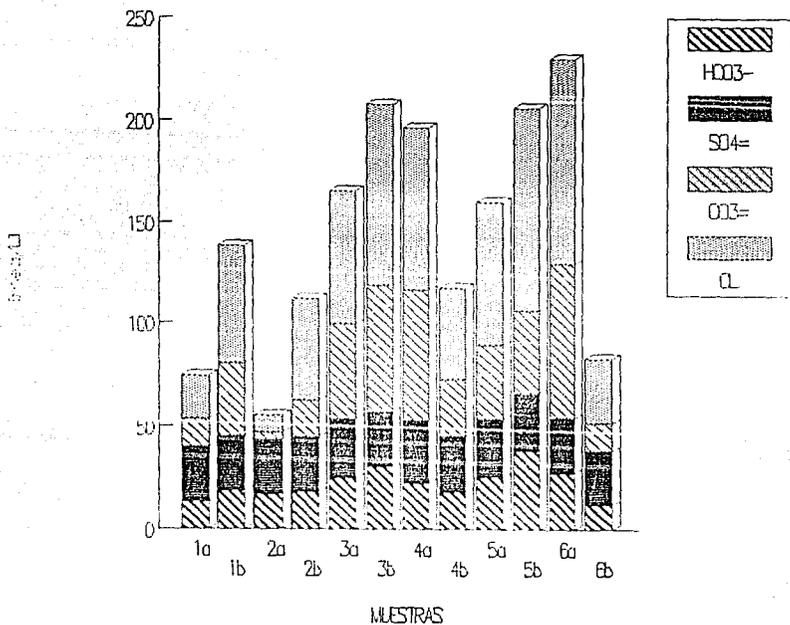


FIGURA 12 Sodio y potasio en solución en la relación 1/5 por punto de muestreo y profundidad (a= 0-20 y b= 20-40 cm).

PRINCIPALES CATIONES EN SOLUCION

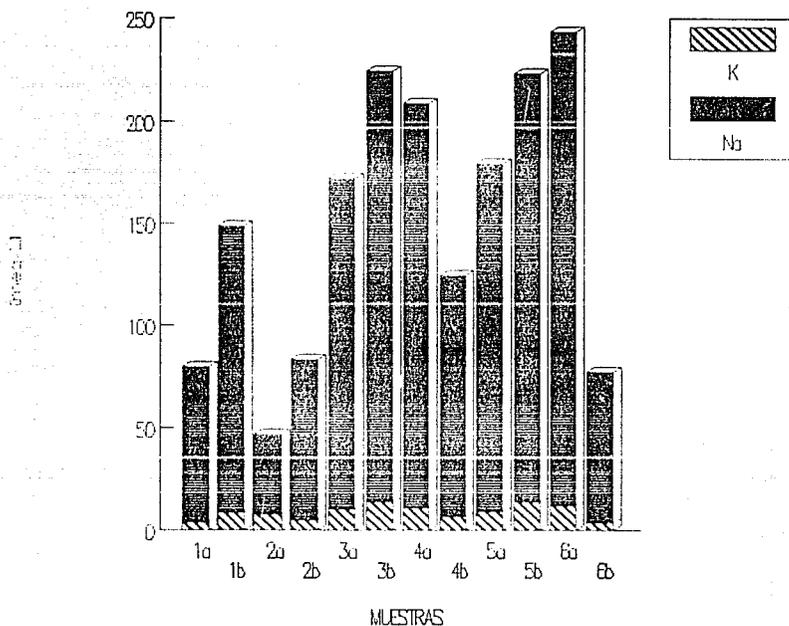


FIGURA 13 Aniones en solución en la relación 1/5 por punto de muestreo y profundidad (a= 0-20 y b= 20-40 cm).

Tabla 9. "Correlaciones de pH y conductividad eléctrica con los aniones y cationes solubles"

correlaciones de la solución 1/5 suelos/agua: aniones					
	CO ₃ =	HCO ₃ -	Cl-	SO ₄ =	SUM-
pH	0.92	0.94	0.87	0.89	0.85
C.E.	0.94	0.83	0.97	0.75	0.98
correlación de la solución 1/5 suelo/agua: cationes					
	Na+	K+	Ca++	Mg++	SUM+
pH	0.84	0.87	0.86	0.58	0.84
C.E.	1.00	0.96	0.97	0.24	1.00

Los valores corresponden a la r²

Se detectó cualitativamente la presencia de nitratos, boratos y fosfatos. Los dos últimos aniones, generalmente se encuentran en altas concentraciones en suelos sódicos con pH alto. Los fosfatos, como ya se comentó aumentan la fertilidad del suelo y los boratos son tóxicos, pero como son muy solubles se lixivian durante el lavado junto con los bicarbonatos que no hayan reaccionado con el licor y los cloruros y nitratos (tabla 10).

Tabla 10. "Análisis cualitativo en la solución 1/5 suelo/agua"

M	BO ₃ 3-	PO ₄ 3-	NO ₃ -
1a	++	+	--
1b	+++	++	--
2a	++	+	+
2b	++	+	+
3a	++	+++	++
3b	+++	++	++
4a	+++	+++	+++
4b	+++	++	+++
5a	+++	++	+++
5b	+++	+++	+++
6a	+++	+++	--
6b	++	+	--

-- No dio señal, += Baja, +++ Media y ++++ Alta

La alta concentración de iones solubles causan un aumento notable de la presión osmótica, y disminuyen la disponibilidad de agua para las plantas, pues las moléculas polares de este vital líquido quedan retenidas por fuerzas eléctricas (coulómbicas) de los cationes y aniones disueltos. El agua disponible para la planta debe estar relativamente libre, el intervalo de presión que corresponde al agua que no se pierde por gravedad, pero que

que corresponde al agua que no se pierde por gravedad, pero que puede ser utilizada por la planta, es de 0.3 - 15.0 atm, que generalmente se denominan respectivamente capacidad de campo y punto de marchitez permanente. Esta determinación se basa en la cuantificación del agua retenida por el suelo a presiones relativamente bajas pues no está enlazada fuertemente por fuerzas químicas o físicas a las especies inorgánicas u orgánicas presentes en el suelo. Las fuerzas de los enlaces del agua se denominan "químicas" cuando tienen carácter iónico, covalente o de coordinación y "físicas", cuando los enlaces son dipolares como los que presentan los materiales amorfos, arcillas e iones en solución.

El porcentaje de saturación es sumamente alto, mayor de 82.8% y menor de 176.24%. La gran capacidad de retención de agua se relaciona a la presencia de vidrios volcánicos (amorfos) y partículas finas de diámetro menor de 2 micras (tabla 11). Esta propiedad genera condiciones desfavorables para la recuperación de los suelos, ya que dificulta su lavado y además no permite el crecimiento vegetal.

Estos suelos no sustentan una cubierta vegetal natural, a excepción del punto 2, donde se observó la presencia de vegetación halófila (*Distichlis spicata*). Esta falta de fertilidad, se debe principalmente a: la alta presión osmótica que producen los iones solubles; las condiciones extremas de basicidad, generadas por los carbonatos; la toxicidad de cloruros y boratos; la insolubilidad de nutrimentos y las difíciles condiciones físicas del suelo producidas por el sodio y los amorfos. El cálculo de la presión osmótica de los suelos muestreados, con base en los valores de la conductividad eléctrica (tabla 7) indican que en las condiciones actuales, únicamente la muestra 2a que presenta el menor valor, puede sostener un desarrollo vegetal muy limitado. Además, esta muestra produjo la tonalidad más débil cuando se determinaron cualitativamente las concentraciones de boro.

Las condiciones descritas hacen difícil el uso de estos suelos para fines agrícolas. Sin embargo, en ciertas zonas se efectúan lavados de las sales y se siembran maíz *Zea mays*, cebada *Hordeum vulgare*, etc.; con bajos rendimientos que no compensan el elevado gasto de agua.

MINERALES, ELEMENTOS INTERCAMBIABLES E INSOLUBLES:

El análisis por difracción de rayos X indicó la presencia de arcillas, principalmente de haloisita y cristobalita. Además, se detectaron feldespatos, calcita, cuarzo y vidrios volcánicos amorfos (SiO_2). Se observaron señales débiles que corresponden a clorita, hemátita y óxidos de hierro (Tabla 11)

La capacidad de intercambio de cationes es alta debido a los amorfos (Sparks, 1986; Dixon y Weed 1977; Ross, 1989; Bolt, 1982).

Tabla 11. "Identificación de los minerales menores de dos micras"

minerales	0-20 20 - 40 ----- cm -----	
	Feldspatos	X
Cristobalita	X	X
Haloisita	X	X
Clorita	?	-
Calcita	X	X
Cuarzo	-	X
Hematita	?	?
Oxidos de Fe	?	?
Vidrio volcánico	X	X

Los cm se refieren a la profundidad de la muestra 3. X= Presencia
? = la señal no es clara, por lo que hay duda y = No se detectó

La cantidad de carbono orgánico es alta en estos suelos, por las bajas posibilidades de su oxidación. La materia orgánica se encuentra soluble y, en general, acumulada en la superficie (melanización). Esta dispersión se debe a que el sodio sustituye todos los protones ionizables aumentando el carácter iónico de los compuestos orgánicos y en consecuencia su solubilidad; por lo que cuando se presentan fenómenos de evaporación se acumula en la superficie (tabla 12 y fig. 14).

Tabla 12. "Propiedades químicas del suelo antes de adicionar el licor ácido"

M	Na	K	Ca	Mg	CIC	CO ₃ =	M.O.	C
	-----meq/100 g-----					%	%	%
1a	76.8	10.7	5.6	0.4	54.0	8.7	4.02	2.2
1b	97.4	11.7	11.8	0.5	55.0	23.8	2.51	1.4
2a	43.1	10.9	4.8	0.3	57.5	9.0	3.32	1.9
2b	66.5	11.4	13.8	0.5	50.5	26.5	2.36	1.3
3a	123.5	14.0	13.8	0.2	68.3	5.9	4.22	2.3
3b	121.9	13.0	11.8	0.5	84.3	13.9	2.69	1.4
4a	140.4	13.5	13.2	0.1	72.5	8.4	4.48	2.4
4b	89.2	11.8	10.2	0.4	60.6	16.3	2.16	1.1
5a	124.2	13.0	12.6	0.2	68.0	3.3	4.35	2.4
5b	141.2	13.5	15.0	0.5	65.0	9.9	2.79	1.5
6a	116.0	10.0	17.6	0.6	43.0	30.7	2.36	1.2
6b	20.3	4.9	17.0	1.0	13.0	50.5	0.70	0.4

Las concentraciones de los cationes corresponden a las formas intercambiables más las solubles. El porcentaje de carbono se corrigió por la interferencia del ion cloro en la determinación

Las muestras subsuperficiales contienen mayor cantidad de carbonatos totales en todas las muestras.

CARACTERISTICAS QUIMICAS DE LOS SUELOS

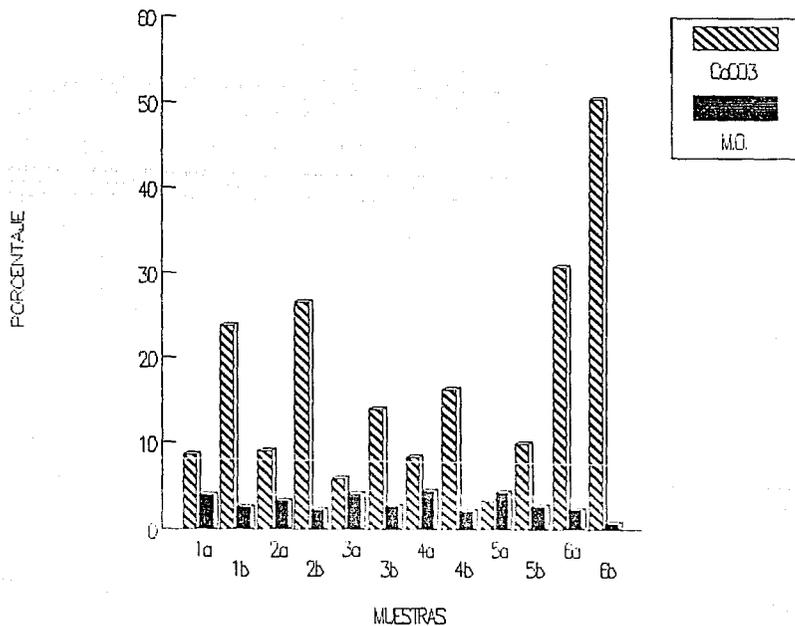


FIGURA 14 Materia orgánica y carbonatos totales por punto de muestreo y profundidad (a= 0-20 y b= 20-40 cm).

4.2.3. Características físicas del suelo

El color en seco de estos suelos es 10YR6/2 para las muestras "a" superficiales y 10YR5/2 para las "b" subsuperficiales, en la muestra 6 se invierte esta situación. El color en húmedo sigue el mismo patrón sólo que son más oscuros.

Tabla 13. "Propiedades físicas del suelo"

M	COLOR SECO	COLOR HUMEDO	D.R. D.A.		TEXTURA			CLAS
			---g/cc---		>2mm %	<50 μ %	>2 μ %	
1a	10YR6/2	10YR4/2	2.38	0.86	46.3	37.1	16.6	F
1b	10YR5/2	2.5Y5/2	2.53	0.97	63.0	20.0	17.0	FS
2a	10YR5/2	10YR3/3	2.44	0.86	46.3	34.3	19.4	F
2b	10YR5/2	2.5Y3/2	2.45	0.80	54.9	25.7	19.4	FS
3a	10YR6/2	10YR3/3	2.46	0.88	29.9	45.6	24.5	F
3b	10YR4/2	10YR3/1	2.48	0.91	44.8	28.0	27.2	FCL
4a	10YR6/2	10YR5/2	2.58	0.77	38.9	46.1	15.0	FCL
4b	10YR5/2	2.5Y3/2	2.50	0.99	47.3	26.7	26.0	FCL
5a	10YR6/2	10YR6/3	2.38	0.85	40.7	40.0	19.3	F
5b	10YR4/2	2.5Y3/2	2.49	0.85	20.8	43.7	35.5	FC
6a	10YR5/2	2.5Y4/2	2.55	1.02	54.9	27.1	18.0	FS
6b	10YR6/2	2.5Y3/2	2.67	1.29	85.5	7.5	7.0	S

D.R.= Densidad real de las partículas del suelo D.A.= Densidad aparente de las partículas del suelo.
 >2mm= arenas, <50 μ = limos, >2 μ = arcillas. F= franco, FS= franco arenoso, FCL = franco arcillo limoso, FC = franco arcilloso y S = arenoso CLAS= Clasificación textural

Tabla 14. "Retención de humedad y distribución del espacio poroso"

M	CC PS			μ	M _{PS}	M _{.05}	μ /M _{PS}	μ /M _{.05}
	0.3	0.0	.05					
-----bar-----				%	%	%		
1a	43.8	82.8	67.6	37.63	33.57	20.47	1.12	1.84
1b	72.0	116.5	82.6	69.84	43.12	10.31	1.62	6.77
2a	61.6	85.5	72.5	52.98	20.58	9.39	2.57	5.64
2b	54.1	84.5	66.8	43.28	24.32	10.19	1.78	4.25
3a	118.5	161.8	131.5	104.28	38.09	11.40	2.74	9.15
3b	132.6	195.9	146.3	120.67	57.57	12.44	2.10	9.70
4a	99.9	133.1	104.2	76.92	25.56	3.35	3.01	22.99
4b	84.7	104.1	85.6	83.85	19.19	0.88	4.37	95.17
5a	92.8	120.3	107.0	78.88	23.34	12.07	3.38	6.54
5b	131.6	176.2	139.5	111.86	37.94	6.68	2.95	16.75
6a	61.1	76.2	63.4	62.32	15.44	2.38	4.04	26.22
6b	20.1	31.8	23.2	25.93	15.09	4.04	1.72	6.42

CC= capacidad de campo, PS= porcentaje de saturación, μ = microporos, M= macroporos

Estos colores del suelo se deben al proceso de melanización. El humus imparte el color negro o pardo negro a los minerales y los agregados que se forman. La coloración final del suelo también depende de otro elemento cromógeno importante como es el carbonato de sodio. Aparte de la dispersión de la materia orgánica, la hidromorfia es un importante mecanismo de coloración.

Se observaron valores de "saturación" del color (chroma) bajos en muestras de suelos tomadas en puntos con problemas de drenaje (alta hidromorfia) y valores altos de "brillo" (value), en suelos carbonatados, lo que coincide con lo informado por Dijkerman, (1981).

La densidad real promedio de estos suelos es de 2.49 g/cm^3 , valor informado por Dijkerman, (1981) como típico de los suelos calcáreos (2.45 g/cm^3).

La presencia de vidrios volcánicos amorfos (tabla 11) dificultaron todas las determinaciones físicas, inclusive el análisis textural, ya que presentan estructuras complejas con gran cantidad de microporos que retienen agua, una alta superficie activa y al secarse pierden agua alterando de forma definitiva su constitución (tixotropía)⁽⁵⁾. En general, las pruebas de campo determinaron texturas más finas que las encontradas en el laboratorio. Además, estos suelos presentan otras características vérticas también relacionadas a la presencia de amorfos, como la presencia de grietas y una alta capacidad de intercambio de cationes.

Además de los amorfos, la gran cantidad de carbonatos de calcio también dificultaron la interpretación de los resultados obtenidos de parámetros físicos experimentales, ya que presentan tamaños de arenas, limos y arcillas, dependiendo si se originan por precipitación de la solución (químico), o provienen del intemperismo de rocas (geológico) o son producto del metabolismo o descomposición vegetal y animal (biológico) (Harvey, 1987). Para resolver el problema una gran cantidad de autores recomiendan la destrucción con HCl de los carbonatos. Sin embargo este método altera también otros componentes del suelo, incluyendo a las arcillas y en general a los minerales más pequeños, por lo que no es conveniente utilizarlo.

Especialmente, los valores de densidad aparente se vieron afectados por la presencia de amorfos y carbonatos. Este parámetro debe medirse cuando los suelos se encuentran a capacidad de campo y no en el campo ni secados al aire, pues los valores variaban constantemente de acuerdo a la pérdida del agua de los amorfos, en consecuencia, no se pudieron utilizar para calcular la porosidad total y micro, las cuales se calcularon con base en el agua retenida a 0.05 atm , punto de saturación en que el agua ocupa todos los poros libres y la capacidad de campo a 0.3 atm (punto en que el agua ocupa la totalidad de los microporos) (tabla 14). Se observó la predominancia de la

(5) Comunicación personal del Dr. Antonio Guerra de la Universidad Autónoma de Madrid.

microporosidad sobre la macroporosidad con lo que se explica la baja conductividad hidráulica observada durante los experimentos con las columnas de suelo (1.27 a 4.73 mm/h) y corresponde a la presencia de amorfos (tabla 14).

Los suelos superficiales contienen menor cantidad de arenas y de arcillas⁽⁶⁾, que los subsuperficiales, excepto en la muestra 5. Esto se debe a que en los suelos de 20 a 40 cm hay más carbonatos de calcio y magnesio que en los de 0-20 cm y estos compuestos presentan dimensiones entre 0.05 y 2 mm que corresponden a la fracción denominada arenosa. El coeficiente de correlación entre concentración de carbonatos y arenas es de 0.87.

Como la metodología para el estudio de los suelos ha sido desarrollada para suelos minerales derivados de rocas ígneas, cuando se estudian suelos orgánicos o desarrollados a partir de rocas sedimentarias, o sedimentos lacustres -como es el caso- es necesario adoptar otros criterios y metodologías. Un claro ejemplo de lo anterior lo constituyen los suelos del exlago de Texcoco, en el que se han estudiado las propiedades físicas de estos suelos por varios investigadores, los que han clasificado a estos suelos de arenosos, francos y demás y que al no realizar otras determinaciones como la conductividad hidráulica, permeabilidad, pF, mineralogía y otras, no pueden llegar a establecer relaciones entre sus parámetros analizados.

Los suelos estudiados, por su situación geográfica, su geología y su hidrología son únicos. En su estudio, se debe considerar la presencia de materiales amorfos (vidrios volcánicos), carbonatos solubles e insolubles y la gran cantidad de sodio y otros iones presentes en solución, que dificultan la aplicación de técnicas tradicionales y la interpretación de los resultados. Esto explica los resultados contradictorios de los estudios efectuados en esta zona.

Se recomienda que en estudios futuros de esta zona se realicen estudios mineralógicos y análisis físicos y químicos de cada fracción.

4.2.4. Experimento con columnas

Una vez que se aplicó el mejorador (licor ácido) y se lavaron las muestras de suelo se encontraron los siguientes resultados:

El análisis de varianza con un 95% de nivel de confianza para pH, indica que hay diferencias significativas entre puntos de muestreo, entre tratamiento al suelo (excepto columnas 2 y 6) y por profundidades. Las muestras superficiales tienen valores de pH menores a las subsuperficiales independientemente del efecto de la estructura, en las muestras sin estructura (suelo suelto) las diferencias en profundidad son menores. El caso contrario se

(6) El término arcilla en este caso indica únicamente partículas menores a 2 micras.

encuentra con las columnas de suelo no alterado (suelo compacto) en las que la muestra subsuperficial es mucho mayor a la superficial en todas las muestras aunque las diferencias significativas se localizan solamente en los puntos 1, 3, 4 y 5. Esto se debe a que las muestras superficiales entran primero en contacto con el ácido residual (ver apéndice I y fig. 15 y 16)

La CE tiene diferencias significativas entre puntos de muestreo y no existen diferencias entre tratamiento al suelo y solamente en el punto 6 se encuentran diferencias significativas en cuanto a la profundidad.

Los valores de CE son menores en los suelos alterados (suelos sueltos), excepto en el punto 3. En las figuras 4.17 y 4.21 se observa como tendencia general a disminuir la CE en los suelos alterados y con la profundidad. En los puntos 1, 3 y 5 con suelos no alterados (suelos compactos) la CE aumenta con la profundidad y sucede lo contrario en los puntos 2, 4 y 6 (ver apéndice I y fig. 17 y 18).

El calcio intercambiable muestra diferencias significativas entre puntos de muestreo, entre tratamiento al suelo y en profundidad (puntos 2, 4 y 6). En todos los puntos es mayor la concentración de calcio en la superficie y ligeramente mayor en los suelos alterados (suelos sueltos). En la muestra 5 no se observa un patrón definido y, en la muestra 6, no se observan cambios debidos al tratamiento al suelo y un gran incremento en la superficie. En el punto 2 se encuentra la mayor desviación tipo y en el punto 6 la menor (ver apéndice I y fig. 19 y 20).

El magnesio intercambiable se encuentra en bajas cantidades en los suelos tratados con los licores ácidos. Existen diferencias significativas entre puntos de muestreo y solamente en el punto 6 se encuentran diferencias significativas en cuanto a profundidad y no en cuanto a tratamiento al suelo. En las muestras 1, 3 y 6 se tienen mayores concentraciones en la superficie, no importando el tratamiento al suelo (tabla 15).

El sodio presenta diferencias significativas en cuanto a puntos de muestreo, entre tratamiento al suelo en los puntos 4 y 5 y con referencia a la profundidad no existen diferencias significativas en el punto 5 de las columnas de suelo alterado (suelto). En las gráficas 4.17 y 4.23 se observa como tendencia general que los suelos no alterados (compactos), que tienen mayores concentraciones de sodio y que este elemento disminuye con la profundidad. Estas tendencias no se expresan como diferencias significativas, debido a la gran desviación tipo de las muestras (ver apéndice I y fig. 21 y 22).

Existen diferencias significativas entre puntos de muestreo para el potasio, entre tratamiento al suelo en los puntos 4 y 5 y entre profundidad en los puntos 4 y 5. Este elemento alcanza valores altos en las muestras "Cb". El potasio disminuyó con la recuperación posiblemente debido al lavado y se encuentran mayores concentraciones en las muestras subsuperficiales (ver apéndice I y fig. 23 y 24).

pH EN LOS SUELOS

RECUPERADOS

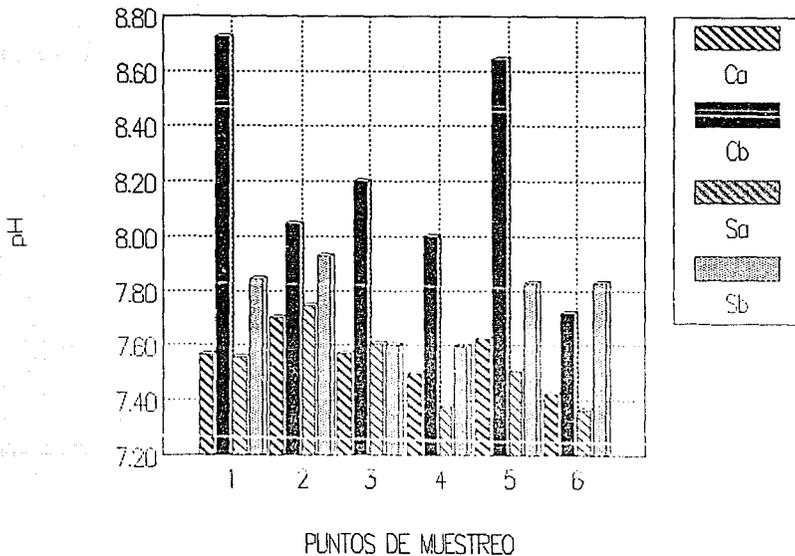


FIGURA 15 Valores medios de pH de los suelos recuperados por punto de muestreo, por tratamiento al suelo (C= compactos y S= sueltos) y por profundidad (a= 0-20 y b= 20-40 cm).

EFFECTO DE LA ESTRUCTURA EN LA RECUPERACION

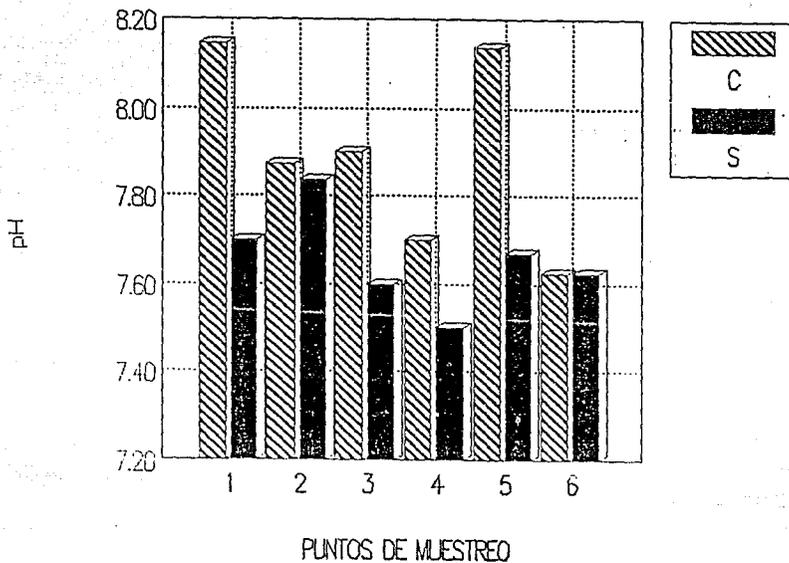


FIGURA 16 pH de los suelos recuperados con el licor ácido por tratamiento al suelo (C= compactos y S= suelos).

CONDUCTIVIDAD ELECTRICA EN LOS SUELOS RECUPERADOS

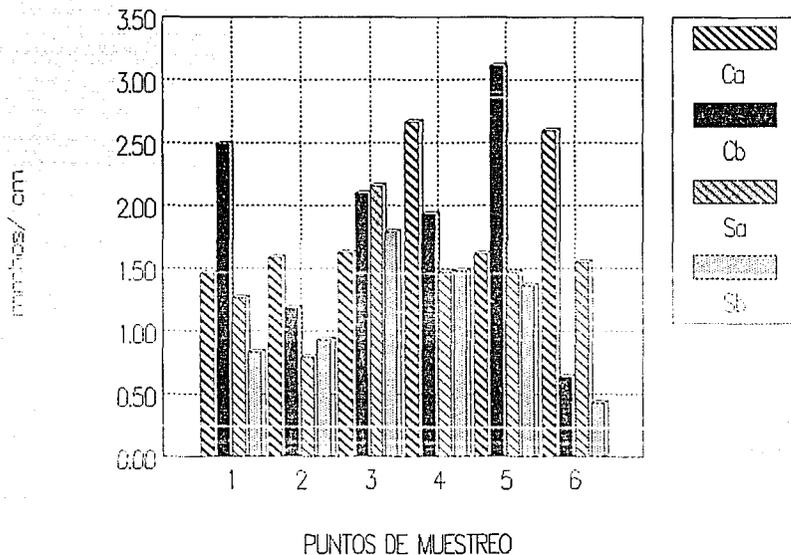


FIGURA 17 Valores medios de la conductividad eléctrica de los suelos recuperados por punto de muestreo, por tratamiento al suelo (C= compactos y S= sueltos) y por profundidad (a= 0-20 y b= 20-40 cm).

EFFECTO DE LA ESTRUCTURA EN LA RECUPERACION

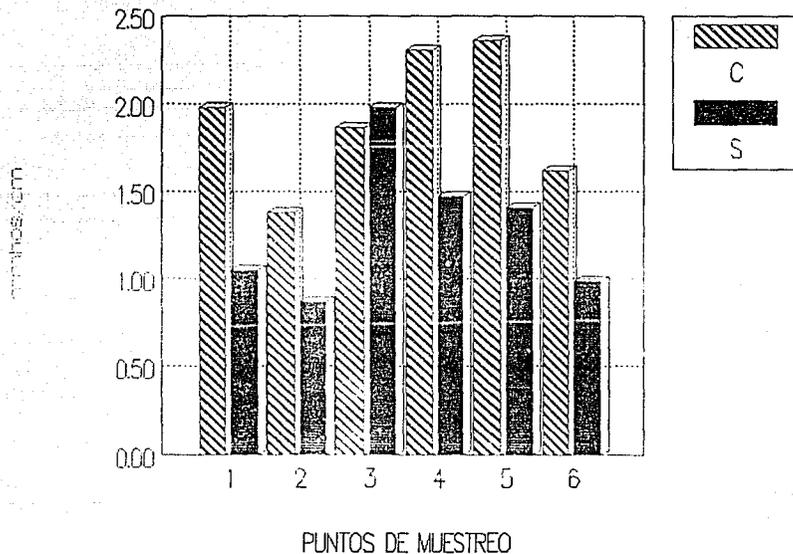


FIGURA 18 Conductividad eléctrica de los suelos recuperados con el licor ácido por tratamiento al suelo (C= compactos y S= sueltos).

CALCIO EN LOS SUELOS

RECUPERADOS

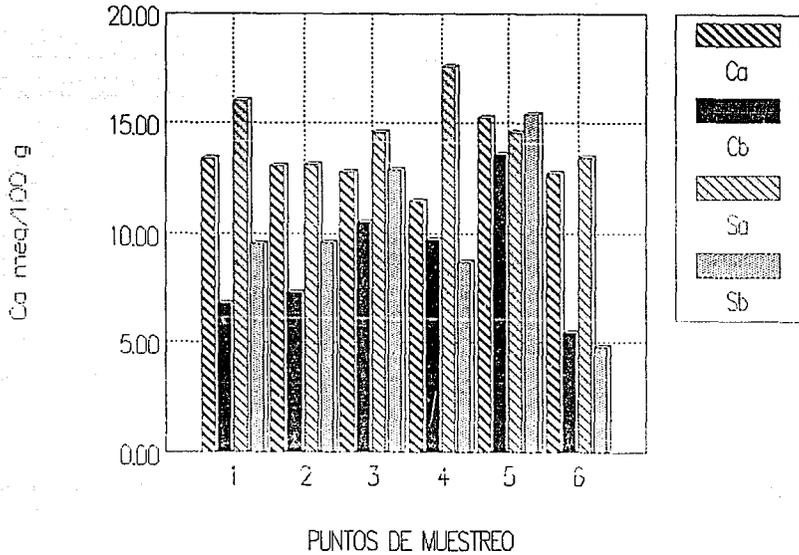


FIGURA 19 Valores medios de calcio intercambiable de los suelos recuperados por punto de muestreo, por tratamiento al suelo (C= compactos y S= sueltos) y por profundidad (a= 0-20 y b= 20-40 cm).

EFFECTO DE LA ESTRUCTURA EN LA RECUPERACION

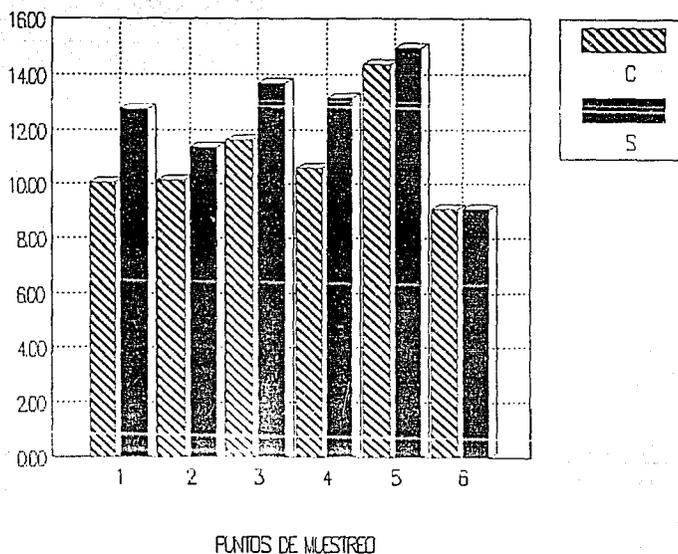


FIGURA 20 Calcio de los suelos recuperados con el licor ácido por tratamiento al suelo (C= compactos y S= suelos).

SODIO EN LOS SUELOS

RECUPERADOS

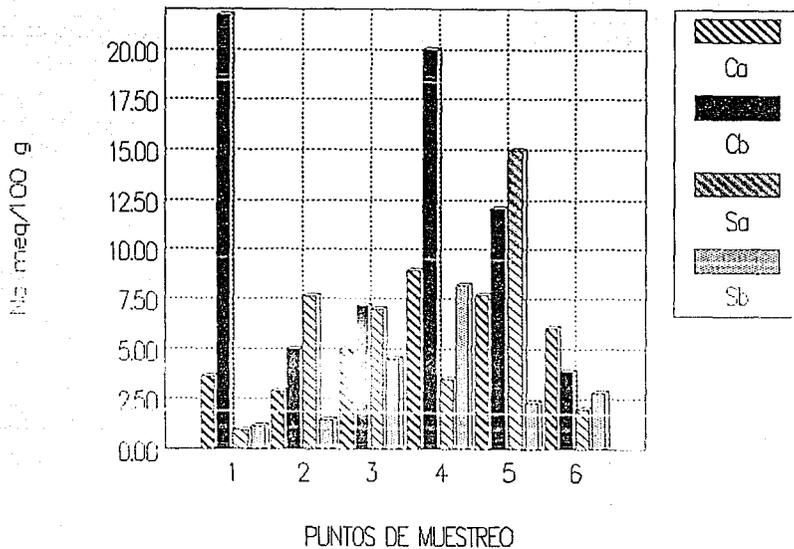


FIGURA 21 Valores medios de sodio intercambiable de los suelos recuperados por punto de muestreo, por tratamiento al suelo (C= compactos y S= sueltos) y por profundidad (a= 0-20 y b= 20-40 cm).

EFECTO DE LA ESTRUCTURA EN LA RECUPERACION

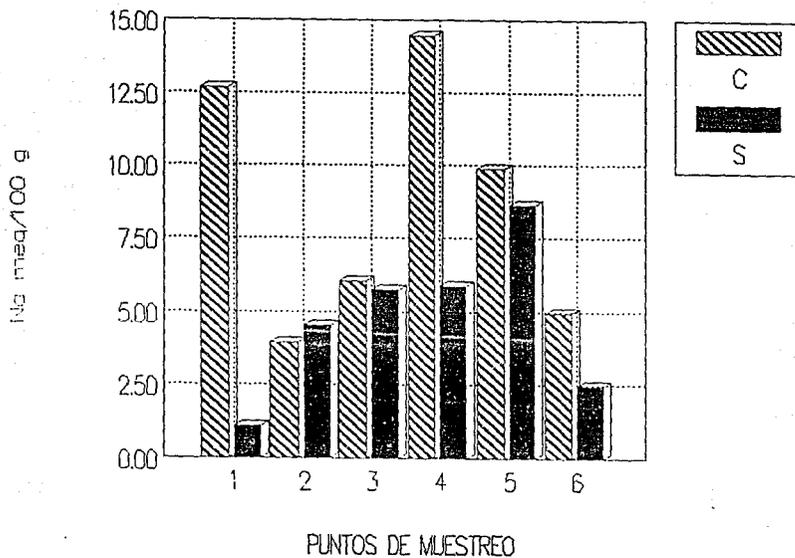


FIGURA 22 Sodio de los suelos recuperados con el licor ácido por tratamiento al suelo (C= compactos y S= sueltos).

POTASIO EN LOS SUELOS

RECUPERADOS

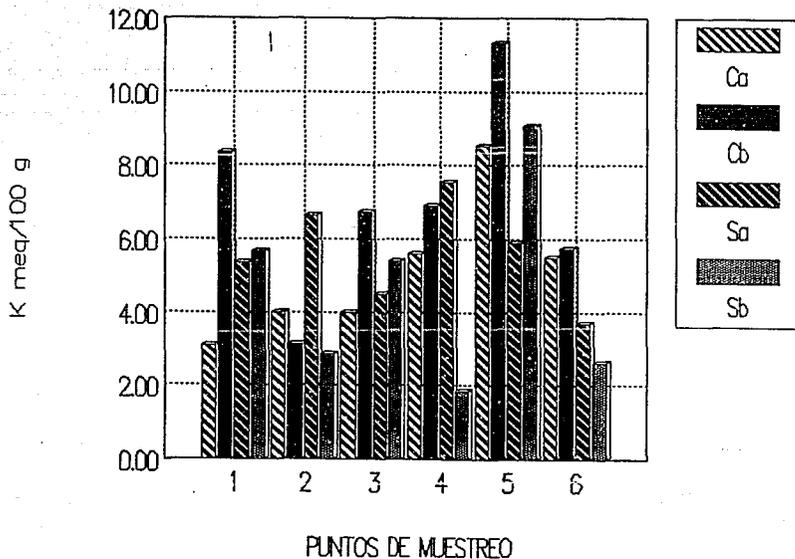


FIGURA 23 Valores medios de potasio intercambiable de los suelos recuperados por punto de muestreo, por tratamiento al suelo (C= compactos y S= sueltos) y por profundidad (a= 0-20 y b= 20-40 cm).

EFFECTO DE LA ESTRUCTURA EN LA RECUPERACION

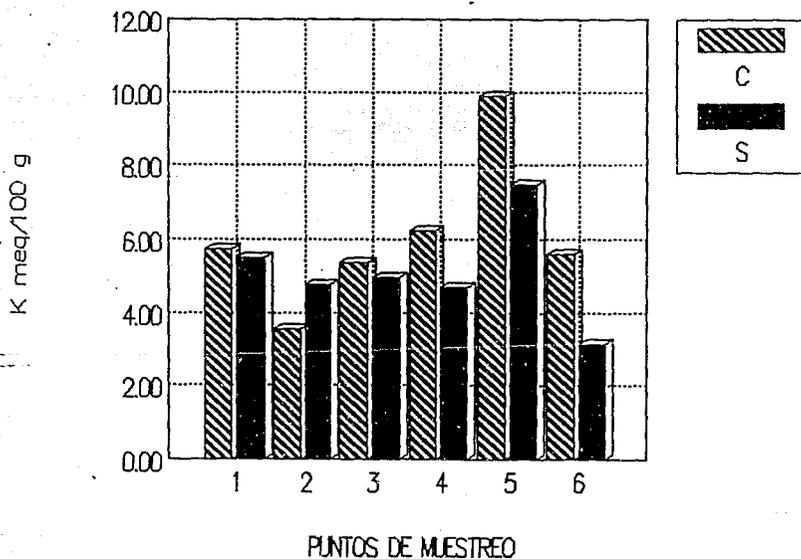


FIGURA 24 Potasio de los suelos recuperados con el licor ácido por tratamiento al suelo (C= compactos y S= sueltos).

Tabla 15. "Valores de los suelos recuperados"

col.	pH (1:5)	C.E. (1:5)	Ca++ -----cationes intercambiables----- -----meq/100g-----	Mg++	Na+	K+
1Ca	7.54	1.58	13.2	1.3	4.1	3.0
1Ca	7.59	1.34	13.4	1.3	3.1	3.2
1Cb	8.50	1.95	8.4	1.6	15.3	9.0
1Cb	8.95	3.04	5.3	1.2	28.1	7.7
1Sa	7.50	1.68	18.9	1.7	1.5	5.8
1Sa	7.61	0.85	13.0	1.3	0.5	4.9
1Sb	7.93	0.89	10.8	1.2	0.8	5.4
1Sb	7.76	0.78	8.3	1.1	1.5	5.9
2Ca	7.72	1.58	13.5	1.4	3.8	5.0
2Ca	7.68	1.58	12.5	1.0	2.0	3.0
2Cb	8.03	1.29	7.1	1.2	6.8	3.0
2Cb	8.06	1.07	7.5	1.2	3.1	2.1
2Sa	7.87	2.37	12.1	2.3	14.2	9.7
2Sa	7.62	1.59	14.0	1.1	1.0	3.6
2Sb	7.95	0.95	10.1	1.2	1.6	3.0
2Sb	7.91	0.91	9.1	1.0	1.3	2.7
3Ca	7.50	1.71	12.9	1.6	5.5	4.0
3Ca	7.71	1.54	12.5	1.1	4.4	4.0
3Cb	8.26	2.68	9.7	1.3	4.3	6.8
3Cb	8.17	1.53	11.4	1.3	10.0	6.7
3Sa	7.59	2.21	15.5	1.6	7.3	4.5
3Sa	7.55	2.12	13.6	1.7	6.6	4.5
3Sb	7.58	1.32	12.4	1.1	1.3	4.2
3Sb	7.59	2.25	13.3	1.5	7.7	6.6

Col. = Columna. C = suelo compacto (no alterado), S = suelo suelto (alterado), a = profundidad de la columna 0-20 cm, b = profundidad de la columna 20-40 cm, C.E. = conductividad eléctrica en mhos/cm a 25°C

Tabla 15. Continuación

col.	pH (1:5)	C.E. (1:5)	Ca ⁺⁺ Mg ⁺⁺ Na ⁺ K ⁺ -----cationes intercambiables----- ----- meq/100g-----			
			4Ca	7.56	1.90	11.4
4Ca	7.45	3.44	11.5	1.4	8.4	5.8
4Cb	7.83	1.90	9.6	1.6	21.4	6.7
4Cb	8.08	1.98	9.9	1.7	18.6	7.1
4Sa	7.32	1.60	17.2	2.0	3.9	7.0
4Sa	7.44	1.34	18.0	1.5	3.1	8.1
4Sb	7.51	1.56	10.0	1.7	9.7	1.8
4Sb	7.68	1.40	7.4	2.1	6.7	1.9
5Ca	7.54	1.48	16.1	1.7	5.7	8.1
5Ca	7.71	1.75	14.2	2.1	8.1	8.9
5Cb	8.98	4.20	7.9	1.7	28.7	11.9
5Cb	8.31	2.02	19.2	2.0	16.0	10.7
5Sa	7.36	1.53	15.0	1.6	1.2	5.4
5Sa	7.66	1.40	14.0	1.5	1.6	6.4
5Sb	7.81	1.45	13.3	1.8	3.5	8.1
5Sb	7.85	1.26	17.4	2.0	3.1	10.0
6Ca	7.34	2.50	13.7	1.1	3.1	4.4
6Ca	7.39	2.70	11.7	1.3	8.9	6.6
6Cb	7.87	0.72	5.5	0.7	4.9	3.5
6Cb	7.56	0.55	5.4	0.6	2.8	8.0
6Sa	7.53	1.30	13.3	1.1	1.2	4.0
6Sa	7.32	1.78	13.5	1.0	2.9	3.4
6Sb	7.85	0.42	4.7	0.6	2.9	2.5
6Sb	7.80	0.44	4.8	0.6	2.8	2.7

Col. = Columna. C = suelo compacto (no alterado) S = suelo suelto (alterado), a = profundidad de la columna 0-20 cm, b = profundidad de la columna 20-40 cm, C.E. = conductividad eléctrica en mhos/cm a 25°C

En los suelos sueltos (S), alterados o con labranza simulada la recuperación se llevar a cabo con mayor eficiencia que en los suelos compactos o no alterados, como se observa en las figuras 25, 26 y 27. El porcentaje de carbonatos totales disminuye más en las muestras de suelo alterado (suelto), lo cual es de esperarse ya que en estas muestras el licor ácido entra en mayor contacto con el suelo y el efecto del ácido es más eficiente (tabla 16).

La capacidad de intercambio de cationes baja en todos los suelos tratados. Esto se explica por la disminución del pH y por las cargas dependientes del mismo, la excepción se localiza en la muestra 6 en la que la capacidad de intercambio de cationes aumenta. La explicación se encuentra en la textura de estos suelos ya que las partículas del tamaño de las arenas se dividen con la aplicación del mejorador con lo que aumentan los porcentajes de partículas menores y esto hace que también aumente ligeramente la capacidad de intercambio de cationes (tabla 16).

Tabla 16. "Comparación de los suelos antes y después de aplicar el mejorador"

col.	pH		CE (mmhos/cm)		Na ⁺ i (meq/100g)		K ⁺ i (meq/100g)		Ca ⁺⁺ i (meq/100g)	
	20cm	40cm	20cm	40cm	20cm	40cm	20cm	40cm	20cm	40cm
1A	9.96	10.10	5.6	11.4	76.8	97.4	10.7	11.7	5.6	11.8
1C	7.50	8.95	1.6	3.0	4.2	10.0	3.1	7.7	13.2	5.3
1S	7.50	7.56	1.7	0.8	1.5	1.5	5.8	10.0	18.9	8.3
3A	10.10	10.00	14.0	17.0	122.1	122.2	14.1	13.0	13.8	11.8
3C	7.50	7.87	1.7	2.4	5.5	10.0	4.0	9.7	12.9	11.4
3S	7.59	7.59	2.2	2.3	7.3	7.7	4.5	6.6	15.5	13.3
5A	9.90	9.80	13.2	17.6	124.1	141.2	13.0	13.5	12.0	15.0
5C	7.54	8.31	1.5	2.0	5.7	16.0	8.1	10.7	16.1	19.2
5S	7.36	7.85	1.5	1.3	1.2	3.1	5.4	10.0	15.0	17.4
6A	10.40	10.00	18.6	5.6	116.0	21.6	10.0	4.9	17.6	17.0
6C	7.39	7.87	2.7	0.7	8.9	4.9	6.6	3.5	11.7	5.5
6S	7.32	7.85	1.8	0.4	2.9	2.9	3.4	2.5	13.5	4.7

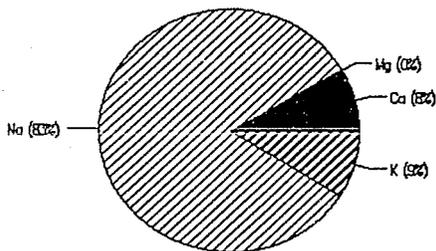
A= Suelo antes de adicionar licor ácido. C= Suelo compacto (no alterado) después del tratamiento. S= Suelo suelto (alterado) después del tratamiento, -- = análisis no realizado

Tabla 16. Continuación

columna	Mg meq/100g		CaCO ₃ (%)		CIC (meq/100g)		PSI	
	20cm	40cm	20cm	40cm	20cm	40cm	20 cm	40 cm
1A	0.4	0.5	8.7	23.8	54.0	55.0	---	---
1C	1.3	1.2	5.5	20.4	---	---	---	---
1S	1.7	1.1	3.0	16.8	---	---	---	---
3A	0.2	0.8	5.9	13.9	68.3	84.3	---	---
3C	1.6	1.3	4.3	8.0	58.7	61.1	9.4	16.4
3S	1.6	1.5	4.2	8.4	58.4	56.6	12.5	13.6
5A	0.2	0.5	3.3	9.9	68.0	65.0	---	---
5C	1.7	2.0	5.0	8.0	56.7	61.5	10.1	26.0
5S	1.6	2.0	3.0	5.0	57.7	59.0	2.1	5.2
6A	0.6	1.0	30.7	50.5	43.0	13.0	---	---
6C	1.3	0.7	17.0	42.0	47.2	14.0	18.9	35.0
6S	1.0	0.6	18.0	42.0	48.7	16.1	6.0	18.0

A= Suelo antes de adicionar licor ácido, C= Suelo compacto (no alterado) después del tratamiento, S= Suelo suelto (alterado) después del tratamiento, y -- = análisis no realizado

CATIONES EN LOS SUELOS ORIGINALES
MUESTRA 5a



CATIONES EN LOS SUELOS ORIGINALES
MUESTRA 5b

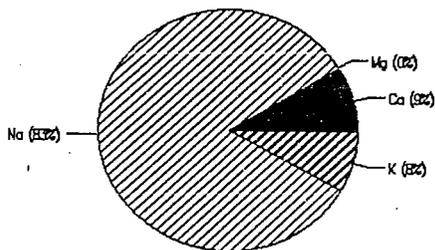
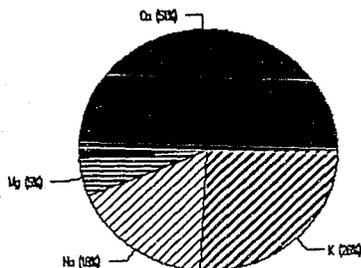


FIGURA 25 Porcentajes de cationes totales en los suelos sin tratar con los licores ácidos.

CACIONES EN SUELOS RECUPERADOS
MUESTRA 5Ca



CACIONES EN SUELOS RECUPERADOS
MUESTRA 5Cb

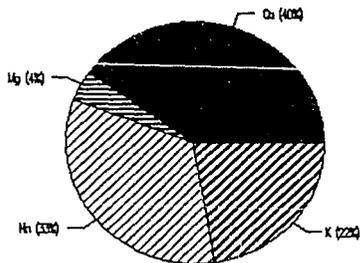
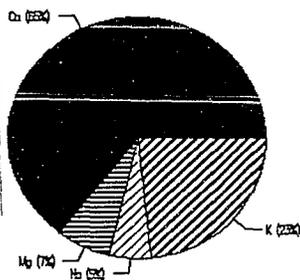


FIGURA 26 Porcentajes de cationes totales en los suelos "compactos" tratados con los licores ácidos.

CATIONES EN SUELOS RECUPERADOS
MUESTRA 5Sa



CATIONES EN SUELOS RECUPERADOS
MUESTRA 5Sb

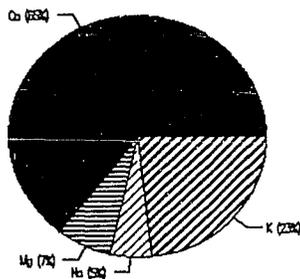


FIGURA 27 Porcentajes de cationes totales en los suelos "suelos" tratados con los licores ácidos.

Tabla 17. "Concentraciones de plomo y zinc de suelos sin tratar"

muestra	zinc (ppm)		plomo (ppm)	
1a	7.3]	1.3	12.2]	1.1
1b	23.2]	1.6	16.1]	1.1
2a	6.8]	1.5	7.0]	1.1
2b	8.9]	1.3	17.0]	1.1
3a	11.4]	1.3	10.4]	1.1
3b	7.0]	1.3	13.9]	1.1
4a	12.9]	1.3	10.4]	1.1
4b	16.8]	1.4	13.9]	1.1
5a	-----		10.0]	1.1
5b	-----		11.8]	1.1
6a	10.1]	1.3	19.1]	1.1
6b	7.4]	1.3	16.5]	1.1

] = intervalo de confianza (+ ó -)

----- = muestra no analizada

Tabla 18. "Concentraciones extraíbles de zinc, en HNO_3 (ppm) antes y después del tratamiento"

col.	profund. en cm		col.	profund. en cm	
	0-20	20-40		0-2	20-40
1A	7.3	23.2	3A	11.4	7.0
1S	15.5	33.8	3S	10.0	20.8
1C	19.3	10.3	3C	10.6	11.0
5A	----	----	6A	10.1	7.4
5S	8.2	4.0	6S	13.4	6.1
5C	15.1	26.2	6C	10.9	4.5

A = antes del tratamiento, S = suelo suelto (alterado), C = suelo compacto (no alterado)

Tabla 19. "Concentraciones de plomo (ppm)"

M	0-20 20-40		M	0-20 20-40	
	-----cm-----				
1A	12.2	16.1	3A	0.4	7.0
1S	vest	5.3	3S	6.6	7.7
1C	vest	3.1	3C	5.5	6.7
5A	10.5	10.5	6A	18.9	16.7
5S	6.3	5.3	6S	12.6	17.8
5C	6.3	6.7	6C	17.8	15.2

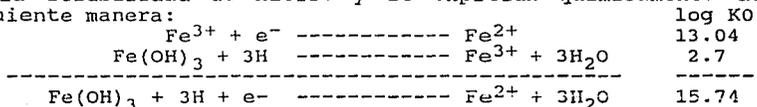
A = antes del tratamiento, S = suelo suelto (alterado), C = suelo compacto (no alterado), 0-20 y 20-40 = profundidad en cm

El PSI es un índice muy utilizado cuando se trata de recuperación de suelos sódicos, en este caso, se debe de considerar que no cambio solamente el sodio intercambiable, también lo hizo la capacidad de intercambio de cationes debido a la gran cantidad de cargas dependientes del pH que los amorfos tienen.

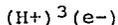
Las cantidades de plomo y zinc encontradas en los suelos antes de la aplicación del licor son normales y bajas respectivamente, comparadas con los intervalos informados en la literatura (tabla 20). Después de la aplicación del mejorador y la lámina de lavado las concentraciones de plomo disminuyen y las de zinc aumentan ligeramente en general (tablas 17, 18 y 19). Las cantidades de metales adicionadas al suelo son bajas en Mn y Fe y muy bajas para Pb y Zn respectivamente.

Al ponerse en contacto el licor ácido con el suelo los iones de hierro pasan inmediatamente a sus formas oxidadas que son especialmente insolubles en el intervalo de pH de 7.4 a 8.5, en el que a menudo se presentan deficiencias en las plantas por el ion Fe. Como los suelos recuperados con el licor ácido se encuentran dentro del intervalo de insolubilidad del hierro y como el transporte de nutrimentos del suelo a la planta se realiza por difusión y flujo de masas que son dependientes de la solubilidad, se deduce que no hay riesgo de toxicidad por este elemento (Garrels y Christ 1990; Lindsay, 1979 ; Sposito, 1989).

Las condiciones de oxido-reducción juegan un papel importante en la solubilidad de hierro y se expresan químicamente de la siguiente manera:



$$\text{-----} = 10^{15.74}$$



$$\log \text{Fe}^{2+} = 15.74 - (\text{pe} + \text{pH}) - 2\text{pH}$$

$$\log \text{Fe}^{2+} = 15.74 - \text{pe} - 3\text{pH}$$

En la ecuación anterior se expresa la solubilidad del Fe^{2+} , en la que el pe y el pH participan, se excluye el Fe adsorbido en las arcillas, el ligado a la materia orgánica y el efecto de otros iones como los carbonatos.

Teniendo en cuenta el pH más bajo de los suelos recuperados

$$\log \text{Fe}^{2+} = 15.74 - 3(7.32) - \text{pe}$$

$$\log \text{Fe}^{2+} = 15.74 - 21.96 - \text{pe}$$

En condiciones extremadamente reductoras en suelos

$$\log \text{Fe}^{2+} = 15.74 - 21.96 - (-5)$$

$$\log \text{Fe}^{2+} = -1.22$$

$$\text{Fe}^{2+} = 10^{-1.22}$$

$$\text{Fe}^{2+} = 0.0602 \text{ g/L}$$

En este modelo no se toman en cuenta las sales solubles del hierro ya que estos suelos fueron lavados, por lo que se toman en cuenta solamente los hidróxidos. Debido al pH del suelo, la especie de hierro que domina es $\text{Fe}(\text{OH})^+$ (Lindsay, 1979).

Por lo anteriormente expuesto, el Fe no causa en los suelos problemas de toxicidad, al contrario, debido a que a menudo en suelos calcáreos como los de Texcoco se presentan deficiencias por este elemento, la adición de los licores ácidos aumenta la cantidad de hierro en solución en bajas concentraciones, pero suficientes para la nutrición vegetal.

La solubilidad del manganeso en los suelos es altamente dependiente del Eh y del pH. Lindsay, (1979) realiza predicciones de la solubilidad del Mn como función de pe + pH pero según Kabata y Pendias (1989), las predicciones realizadas solamente con base en reacciones de equilibrio químico están alejadas de la realidad.

La mezcla de compuestos metaestables de óxidos, hidróxidos y sesquióxidos de Mn, complejos orgánicos, la actividad microbiana, vegetal y las variaciones en las condiciones de oxidoreducción y pH son los principales factores que se deben tomar en cuenta para la predicción de los niveles de Mn en la solución del suelo.

Tabla 20. "Comparación de las concentraciones de metales pesados contenidos en el licor, en el suelo y los valores informados en la bibliografía"

	Fe	Mn (ppm)	Pb ppm
concentración en el licor	5.5 (%)	330	2.7
concentración adicionada al suelo por columna	36.7 g	220 mg	1.8 mg
intervalo de concen. considerada normal ¹	0.7-55 (%)	20 - 3 000	2-200 (10)
intervalo de concentración considerado tóxico ²		(1.5-3) X 10 ³	100-400

(1) Lindsay, 1979; Sposito, 1989.

(2) Kabatas y Pendias, 1984

Si se toman en cuenta las predicciones realizadas por Lindsay, (1979) para Mn, en los suelos de Texcoco recuperados con los licores ácidos, se tiene que para las condiciones altamente reductoras de estos suelos puede solubilizarse el Mn en altas concentraciones y existir peligro de toxicidad para las plantas por este elemento, pero tomando en cuenta las pequeñas concentraciones adicionadas de este metal mediante la

recuperación y conociendo que la absorción de Mn por las plantas es controlada metabólicamente, se espera que las concentraciones de este elemento no sólo no sean tóxicas, sino favorables para el crecimiento y desarrollo vegetal (tabla 20).

Tabla 20. Continuación

	Zn	Cr	Cd
concentración en el licor (ppm)	100	25	vest
concentración adicionada al suelo con el licor mg/ccl	66.7	16.7	vest
intervalo de concentración (ppm) considerado normal ¹	10-300 (50)	- de 75	.01-.7
intervalo de concentración (ppm) considerado tóxico ²	70-400	75-100	3-8

(1) Lindsay, 1979; Sposito, 1989.

(2) Kabatas y Pendias, 1984.

Con estos experimentos pueden derivarse las conclusiones que se presentan en el siguiente capítulo.

5 CONCLUSIONES

El análisis de las propiedades químicas y físicas de los suelos del exlago de Texcoco, debe realizarse con cuidado ya que debido a sus componentes -gran cantidad de carbonatos de calcio, vidrio volcánico, sales y sodio- puede caerse en errores al escoger las técnicas a aplicar o al interpretar los resultados. La combinación de los componentes del suelo antes mencionados, dan como resultado propiedades muy particulares (suelos cálcicos, salinos, sódicos, con cenizas volcánicas y en algunos casos contaminados por aguas negras), por lo que se recomienda escoger cuidadosamente las técnicas a seguir, especialmente las siguientes: las densidades aparente y real, porosidad -macro y micro-, retención de humedad, el flujo de la fase líquida y la capacidad de intercambio de cationes.

En la zona se encuentran grandes diferencias espaciales, es decir, las propiedades del suelo varían enormemente entre pequeñas distancias. Esto tiene su explicación en el origen lacustre, aluvial y en la microtopografía de la zona.

Las restricciones encontradas a través del análisis edáfico para el establecimiento de una cobertura vegetal son las siguientes:

- a) Alta presión osmótica
- b) Toxicidad debido a las sales solubles
- c) Toxicidad por boro
- d) Baja aeración
- e) Deficiencias nutrimentales de algunos elementos

El suelo presenta condiciones químicas favorables para la utilización del mejorador (carbonatos de calcio precipitados en altas concentraciones y altos valores de capacidad de intercambio de cationes).

Al utilizar el mejorador se promueve en primer término la destrucción de los carbonatos y bicarbonatos solubles y precipitados y la formación de los sulfatos correspondientes. En segundo término, la destrucción de los amorfos y al mismo tiempo de la haloisita, que traería como consecuencia una considerable disminución en la capacidad de intercambio de cationes por lo cual es necesario adicionar el licor ácido de manera controlada.

Como la solubilidad de las sales de calcio aumentan debido a la mayor solubilidad de los sulfatos (2.09-1.62 g/L CaSO_4 anhidro, 2.41-2.22 g/L CaSO_4 bihidratado), en comparación con su respectivo carbonato (0.019 g/L aragonita), (Weast, 1987) se realiza el desplazamiento del ion sodio del complejo de cambio. Esto ocasiona la floculación de los coloides edáficos con lo que se promueve la agregación, lo que a su vez ocasiona la formación de porosidad estructural y por consiguiente el aumento de la macroporosidad y el aumento en la permeabilidad del suelo. Esto facilita el desalojo de las sales del suelo y, en general,

elimina algunas de las restricciones para la implantación de una cobertura vegetal.

El riesgo que se corre al aplicar el licor ácido sin una previa labranza es que la recuperación no sea homogénea y a que por lo tanto, el efecto de la aplicación del ácido residual no sea el esperado, debido a que el flujo del mejorador puede darse a través de las grietas verticales o de horizontes arenosos seguidos de un estrato limo-arcillosos o que debido a la microtopografía el ácido fluya siguiendo un caudal horizontal. Si la recuperación no fuera homogénea, es decir, que existieran zonas salinas, sódicas, neutras y ácidas en una misma parcela, las condiciones para implantar una cobertura vegetal seguirían existiendo y se adicionaría a los problemas ya existentes, el de una posible toxicidad por metales a las plantas y a una mayor disminución en la capacidad de intercambio de cationes.

Al implantar un plan de recuperación se debe tener en cuenta tal situación porque puede darse el caso de que la dosis escogida no alcance para disolver los carbonatos de calcio necesarios para desplazar al sodio y no alcanzarse la recuperación del suelo ó en el peor de los casos, adicionar metales en exceso, acidificar el suelo, destruir las arcillas, bajar la capacidad de intercambio de cationes, promover la inmovilización de elementos esenciales como los fosfatos, la toxicidad por aluminio y hierro, que a pH ácidos se solubilizan y demás.

La cantidad de licor ácido que los suelos pueden soportar está estrechamente relacionada con la cantidad de carbonatos de calcio, por lo que las muestras que soportan mayores concentraciones de licor ácido son: 6b> 6a> 2b> 1b> 4b> 3b> 5b> 2a> 1a> 4a> 3a> 5a.

A nivel de recomendación, cabe mencionar que la cantidad de licor ácido que el suelo puede soportar sin peligro, está ligada a los carbonatos existentes, por lo que antes de realizar alguna aplicación, debe de cuantificarse la cantidad de carbonatos existentes en el suelo y con base en ello calcular la dosis a aplicar. Otra manera de calcular la cantidad de licor ácido que el suelo puede soportar es la de realizar una curva de neutralización del suelo con el licor ácido. Esta última recomendación aunque es muy burda es también muy práctica y fácil de realizar: se neutralizaría el suelo y se lavaría con agua para medir sodio y calcio intercambiable (fig. 28).

Debe de tenerse en cuenta la forma y el lugar de aplicación, sobre todo si existen grietas o se aplica sobre el cono de succión ya que se correría el riesgo de que el mejorador se perdiera por las grietas o que por la succión del cono tampoco se lograra la recuperación por lo que se recomienda que además del drenaje, se aplique el mejorador después de un riego o en la época de lluvias con el fin de ahorrar agua en el lavado, para acelerar la infiltración y para que el mejorador entre en contacto con la mayor cantidad de suelo posible.

El plomo no sólo no se retuvo en las columnas de suelo sino que el que ya existía fue lixiviado y el zinc que sí se acumuló no alcanza niveles peligrosos y como este elemento es esencial para el crecimiento vegetal llega a ser positiva su acumulación.

La dosis de licor ácido (666.7 mL por columna aforados a 5 litros) y de la lámina de lavado (461.95 mm) utilizadas pueden considerarse bajas si se tiene en cuenta la cantidad de carbonato de calcio presente en el suelo y la precipitación media anual respectivamente. La dosis de mejorador en este caso y para la recuperación del suelo es alta en comparación con la dosis calculada.

El efecto de la labranza en la recuperación de los suelos se manifiesta claramente, en los suelos compactos (no alterados). La recuperación es menor, principalmente en las muestras con profundidad de 20-40 cm. En las muestras de suelo suelto (alterado), la recuperación es más homogénea y se observan diferencias menores en cuanto a la profundidad de las muestras, el calcio aumenta y el sodio disminuye en comparación con las muestras con suelo no alterado (compacto). Esto se debe a que el mejorador entra en contacto con una mayor cantidad de suelo que en las muestras con suelo compacto (no alterada).

La formación de un cono de hundimiento y de succión y de grietas en el acuitardo primario, permiten el desalojo de las sales y demás lixiviados (productos de la aplicación del ácido residual) de la superficie del acuitardo y la recuperación de los suelos tiene un efecto doble. Por un lado se cuenta con un lugar donde se pueden almacenar las sales sin causar ningún daño y sin costo alguno y por otro se abastece al acuífero primario con lo que se impide el alargamiento del cono y de las grietas.

El uso del ácido residual de AHMSA División Sur en la recuperación de los suelos del exlago de Texcoco del Edo. de México, es una alternativa que además de económica -para la industria y para la SARH- ayudaría a resolver el problema de la implantación de una cobertura vegetal para disminuir la cantidad de polvos que, vía tolvaneras, llegan a la Ciudad de México.

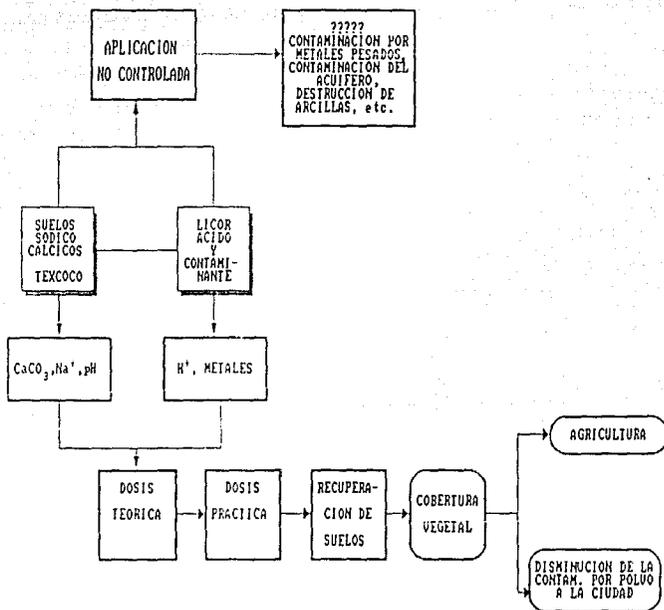


FIGURA 28 Modelo de manejo de los licores ácidos en la recuperación de los suelos salinosódicos de Texcoco.

Albasel, N. y A. Cottenie. (1985). Heavy metals uptake from contaminated soils as affected by peat, lime, and chelates. Soil. Sci. Soc. Am. J., 49:386-390.

APHA, AWWA, WPCF (1985). Standard methods for the examination of water and waste water. 16^a. edition. Washington. pp 95, 467.

Agres, G. (1970). Análisis químico cuantitativo. Harla, México. 703.

Aulio, K. (1980). Accumulation of copper in fluvial sediments and yellow water lilies (*Nuphar lutea*) at varying distances from a metal processing plant. Bull. Environm. Contam. Toxicol., 25:713-717.

Archer, F. and I.H.Hodgson. (1987). Total and extractable trace element contents of soils in England and Wales. J. Soil Sci., 38:421-432.

Ayres, G.H. (1970). Análisis químico cuantitativo. Harla, México, 634, 703 pp.

Baghdady, N. (1987). Interrelationships between the soil characteristics and the total available contents of micropollutants (Cr, Ni, Cd, Pb and Hg). Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellschaft., 55(1): 271-276.

Barnett, V. (1984). Elements of sampling theory. Hodder Stoushton, London.

Bascomb, C. (1961). A calcimeter for routine use on soil samples. Chem. and Industry 1826-1927.

Bascomb, C. (1964). Rapid method for determination of CEC of calcareous and non-calcareous soils. J. Sci. Food Agr., 15: 821-823.

Bautista, F., Béjar, D., Gutiérrez, M., Villalobos, M. (1991a). Feasible solutions for disposal and reuse of pickle liquors from Mexican iron industry. 4th Chemical Congress of North America. Am. Chem. Soc. N.Y. USA 91-99 pp.

Bautista, F., Béjar, D., Gutiérrez, M., Villalobos, M. (1991b). Opciones de solución al problema de contaminación por residuos líquidos de la industria del hierro. Rev. Int. de Contam. Ambient. 7(1): pp 124-125 .

Béjar, D. (1990). Alternativas de solución al problema de contaminación por licores de decapado. Tesis Ing. Químico. UNAM.

Bolt, G. Ed. (1982). Soil Chemistry. A: basic elements. USA. Elsevier Sc. P. C. 527 pp.

- Clive, E., B. Stinner, D. Stinner and S. Rabatin. Ed. (1988) Biological interactions in soil. USA. Elsevier. 377 pp.
- Chanmugathas, P. and J.M. Bollag. (1987). Microbial role in immobilization and subsequent mobilization of cadmium in soil suspensions. Soil Sci. Soc. Am. J. 51:1184-1191.
- Cram, S., Bautista, F., Béjar, D., Villalobos, M., Gutiérrez, M. (1989). Análisis de los efluentes de la industria metalmeccánica y la utilización del ácido residual para la recuperación de suelos sodicocálcicos. En memorias del primer simposio internacional de química ambiental. Facultad de química UNAM.
- Davis, B. Ed. (1980). Applied soil trace elements. USA. John Wiley & Sons Ltd. 287-351.
- Dijkerman, J. (1981). Field description, morphology and sampling of soils. The Netherlands. Wageningen Agricultural University. 102 pp.
- Dixon, J. y S. Weed. (1977). Mineral in soil environments. USA. Soil Sci. Soc. Am.
- Elliott, H. y J. Linn. (1987). Effect of calcium magnesium acetate on heavy metal mobility in soils. J. Environ. Qual., 16:(3) 222-6.
- ECE (Economic Commission for Europe) (1981). Low-waste and non waste technology in the iron and steel industry. United Nations, Nueva York, 52-68 pp.
- García, E. (1988). Modificaciones al sistema de clasificación climático de Köppen. México. 217 pp.
- Garrels, R. y Christ C. (1990). Solutions, minerals, and equilibria. USA. Jones and Bartlett Pubs. 450 pp.
- Gibbs, L. (1973). Mechanisms of trace metal transport in rivers. Science 180: 71-73.
- Gibson, .J. y J.G. Farmer. (1986). Multi-step sequential chemical extraction of heavy metals from urban soils. Environm. Pollut. 11:117-135.
- Glinski, J. y Lipiec, J. (1990). Soil physical conditions and roots. USA. CRC Press. 250 pp.
- Gupta, S. y Chen, K. (1975). Partitioning of trace metals in selective chemical fractions of nearshore sediments. Environm. Lett. 10:129-158.
- Gupta, S. et al. (1987). Effect of pH on Zinc adsorption-precipitation reactions in an alkali soil. Soil Sci. 143(3): 198-212.

Gutiérrez, M. (1982). Estudio del contenido de iones inorgánicos y sus interacciones en suelos y plantas de los distritos de riego 03 y 88. Tesis de Maestría. Facultad de Química UNAM. 251 pp.

Harrison, R., D. Laver. y S. Wilson. (1981). Chemical associations of lead, cadmium, copper and zinc in street dust and roadside soils. Environ. Sci. Technol., 15: 1378-83.

Harvey, J. (1987). Geología para ingenieros geotécnicos. México. Limusa. 157 pp.

Hall, W. (1979). Química analítica. Tomo I. Análisis cualitativo. UTEHA. México. 692 pp.

Head, K. (1984). Manual of soil laboratory testing. ELE International. Great Britain. 339 pp.

Hesse, R.P., (1971). A textbook of soil chemical analysis. John Murray. Great Britain.

Hickey, G. y J. Kittrick. (1984). Chemical partitioning of cadmium, copper, nickel and zinc in soils and sediments containing high levels of heavy metals. J. Environ. Qual. 13:372-376.

Houba, J., J.J. van der Lee, I. Novozamsky y I. Walinga. (1988). Soil and plants analysis, Part 5 soil analysis procedures. Wageningen, The Netherlands. 56 pp.

Iu, K.; I. Pulford and H. Duncan. (1982). Influence of soils waterlogging on subsequent plant growth and trace metal content. Plant and Soil 66:423-427.

Iyengar, S., D.C. Martens y W.P. Miller. (1981). Distribution and plant availability of zinc solis fractions. Soil Sci. Soc. Am. J. 45: 735-739.

Kabata, A. y Pendias H. (1989). Trace elements in soils and plants. USA. CCR Press. pp 315.

Kamphorst, J. y Vens, T. (1980). Analysis of saline and sodic soils. The Netherlands. Wageningen. 49 pp.

Keith, H. (1991). Environmental sampling and analysis: a practical guide. Lewis Pub. USA.

Klages M.G. (1966). Effect of clay type and exchangeable cations on aggregation on permeability of solonetz. Soil sci. 102: 46-52.

Kramer, J. and Allen H. Ed. (1988). Metal Speciation Theory, analysis and application. Lewis Publishers. USA. 352 pp.

Kuo, S., P. Heilman y A. Baker. (1983). Distribution and forms of copper, zinc, cadmium, iron, and manganese in soil near a copper smelter. Soil Sci. 135:101-109.

LeRiche, H y A. Weir. (1963). A method of studying trace elements in soil fractions. *J. Soil Sci.* 14: 225-35.

Lester, J. (1987). Heavy metals in wastewater and sludge treatment processes, Volume II, Treatment and Disposal. CCR Press. USA. 155 pp.

Lindau, C. y A. Hossner. (1982). Sediment fractionation of Cu, Ni, Zn, Cr, Mn and Fe one experimental and three natural marshes. *J. Environ. Sci. Technol.* 16: 660-666.

Lindsay W. (1979). Chemical equilibria in soils. John Wiley & Sons, Inc. USA. 449 pp.

Lugo, J. (1984). Suelos salinos del ejido Xochimilco. Tesis Biología. Facultad de Ciencias UNAM.

Luna, P. et al. (1981). Caracterización de la afectación salina de los suelos del exlago de Texcoco. Reporte No 1, SARH. CLT. México.

Lyman, T. ed (1964). "Heat Treating, Cleaning and Finishing" En metals Handbook vol 2, American Society of Metals 7^a edición, Ohio, pp 346-356.

McLaren, R., M. Lawson y R.S. Swift. (1986). The forms of cobalt in some scottish soils as determined by extraction and isotopic exchange. *J. Soil Sci.* 37:223-234.

McLaren, R. and Crawford, D. (1973). Studies on soil copper. I. The fractionation of copper in soils. *J. Soil. Sci.* 24: 172-81.

Menguel, K. y E. Kirkby. (1987). Principles of plant nutrition. International Potash Institute. Switzerland.

Miller, W. y W. McFee. (1983). Distribution of cadmium, zinc, copper, and lead in soils of industrial northwestern Indian. *J. Environ. Qual.* 12: 29-33.

Miyamoto, R., R. Prather y J. Stroehlein. (1975). Sulfuric acid and leaching requirements for reclaiming sodium-affected calcareous soils. *Plant and soil* 43: 573-585.

Neal H. y G. Sposito. (1986). Effects of soluble organic matter and sewage sludge amendments on cadmium sorption by soils at low cadmium concentrations. *Soil Sci.* 142(3):164-172.

Ortega, M. (1976). Cambios físico-químicos de suelo del exvaso de Texcoco, sujetos a lavado con diferentes soluciones. Tesis Ing. Agrónomo. Chapingo, México.

Ortiz M. (1988). Efecto de la salinidad edáfica sobre la distribución de sodio y potasio en dos variedades de frijol, bajo condiciones de invernadero. Tesis de Maestría en Biología, UNAM.

- Page, A. et al. Ed. (1987). Chemical and microbiological properties. En "Method of soil analysis", Agronomy 9, (part 2) Am. Soc. of Agr. and Soil Sci Soc. of Am. USA. 1559 pp.
- Patterson, J. and Passino R. Ed. (1990). Metals speciation, separation and recovery. Lewis Publishers. USA. 632 pp.
- Perkin-Elmer (1982). Analytical methods for atomic absorption spectroscopy. Connecticut, USA. pp 9.2- 9.5.
- Pizarro, F. (1978). Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos. Ed. Agrícola Española. España.
- Pinta, M. (1972). Spectrométrie D'Absorption Atomique. Masson Et, Editeurs, Paris Tome I, 129-133 pp.
- Proda, R. (1975). Capacidad de adaptación de tres especies vegetales a diferentes concentraciones de ensalitramiento en suelos del exlago de Texcoco. Tesis Ing. Agrónomo. Chapingo, México.
- Pulford, I. (1986). Mechanisms controlling zinc solubility in soils. J. Soil Sci. 37: 427-438.
- Reddy, C y W. Patrick. (1977). Effect of redox potential on the solubility of zinc and copper chelates in flooded soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 41:729-732.
- Richards, A. (1980). Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Limusa. México. 168 pp.
- Richards, C., A. Haby., E. Skogley and H. Ferguson. (1984). Effects of by-product sulfuric acid on phyto availability of nutrients in irrigated calcareous, saline-sodic soils. J. Environ. Qual. 13:252-256.
- Ritchie, G. y S. Jarvis. (1986). Effects of inorganic speciation on the interpretation of copper adsorption by soils. J. Soil Sci. 37: 205-210.
- Ross S. (1989). Soil processes. A systematic approach. USA. Routledge. 444 pp.
- Rudolph, D.; Herrera, I. and Yates R. (1989). Groundwater flow and solute transport in the industrial well field of the Texcoco saline aquifer system near Mexico City. Geof. Int., 28(2): 363-408.
- Ryan, J., L. Stroehlein and S. Miyamoto. (1975). Effect of surface-applied sulfuric acid on growth and nutrient availability of five range grasses in calcareous soils. J. Range Management 28(5): 411-414.
- Ryan, J., and Stroehlein, L. (1979). Sulfuric acid treatment of calcareous soils: effects on phosphorus solubility, inorganic y

phosphorus form, and plant growth. Soil. Sci. Soc. Am. J., 43:731-735.

Schalscha, E., M. Morales; I. Ahumada; T. Schirado y P.E. Pratt. (1980). Fractionation of Zn, Cu, Cr and Ni in wastewaters, solid and soil. *Agrochimica*, 24:361-368.

Secretaría de desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE). (1988a). Norma oficial NTE-CCA-013/88, 4 de agosto. Diario Oficial de la Federación. México, D.F.

Secretaría de desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE). (1988b). Norma oficial NTE-CCA-017/88, 19 de octubre. Diario Oficial de la Federación. México, D.F.

Shainberg, I., R. Keren, y H. Frenkel. (1982). Response of sodic soils to gypsum and calcium chloride application. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46:113-117.

Shuman, L. (1979). Zinc, manganese and copper in soil fractions. *Soil. Sci.* 127:10-17.

Shuman, L. (1985). Fractionation method for soil microelements. *Soil Sci.* 140(1): 9-22.

Sommers, L. y W. Lindsay. (1979). Effect of pH and redox on predicted heavy metal-chelate equilibria in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43: 39-46.

Sparks, D. (1986). Soil physical chemistry. USA. CRC Press 308 pp.

Sposito, G., J. Lund y A.C. Chang. (1982). Trace metal chemistry in arid-zone field soils amended with sewage sludge: I. fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd and Pb in solid phases. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46:260-264.

Sposito, G. (1989). The Chemistry of soils. USA. Oxford University Press. 277 pp.

Staples, R. (1984). Salinity tolerance in plants strategies for crop improvement. New York 441 pp.

Stover, R. et al. (1976). Evaluation of metals in wastewater sludge. *J. Water Pollut. Control Fed.* 48: 2165-2175.

Strogonov, B. (1964). Physiological basis of salt tolerance of plants, as affected by various types of salinity. Jerusalem. Israel. 279 pp.

Szabolcs, I. (1989). Salt -affected soils. USA. CRC Press. 274.

Tessler, A., P. Campbell y M. Bisson. (1979). Sequential extractions procedure for the apéciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry.* 51(7):844-851.

Tiller, L. y B. Murray. (1982). Mobility and extractability of cadmium, copper, nickel, and zinc in organic and mineral soil columns. *Soil Sci.* 134: 198-205.

Tiller K., Gerth, J. y Brummer, G. (1984a). The sorption of Cd, Zn and Ni by soil clay fractions: Procedures for partition of bound forms and their interpretations. *Geoderma*, 34: 1-16.

Tiller K. Gerth, J. y Brummer, G. (1984b). The relative affinities of Cd, Ni and Zn for different soil clay fractions and goethite. *Geoderma* 34: 17-35.

Varian, (1989). Analytical methods for flame spectrometry. Varian Techtron, Springvale, Australia.

Velázquez, O. y P. Luna. (1981). Estudio agrológico detallado del exlago de Texcoco, Edo. de México. SARH. CLT. México.

Villalobos, M., D. Béjar, M. Gutiérrez, S. Cram y F. Moreno. (1990). Opciones para el tratamiento y disposición de los licores ácidos agotados provenientes del decapado de hierro. *Rev. Int. de Contam. Ambient.* (6):33-54.

Weast, R. Ed. (1987). Handbook of chemistry and physics. CRC Press. 68th edition. USA.

Williams, D., J. Vlamis, A.H. Pukite y J.E. Corey. (1980). Trace elements accumulation, movement, and distribution in the soil profile from massive applications of sewage sludge. *Soil Sci.* 129(2):117-132.

Yaalon, D., J. Van Schuylenborgh y S. Slager. (1962). The determination of cation-exchange characteristics of saline and calcareous soils. *Neth. J. Agri. Sci.* 10(3): 217-222.

Yaron, E. y shalhevct. (1966). A method for uniform packing of soil columns. *Soil sci* 101: 205-215.

Yaron, E. y Shainberg. (1973). Electrolytes and soil hydraulic conductivity. *Ecological studies arid zone vol 5 cap 4.* Springer-Verlag New York. Heidelberg Berlin. 188-199.

APENDICE 1

ANALISIS ESTADISTICO

Tabla I.1 "Análisis de varianza para pH, CE, calcio, magnesio, sodio y potasio de todos los puntos de muestreo"

ANALISIS DE VARIANZA PARA pH

Fuente de var	SC	G.L.	MC	F	niv de signif.
entre grupos	5.6924	23	.247495	9.908	.0000
dentro grupos	.5995	24	.02498		
total	6.2919	47			

Fuente de var= fuente de variación, Entre gpo= entre grupos, Dentro de gpo= dentro de grupos, SC= suma de cuadrados, G.L.= grados de libertad, MC= media de cuadrados, F= varianza relativa, niv de signif= nivel de significancia

ANALISIS DE VARIANZA PARA CONDUCTIVIDAD ELECTRICA

Fuente de var	SC	G.L.	MC	F	niv de signif.
entre grupos	19.5586	23	.850378	3.271	.0027
dentro grupos	6.2393	24	.025997		
total	25.7979	47			

ANALISIS DE VARIANZA PARA CALCIO

Fuente de var	SC	G.L.	MC	F	niv de signif.
entre grupos	525.5142	23	22.84844	4.848	.0001
dentro grupos	113.1002	24	4.71251		
total	638.6144	47			

ANALISIS DE VARIANZA PARA MAGNESIO

Fuente de var	SC	G.L.	MC	F	niv de signif.
entre grupos	5.8312988	23	.253534	4.065	.0006
dentro grupos	1.4969191	24	.062372		
total	7.3282179	47			

ANALISIS DE VARIANZA PARA SODIO

Fuente de var	SC	G.L.	MC	F	niv de signif.
entre grupos	1750.59	23	76.11	5.539	.0000
dentro grupos	329.77	24	13.74		
total	2080.36	47			

ANALISIS DE VARIANZA PARA POTASIO

Fuente de var	SC	G.L.	MC	F	niv de signif.
entre grupos	243.2624	23	10.57662	5.768	.0000
dentro grupos	44.0107	24	1.83377		
total	287.2731	47			

TABLA DE MEDIAS PARA pH

Trat	N	promedio	error tipo (interno)	error tipo (general)	intervalo con un 95% de confianza	
111	2	7.5650000	.0250000	.1117568	7.3342903	7.7957097
112	2	8.7250000	.2250000	.1117568	8.4942903	8.9557097
121	2	7.5550000	.0550000	.1117568	7.3242903	7.7857097
122	2	7.8450000	.0850000	.1117568	7.6142903	8.0757097
211	2	7.7000000	.0200000	.1117568	7.4692903	7.9307097
212	2	8.0450000	.0150000	.1117568	7.8142903	8.2757097
221	2	7.7450000	.1250000	.1117568	7.5142903	7.9757097
222	2	7.9300000	.0200000	.1117568	7.6992903	8.1607097
311	2	7.6050000	.1050000	.1117568	7.3742903	7.8357097
312	2	8.2150000	.0450000	.1117568	7.9842903	8.4457097
321	2	7.5700000	.0200000	.1117568	7.3392903	7.8007097
322	2	7.5850000	.0050000	.1117568	7.3542903	7.8157097
411	2	7.5050000	.0550000	.1117568	7.2742903	7.7357097
412	2	7.9550000	.1250000	.1117568	7.7242903	8.1857097
421	2	7.3800000	.0600000	.1117568	7.1492903	7.6107097
422	2	7.5950000	.0850000	.1117568	7.3642903	7.8257097
511	2	7.6250000	.0850000	.1117568	7.3942903	7.8557097
512	2	8.6450000	.3350000	.1117568	8.4142903	8.8757097
521	2	7.5100000	.1500000	.1117568	7.2792903	7.7407097
522	2	7.8300000	.0200000	.1117568	7.5992903	8.0607097
611	2	7.3650000	.0250000	.1117568	7.1342903	7.5957097
612	2	7.7150000	.1550000	.1117568	7.4842903	7.9457097
621	2	7.4250000	.1050000	.1117568	7.1942903	7.6557097
622	2	7.8250000	.0250000	.1117568	7.5942903	8.0557097
Total	48	7.7691667	.0228123	.0228123	7.7220733	7.8162601

Tabla I.2 "Intervalos de confianza, medias y errores tipo internos y generales para pH".

TABLA DE MEDIAS PARA CE

trat	N	promedio	error tipo (interno)	error tipo (general)	intervalo con un 95% de confianza	
111	2	1.4600000	.1200000	.3605363	.7157123	2.1042877
112	2	2.4950000	.5450000	.3605363	1.7507123	3.2392877
121	2	1.2650000	.4150000	.3605363	.5207123	2.0092877
122	2	.8350000	.0550000	.3605363	.0907123	1.5792877
211	2	1.5300000	.0000000	.3605363	.8257123	2.3242877
212	2	1.1800000	.1100000	.3605363	.4357123	1.9242877
221	2	1.9800000	.3300000	.3605363	1.2357123	2.7242877
222	2	.9300000	.0200000	.3605363	.1857123	1.6742877
311	2	1.6250000	.0850000	.3605363	.8807123	2.3692877
312	2	2.1050000	.3750000	.3605363	1.3607123	2.8492877
321	2	2.1650000	.0450000	.3605363	1.4207123	2.9092877
322	2	1.7850000	.4650000	.3605363	1.0407123	2.5292877
411	2	2.6700000	.7700000	.3605363	1.9257123	3.4142877
412	2	1.9400000	.0400000	.3605363	1.1957123	2.6342877
421	2	1.4700000	.1300000	.3605363	.7257123	2.2142877
422	2	1.4900000	.0800000	.3605363	.7357123	2.2242877
511	2	1.6150000	.1350000	.3605363	.6707123	2.3592877
512	2	2.1100000	1.0900000	.3605363	2.3657123	3.8542877
521	2	1.4650000	.0450000	.3605363	.7207123	2.2092877
522	2	1.3550000	.0350000	.3605363	.6107123	2.0992877
611	2	2.6000000	.1000000	.3605363	1.8557123	3.3442877
612	2	.6950000	.0850000	.3605363	-.1092877	1.3792877
621	2	1.5400000	.2400000	.3605363	.7957123	2.2842877
622	2	.4300000	.0100000	.3605363	-.3142877	1.1742877
Total	48	1.6547917	.3735942	.3735942	1.5028646	1.8067188

Tabla I.3 "Intervalos de confianza, medias y errores tipo internos y generales para la conductividad eléctrica".

TABLA DE MEDIAS PARA CALCIO

trat	N	promedio	error tipo (interno)	error tipo (general)	intervalo con un 95% de confianza	
111	2	13.327400	.1087000	1.5350101	10.158540	16.496260
112	2	6.823290	1.5399600	1.5350101	3.654430	9.992150
121	2	15.957250	2.9572500	1.5350101	12.788390	19.126110
122	2	9.540890	1.2501100	1.5350101	6.372030	12.709750
211	2	12.999050	.4990500	1.5350101	9.830190	16.167910
212	2	7.294340	.1992900	1.5350101	4.125480	10.463200
221	2	13.069850	.9698500	1.5350101	9.900990	16.238710
222	2	9.631440	.5072600	1.5350101	6.462580	12.800300
311	2	12.715750	.1805500	1.5350101	9.546890	15.884610
312	2	10.519195	.8515050	1.5350101	7.350335	13.688055
321	2	14.521200	.9629000	1.5350101	11.352340	17.690060
322	2	12.871100	.4563000	1.5350101	9.702240	16.039960
411	2	11.461300	.0181000	1.5350101	8.292440	14.630160
412	2	9.740160	.1449400	1.5350101	6.571300	12.909020
421	2	17.560400	.3912000	1.5350101	14.391540	20.729260
422	2	8.725580	1.3044200	1.5350101	5.556720	11.894440
511	2	15.183200	.9629000	1.5350101	12.014340	18.352060
512	2	18.535735	5.6797650	1.5350101	10.366875	16.704595
521	2	14.521200	.4815000	1.5350101	11.352340	17.690060
522	2	15.363800	2.0462000	1.5350101	12.194940	18.532660
611	2	12.685650	.9930500	1.5350101	9.516790	15.854510
612	2	5.450365	.0503650	1.5350101	2.281505	8.619225
621	2	13.393800	.0762000	1.5350101	10.224940	16.562660
622	2	4.794160	.0543500	1.5350101	1.625300	7.963020
Total	48	11.736921	.3133326	.3133326	11.090080	12.383762

Tabla I.4 "Intervalos de confianza, medias y errores tipo internos y generales para calcio".

TABLA DE MEDIAS PARA MAGNESIO

trat	N	promedio	error tipo (interno)	error tipo (general)	intervalo con un 95% de confianza	
111	2	1.2787250	.0083750	.1765951	.9141629	1.6432961
112	2	1.3976800	.1876500	.1765951	1.0331189	1.7622411
121	2	1.4879000	.1879000	.1765951	1.1233389	1.8524611
122	2	1.1513950	.0720450	.1765951	.7868339	1.5159561
211	2	1.1787350	.1787350	.1765951	.8141739	1.5432961
212	2	1.2133800	.0000000	.1765951	.8488189	1.5779411
221	2	1.7131300	.5868700	.1765951	1.3485689	2.0776911
222	2	1.1028100	.0770700	.1765951	.7382489	1.4673711
311	2	1.3742250	.2312050	.1765951	1.0096639	1.7387861
312	2	1.3105600	.0033500	.1765951	.9459989	1.6751211
321	2	1.6355900	.0670200	.1765951	1.2710289	2.0001511
322	2	1.2737000	.2211600	.1765951	.9091389	1.6382611
411	2	1.4965300	.0653400	.1765951	1.1319689	1.8610911
412	2	1.6741250	.0318350	.1765951	1.3095639	2.0386861
421	2	1.7361200	.2312100	.1765951	1.3715589	2.1006811
422	2	1.9421950	.1926750	.1765951	1.5776339	2.3067561
511	2	1.8701550	.1842950	.1765951	1.5055939	2.2347161
512	2	1.8349700	.1457600	.1765951	1.4704089	2.1995311
521	2	1.5685750	.0536150	.1765951	1.2040139	1.9331361
522	2	1.8835550	.0737150	.1765951	1.5189939	2.2481161
611	2	1.1765250	.1206350	.1765951	.8119639	1.5410861
612	2	.6721315	.0721315	.1765951	.3075704	1.0366926
621	2	1.0625950	.0569650	.1765951	.6980339	1.4271561
622	2	.6102290	.0335090	.1765951	.2456679	.9747901
Total	48	1.4018973	.0360473	.0360473	1.3274816	1.4763130

Tabla I.5 "Intervalos de confianza, medias y errores tipo internos y generales para magnesio".

TABLA DE MEDIAS PARA SODIO

trat	N	error tipo		intervalo con un	
		promedio (interno)	(general)	95% de confianza	
111	2	3.600000	.500000	2.6211082	-1.810990 9.010990
112	2	21.700000	6.400000	2.6211082	16.289010 27.110990
121	2	1.000000	.500000	2.6211082	-4.410990 6.410990
122	2	1.150000	.350000	2.6211082	-4.260990 6.560990
211	2	2.900000	.900000	2.6211082	-2.510990 8.310990
212	2	4.950000	1.850000	2.6211082	-.460990 10.360990
221	2	7.600000	6.600000	2.6211082	2.189010 13.010990
222	2	1.450000	.150000	2.6211082	-3.960990 6.860990
311	2	4.950000	.550000	2.6211082	-.460990 10.360990
312	2	7.150000	2.850000	2.6211082	1.739010 12.560990
321	2	6.950000	.350000	2.6211082	1.539010 12.360990
322	2	4.500000	3.200000	2.6211082	-.910990 9.910990
411	2	8.900000	.500000	2.6211082	3.489010 14.310990
412	2	20.000000	1.400000	2.6211082	14.589010 25.410990
421	2	3.500000	.400000	2.6211082	-1.910990 8.910990
422	2	8.200000	1.500000	2.6211082	2.789010 13.610990
511	2	6.900000	1.200000	2.6211082	1.489010 12.310990
512	2	22.350000	6.350000	2.6211082	16.939010 27.760990
521	2	1.400000	.200000	2.6211082	-4.010990 6.810990
522	2	3.300000	.200000	2.6211082	-2.110990 8.710990
611	2	6.000000	2.900000	2.6211082	.589010 11.410990
612	2	3.850000	1.050000	2.6211082	-1.560990 9.260990
621	2	2.050000	.850000	2.6211082	-3.360990 7.460990
622	2	2.850000	.050000	2.5211082	-2.560990 8.260990
Total	48	6.550000	.5350315	.5350315	5.445486 7.654514

Tabla I.6 "Intervalos de confianza, medias y errores tipo internos y generales para sodio".

TABLA DE MEDIAS PARA POTASIO

trat	N	promedio	error tipo (interno)	error tipo (general)	intervalo con un 95% de confianza
111	2	3.085000	1.0250000	.9575435	1.1082565 5.061744
112	2	8.350000	1.8500000	.9575435	6.3732565 10.326744
121	2	5.350000	1.4500000	.9575435	3.3732565 7.326744
122	2	5.650000	1.2500000	.9575435	3.6732565 7.626744
211	2	4.000000	1.0000000	.9575435	2.0232565 5.976744
212	2	3.100000	1.0000000	.9575435	1.1232565 5.076744
221	2	6.450000	1.0500000	.9575435	4.8732565 8.626744
222	2	2.650000	1.1500000	.9575435	.8732565 4.826744
311	2	4.000000	1.0000000	.9575435	2.0232565 5.976744
312	2	6.750000	1.5000000	.9575435	4.7732565 8.726744
321	2	4.500000	1.0000000	.9575435	2.5232565 6.476744
322	2	5.400000	1.2000000	.9575435	3.4232565 7.376744
411	2	5.600000	1.2000000	.9575435	3.6232565 7.576744
412	2	6.200000	1.0000000	.9575435	4.9232565 8.876744
421	2	7.550000	1.5500000	.9575435	5.5732565 9.526744
422	2	1.850000	1.0500000	.9575435	-.1267435 3.826744
511	2	8.500000	1.4000000	.9575435	6.5232565 10.476744
512	2	11.300000	1.6000000	.9575435	9.3232565 13.276744
521	2	5.900000	1.5000000	.9575435	3.9232565 7.876744
522	2	9.050000	1.9500000	.9575435	7.0732565 11.026744
611	2	5.500000	1.1000000	.9575435	3.5232565 7.476744
612	2	5.725000	2.2750000	.9575435	3.7482565 7.701744
621	2	3.700000	1.3000000	.9575435	1.7232565 5.676744
622	2	2.600000	1.0000000	.9575435	.6232565 4.576744
Total	48	5.577500	1.254578	.1954578	5.1739989 5.981001

Tabla I.7 "Intervalos de confianza, medias y errores tipo internos y generales para potasio".

Tabla I.8 "Análisis estadístico de los suelos recuperados con los licores ácidos. Primer punto de muestreo"

Análisis de varianza para pH

Fuente de var	SC	GL	MC	F	NS
Entre gpo	1.8257500	3	0.6085833	19.791	.0073
Dentro gpo	0.123	4	0.03075		
Total	1.94875	7			

Fuente de var= fuente de variación, Entre gpo= entre grupos. Dentro de gpo= dentro de los grupos, SC= suma de cuadrados. MC= media de cuadrados, G.L.= grados de libertad, F= razón de varianza, NS= nivel de significancia.

1Cb es diferente a los demás y los demás son iguales

Análisis de varianza para Conductividad eléctrica

Fuente de var	SC	GL	MC	F	NS
Entre gpo	2.9766375	3	0.9922125	4.078	.104
Dentro gpo	0.97335	4	0.2433375		
Total	3.9499875	7			

Análisis de varianza para calcio

Fuente de var	SC	GL	MC	F	NS
Entre gpo	96.87375	3	32.29125	5.094	.07493
Dentro gpo	25.355	4	6.33875		
Total	122.22875	7			

Análisis de varianza para magnesio

Fuente de var	SC	GL	MC	F	NS
Entre gpo	0.13375	3	0.445833	1.081	.4523
Dentro gpo	0.165	4	0.41255		
Total	0.29875	7			

Análisis de varianza para sodio

Fuente de var	SC	GL	MC	F	NS
Entre gpo	2.9766375	3	0.9922125	4.078	.104
Dentro gpo	0.97335	4	0.2433375		
Total	3.9499875	7			

Análisis de varianza para potasio

Fuente de var	SC	GL	MC	F	NS
Entre gpo	0.13375	3	0.0445833	1.081	.4523
Dentro gpo	0.165	4	0.04125		
Total	0.29875	7			

Tabla I.9 "Análisis estadístico de los suelos recuperados con los licores ácidos. Segundo punto de muestreo"

Análisis de varianza para pH

Fuente de var	SC	GL	MC	F	NS
Entre gpo	0.1557	3	0.0519	6.234	.0547
Dentro gpo	0.033	4	0.008325		
Total	0.189	7			

Fuente de var= fuente de variación, Entre gpo= entre grupos. Dentro de gpo= dentro de los grupos, SC= suma de cuadrados. MC= media de cuadrados, G.L.= grados de libertad, F= razón de varianza, NS= nivel de significancia

Análisis de varianza para Conductividad eléctrica

Fuente de var	SC	GL	MC	F	NS
Entre gpo	1.27375	3	0.9922125	5.159	.0734
Dentro gpo	0.3292	4	0.0823		
Total	1.60295	7			

Análisis de varianza para calcio

Fuente de var	SC	GL	MC	F	NS
Entre gpo	47.265371	3	15.755124	21.195	.0064
Dentro gpo	2.973378	4	0.743345		
Total	50.238749	7			

Ningún grupo es igual.

Análisis de varianza para magnesio

Fuente de var	SC	GL	MC	F	NS
Entre gpo	0.4635046	3	0.1545015	0.808	.5516
Dentro gpo	0.7646048	4	0.1911512		
Total	1.2281094	7			

Análisis de varianza para sodio

Fuente de var	SC	GL	MC	F	NS
Entre gpo	42.745	3	14.248333	0.595	.6503
Dentro gpo	95.63	4	23.9075		
Total	138.375	7			

Análisis de varianza para potasio

Fuente de var	SC	GL	MC	F	NS
Entre gpo	18.13000	3	6.0433333	1.067	.4566
Dentro gpo	22.65000	4	5.6625		
Total	40.78000	7			

Tabla I.10 "Análisis estadístico de los suelos recuperados con los licores ácidos. Tercer punto de muestreo"

Análisis de varianza para pH

Fuente de var	SC	GL	MC	F	NS
Entre gpo	0.5934375	3	0.1978125	29.36	.0035
Dentro gpo	0.02695	4	0.0067375		
Total	0.6203875	7			

Fuente de var= fuente de variación, Entre gpo= entre grupos. Dentro de gpo= dentro de los grupos, SC= suma de cuadrados. xMC= media de cuadrados, G.L.= grados de libertad, F= razón de varianza, NS= nivel de significancia.

3Cb es diferente a los demás grupos que son iguales

Análisis de varianza para Conductividad eléctrica

Fuente de var	SC	GL	MC	F	NS
Entre gpo	0.399000	3	0.133	0.478	.7146
Dentro gpo	1.1122	4	0.27805		
Total	1.5112	7			

Análisis de varianza para calcio

Fuente de var	SC	GL	MC	F	NS
Entre gpo	16.189925	3	5.3966418	5.7	.063
Dentro gpo	3.787433	4	0.9468583		
Total	19.977359	7			

Análisis de varianza para magnesio

Fuente de var	SC	GL	MC	F	NS
Entre gpo	0.1604937	3	0.0534979	1.013	.4745
Dentro gpo	0.2112447	4	0.0528112		
Total	0.3717384	7			

Análisis de varianza para sodio

Fuente de var	SC	GL	MC	F	NS
Entre gpo	11.05375	3	3.6845833	.3928	.766
Dentro gpo	37.575	4	9.39375		
Total	48.62875	7			

Análisis de varianza para potasio

Fuente de var	SC	GL	MC	F	NS
Entre gpo	8.73375	3	2.91125	4.039	.1055
Dentro gpo	2.88500	4	0.71125		
Total	11.61875	7			

Tabla I.11 "Análisis estadístico de los suelos recuperados con los licores ácidos. Cuarto punto de muestreo"

Análisis de varianza para pH

Fuente de var	SC	GL	MC	F	NS
Entre gpo	0.3663375	3	0.1221125	8.2861	.0343
Dentro gpo	0.05895	4	0.0147375		
Total	0.4252875	7			

Fuente de var= fuente de variación, Entre gpo= entre grupos. Dentro de gpo= dentro de los grupos, SC= suma de cuadrados, MC= media de cuadrados, G.L.= grados de libertad, F= razón de varianza, NS= nivel de significancia.

4Ca = 4Sb, los demás grupos son diferentes entre si

Análisis de varianza para conductividad eléctrica

Fuente de var	SC	GL	MC	F	NS
Entre gpo	1.9108	3	0.6369333	2.062	.248
Dentro gpo	1.2356	4	0.3089		
Total	3.1464	7			

Análisis de varianza para calcio

Fuente de var	SC	GL	MC	F	NS
Entre gpo	93.942539	3	31.31418	33.386	.0027
Dentro gpo	3.751768	4	.937942		
Total	97.694307	7			

4Sa es diferente a los demás grupos.

Análisis de varianza para magnesio

Fuente de var	SC	GL	MC	F	NS
Entre gpo	0.2028662	3	0.0676221	1.411	.3627
Dentro gpo	0.191729	4	0.0479323		
Total	03945952	7			

Análisis de varianza para sodio

Fuente de var	SC	GL	MC	F	NS
Entre gpo	293.2200	3	97.74005	42.312	.0017
Dentro gpo	9.2400	4	2.3100		
Total	302.4600	7			

4Cb es diferente a los demás grupos.

Análisis de varianza para potasio

Fuente de var	SC	GL	MC	F	NS
Entre gpo	38.9855	3	12.995	67.506	.0007
Dentro gpo	0.77	4	0.1925		
Total	39.7550	7			

Todos los grupos son diferentes entre si

Tabla I.12 "Análisis estadístico de los suelos recuperados con los licores ácidos. Quinto punto de muestreo"

Análisis de varianza para pH

Fuente de var	SC	GL	MC	F	NS
Entre gpo	1.57525	3	0.5250833	7.377	.0416
Dentro gpo	0.2847	4	0.071175		
Total	1.85995	7			

Fuente de var= fuente de variación, Entre gpo= entre grupos. Dentro de gpo= dentro de los grupos, SC= suma de cuadrados. MC= media de cuadrados, G.L.= grados de libertad, F= razón de varianza, NS= nivel de significancia.

5Ca = 5Sb, los demás grupos son diferentes entre si

Análisis de varianza para Conductividad eléctrica

Fuente de var	SC	GL	MC	F	NS
Entre gpo	4.0616375	3	1.3538792	2.22	.2282
Dentro gpo	2.43915	4	0.6097875		
Total	6.5007875	7			

Análisis de varianza para calcio

Fuente de var	SC	GL	MC	F	NS
Entre gpo	4.055696	3	1.351899	.072	.9719
Dentro gpo	75.12365	4	18.780913		
Total	79.179346	7			

Análisis de varianza para magnesio

Fuente de var	SC	GL	MC	F	NS
Entre gpo	0.1348148	3	0.0449383	1.474	.3484
Dentro gpo	0.1219263	4	0.0304816		
Total	0.2567411	7			

Análisis de varianza para sodio

Fuente de var	SC	GL	MC	F	NS
Entre gpo	543.66375	3	181.22125	8.662	.0318
Dentro gpo	83.685	4	20.92125		
Total	627.34875	7			

5Sa = 5Sb. los demás son diferentes entre si.

Análisis de varianza para potasio

Fuente de var	SC	GL	MC	F	NS
Entre gpo	29.52375	3	9.84125	11.768	.0187
Dentro gpo	3.345	4	0.83625		
Total	32.86875	7			

5Ca = 5Sb, los demás son diferentes entre si

Tabla I.13 "Análisis estadístico de los suelos recuperados con los licores ácidos. Sexto punto de muestreo "

Análisis de varianza para pH

Fuente de var	SC	GL	MC	F	NS
Entre gpo	0.29695	3	0.0989833	5.454	.06743
Dentro gpo	0.0726	4	0.018155		
Total	0.36955	7			

Fuente de var= fuente de variación, Entre gpo= entre grupos. Dentro de gpo= dentro de los grupos, SC= suma de cuadrados. MC= media de cuadrados, G.L.= grados de libertad, F= razón de varianza, NS= nivel de significancia

Análisis de varianza para conductividad eléctrica

Fuente de var	SC	GL	MC	F	NS
Entre gpo	5.8934375	3	1.9644792	52.439	.0011
Dentro gpo	0.14985	4	0.0374625		
Total	6.0432875	7			

6Ca = 6Sa y 6Cb = 6Sb, las diferencias son en profundidad solamente

Análisis de varianza para calcio

Fuente de var	SC	GL	MC	F	NS
Entre gpo	126.45823	3	42.152745	82.757	.0005
Dentro gpo	2.03742	4	0.509355		
Total	128.49566	7			

Análisis de varianza para magnesio

Fuente de var	SC	GL	MC	F	NS
Entre gpo	0.5013628	3	0.1671209	17.328	.0093
Dentro gpo	0.0385777	4	0.0096444		
Total	0.5399404	7			

6Ca = 6Sa y 6Cb = 6Sb, las diferencias son en profundidad solamente.

Análisis de varianza para sodio

Fuente de var	SC	GL	MC	F	NS
Entre gpo	17.51375	3	5.8379167	1.14	.4339
Dentro gpo	20.475	4	5.11875		
Total	37.98875	7			

Análisis de varianza para potasio

Fuente de var	SC	GL	MC	F	NS
Entre gpo	13.388438	3	4.4628125	1.376	.3708
Dentro gpo	12.97125	4	3.2428125		
Total	26.359687	7			



FIGURA I.1 VALORES MEDIOS Y SU DESVIACION TIPO INTERNA DEL pH DE LOS SUELOS RECUPERADOS POR PUNTO DE MUESTREO (1,2,3,4,5 y 6) POR TRATAMIENTO AL SUELO (1= compactos y 2= sueltos) Y POR PROFUNDIDAD (1= 0-20 y 2= 20-40 cm).

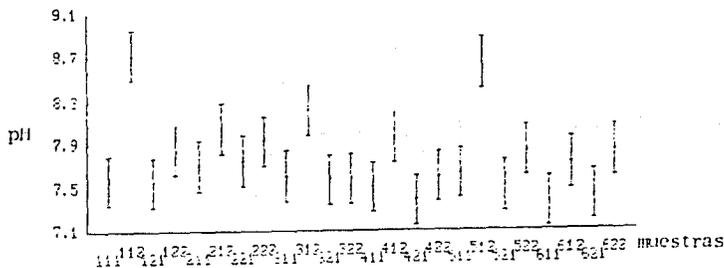


FIGURA I.2 VALORES MEDIOS Y SU DESVIACION TIPO GENERAL DEL pH DE LOS SUELOS RECUPERADOS POR PUNTO DE MUESTREO (1,2,3,4,5 y 6) POR TRATAMIENTO AL SUELO (1= compactos y 2= sueltos) Y POR PROFUNDIDAD (1= 0-20 y 2= 20-40 cm).

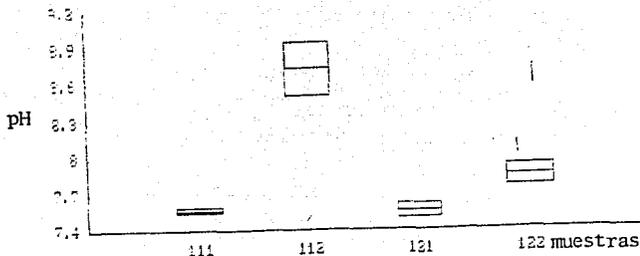


FIGURA I.3 PRIMER PUNTO DE MUESTREO. VALORES MEDIOS Y SU DESVIACION TIPO INTERNA DEL pH DE LOS SUELOS RECUPERADOS CON EL LICOR ACIDO. 111= SUELO COMPACTO Y 0-20 cm, 112=SUELO COMPACTO Y 20-40 cm, 121= SUELO SUELTO Y 0-20 cm Y 122= SUELO SUELTO Y 20-40 cm.

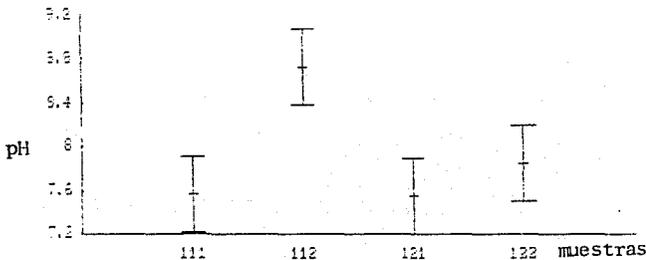


FIGURA I.4 PRIMER PUNTO DE MUESTREO. VALORES MEDIOS Y SU DESVIACION TIPO GENERAL DEL pH DE LOS SUELOS RECUPERADOS CON EL LICOR ACIDO. 111= SUELO COMPACTO Y 0-20 cm, 112=SUELO COMPACTO Y 20-40 cm, 121= SUELO SUELTO Y 0-20 cm Y 122= SUELO SUELTO Y 20-40 cm.

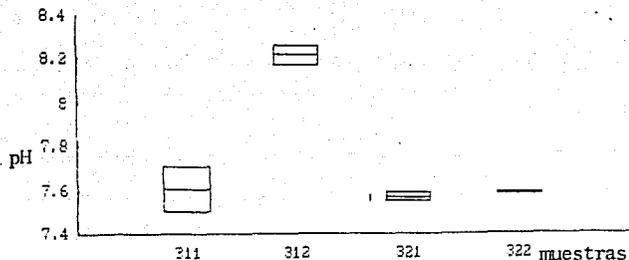


FIGURA I.5 TERCER PUNTO DE MUESTREO. VALORES MEDIOS Y SU DESVIACION TIPO INTERNA DEL pH DE LOS SUELOS RECUPERADOS CON EL LICOR ACIDO. 311= SUELO COMPACTO Y 0-20 cm, 312=SUELO COMPACTO Y 20-40 cm, 321= SUELO SUELTO Y 0-20 cm Y 322= SUELO SUELTO Y 20-40 cm.

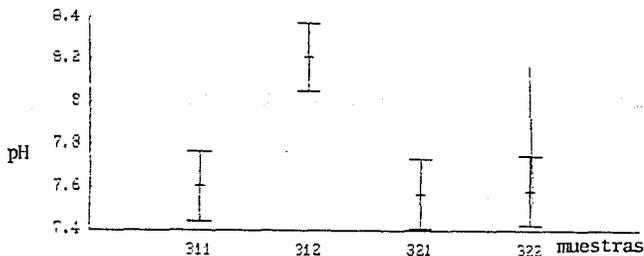


FIGURA I.6 TERCER PUNTO DE MUESTREO. VALORES MEDIOS Y SU DESVIACION TIPO GENERAL DEL pH DE LOS SUELOS RECUPERADOS CON EL LICOR ACIDO. 311= SUELO COMPACTO Y 0-20 cm, 312=SUELO COMPACTO Y 20-40 cm, 321= SUELO SUELTO Y 0-20 cm Y 322= SUELO SUELTO Y 20-40 cm.

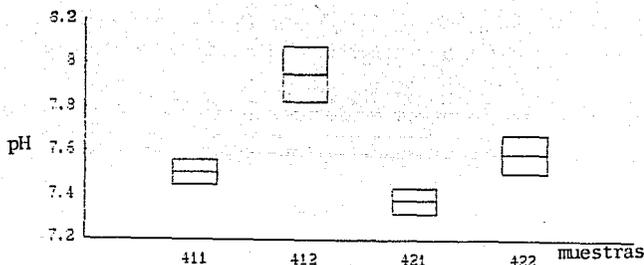


FIGURA I.7 CUARTO PUNTO DE MUESTREO. VALORES MEDIOS Y SU DESVIACION TIPO INTERNA DEL pH DE LOS SUELOS RECUPERADOS CON EL LICOR ACIDO. 411= SUELO COMPACTO Y 0-20 cm, 412=SUELO COMPACTO Y 20-40 cm, 421= SUELO SUELTO Y 0-20 cm Y 422= SUELO SUELTO Y 20-40 cm.

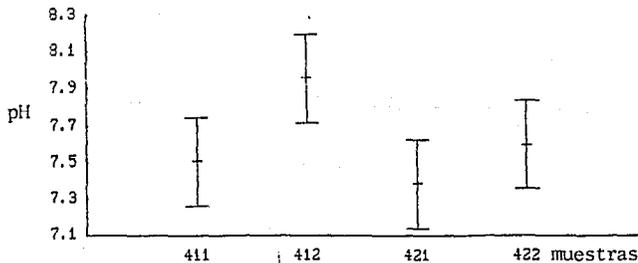


FIGURA I.8 CUARTO PUNTO DE MUESTREO. VALORES MEDIOS Y SU DESVIACION TIPO GENERAL DEL pH DE LOS SUELOS RECUPERADOS CON EL LICOR ACIDO. 411= SUELO COMPACTO Y 0-20 cm, 412=SUELO COMPACTO Y 20-40 cm, 421= SUELO SUELTO Y 0-20 cm Y 422= SUELO SUELTO Y 20-40 cm.

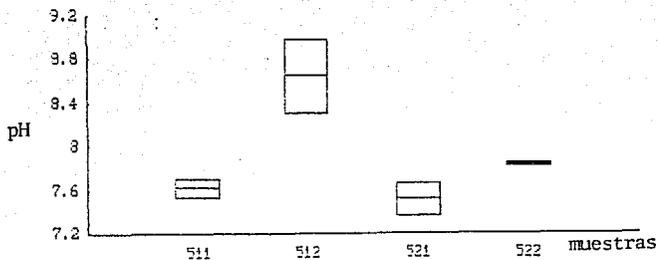


FIGURA I.9 QUINTO PUNTO DE MUESTREO. VALORES MEDIOS Y SU DESVIACION TIPO INTERNA DEL pH DE LOS SUELOS RECUPERADOS CON EL LICOR ACIDO. 511= SUELO COMPACTO Y 0-20 cm, 512=SUELO COMPACTO Y 20-40 cm, 521= SUELO SUELTO Y 0-20 cm Y 522= SUELO SUELTO Y 20-40 cm.

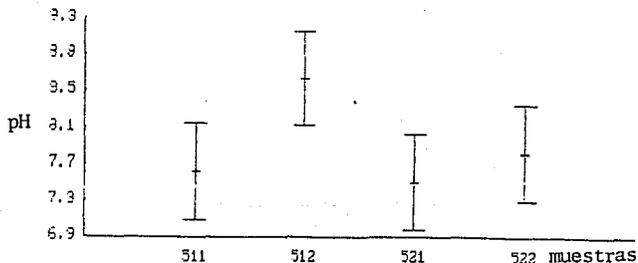


FIGURA I.10 QUINTO PUNTO DE MUESTREO. VALORES MEDIOS Y SU DESVIACION TIPO GENERAL DEL pH DE LOS SUELOS RECUPERADOS CON EL LICOR ACIDO. 511= SUELO COMPACTO Y 0-20 cm, 512=SUELO COMPACTO Y 20-40 cm, 521= SUELO SUELTO Y 0-20 cm Y 522= SUELO SUELTO Y 20-40 cm.

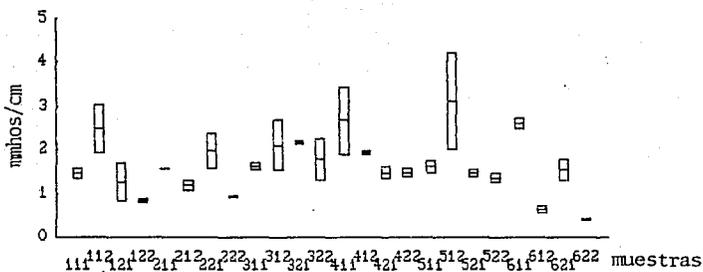


FIGURA I.11 VALORES MEDIOS Y SU DESVIACION TIPO INTERNA DE LA CONDUCTIVIDAD ELECTRICA DE LOS SUELOS RECUPERADOS POR PUNTO DE MUESTREO (1,2,3,4,5, y 6) , POR TRATAMIENTO AL SUELO (1= compactos y 2= sueltos) Y POR PROFUNDIDAD (1= 0-20 y 2= 20-40 cm).

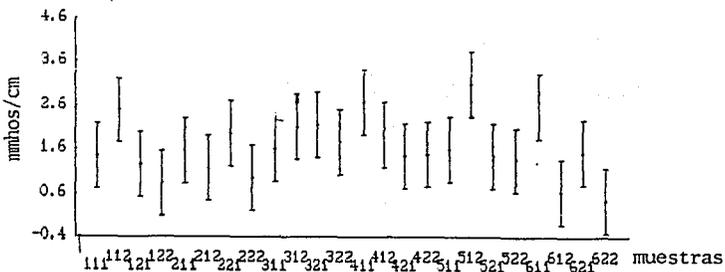


FIGURA I.12 VALORES MEDIOS Y SU DESVIACION TIPO GENERAL DE LA CONDUCTIVIDAD ELECTRICA DE LOS SUELOS RECUPERADOS POR PUNTO DE MUESTREO (1,2,3,4,5, y 6) , POR TRATAMIENTO AL SUELO (1= compactos y 2= sueltos) Y POR PROFUNDIDAD (1= 0-20 y 2= 20-40 cm).

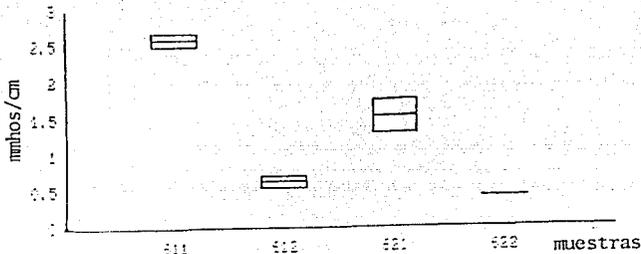


FIGURA I.13 SEXTO PUNTO DE MUESTREO. VALORES MEDIOS Y DESVIACION TIPO INTERNA DE LA CONDUCTIVIDAD ELECTRICA DE LOS SUELOS RECUPERADOS CON EL LICOR ACIDO. 611= SUELO COMPACTO Y 0-20 cm, 612=SUELO COMPACTO Y 20-40 cm, 621= SUELO SUELTO Y 0-20 cm Y 622= SUELO SUELTO Y 20-40 cm.

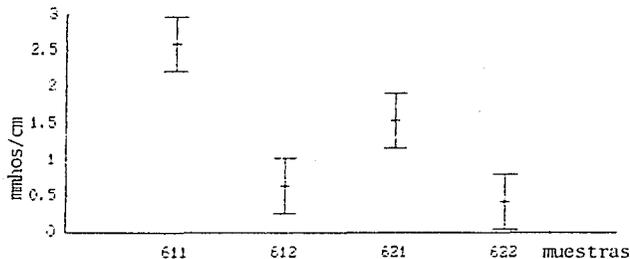


FIGURA I.14 SEXTO PUNTO DE MUESTREO. VALORES MEDIOS Y DESVIACION TIPO INTERNA DE LA CONDUCTIVIDAD ELECTRICA DE LOS SUELOS RECUPERADOS CON EL LICOR ACIDO. 611= SUELO COMPACTO Y 0-20 cm, 612=SUELO COMPACTO Y 20-40 cm, 621= SUELO SUELTO Y 0-20 cm Y 622= SUELO SUELTO Y 20-40 cm.

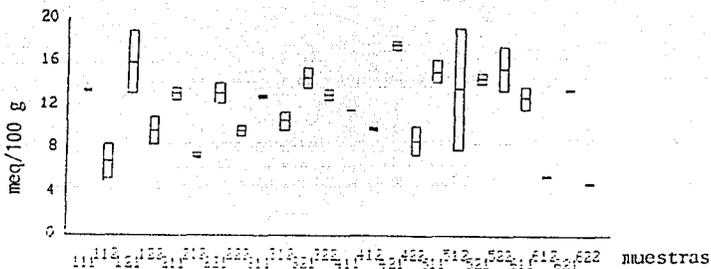


FIGURA I.15 VALORES MEDIOS Y SU DESVIACION TIPO INTERNA DEL CALCIO INTERCAMBIABLE DE LOS SUELOS RECUPERADOS POR PUNTO DE MUESTREO (1,2,3,4,5, y 6), POR TRATAMIENTO AL SUELO (1= compactos y 2= sueltos) Y POR PROFUNDIDAD (1= 0-20 y 2= 20-40 cm).

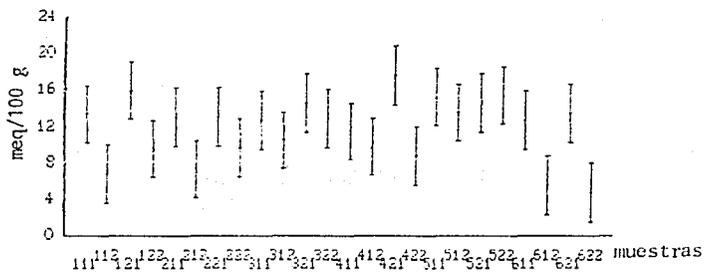


FIGURA I.16 VALORES MEDIOS Y SU DESVIACION TIPO GENERAL DEL CALCIO INTERCAMBIABLE DE LOS SUELOS RECUPERADOS POR PUNTO DE MUESTREO (1,2,3,4,5, y 6), POR TRATAMIENTO AL SUELO (1= compactos y 2= sueltos) Y POR PROFUNDIDAD (1= 0-20 y 2= 20-40 cm).

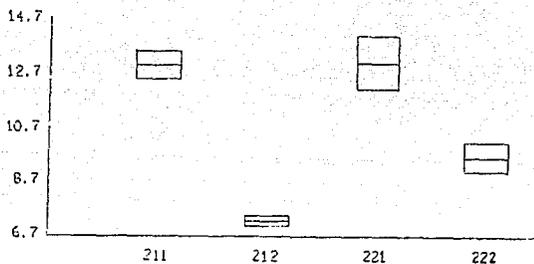


FIGURA I.17 SEGUNDO PUNTO DE MUESTREO. VALORES MEDIOS Y DESVIACION TIPO INTERNA DEL CALCIO DE LOS SUELOS RECUPERADOS CON EL LICOR ACIDO. 211= SUELO COMPACTO Y 0-20 cm, 212=SUELO COMPACTO Y 20-40 cm, 221= SUELO SUELTO Y 0-20 cm Y 222= SUELO SUELTO Y 20-40 cm.

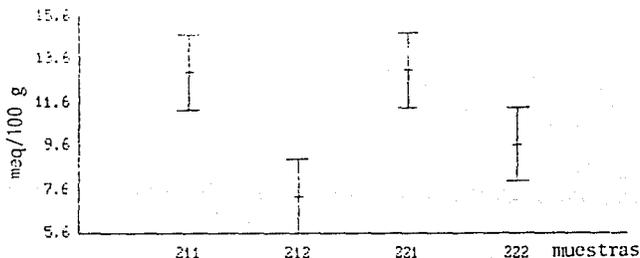


FIGURA I.18 SEGUNDO PUNTO DE MUESTREO. VALORES MEDIOS Y DESVIACION TIPO INTERNA DEL CALCIO DE LOS SUELOS RECUPERADOS CON EL LICOR ACIDO. 211= SUELO COMPACTO Y 0-20 cm, 212=SUELO COMPACTO Y 20-40 cm, 221= SUELO SUELTO Y 0-20 cm Y 222= SUELO SUELTO Y 20-40 cm.

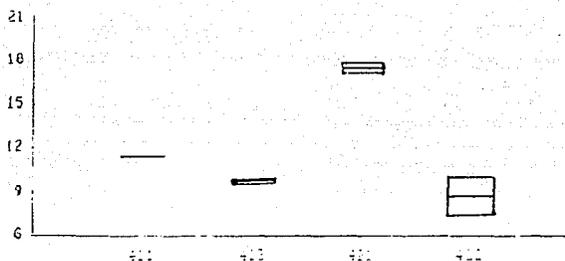


FIGURA I.19 CUARTO PUNTO DE MUESTREO. VALORES MEDIOS Y DESVIACION TIPO INTERNA DEL CALCIO DE LOS SUELOS RECUPERADOS CON EL LICOR ACIDO. 411= SUELO COMPACTO Y 0-20 cm, 412=SUELO COMPACTO Y 20-40 cm, 421= SUELO SUELTO Y 0-20 cm Y 422= SUELO SUELTO Y 20-40 cm.

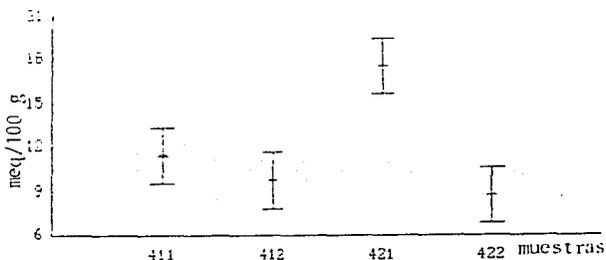


FIGURA I.20 CUARTO PUNTO DE MUESTREO. VALORES MEDIOS Y DESVIACION TIPO GENERAL DEL CALCIO DE LOS SUELOS RECUPERADOS CON EL LICOR ACIDO. 411= SUELO COMPACTO Y 0-20 cm, 412=SUELO COMPACTO Y 20-40 cm, 421= SUELO SUELTO Y 0-20 cm Y 422= SUELO SUELTO Y 20-40 cm.

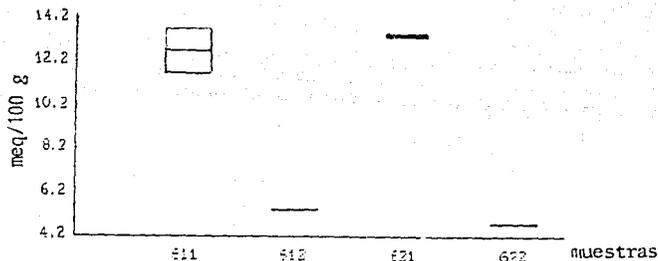


FIGURA I.21 SEXTO PUNTO DE MUESTREO. VALORES MEDIOS Y DESVIACION TIPO INTERNA DEL CALCIO DE LOS SUELOS RECUPERADOS CON EL LICOR ACIDO. 611= SUELO COMPACTO Y 0-20 cm, 612=SUELO COMPACTO Y 20-40 cm, 621= SUELO SUELTO Y 0-20 cm Y 622= SUELO SUELTO Y 20-40 cm.

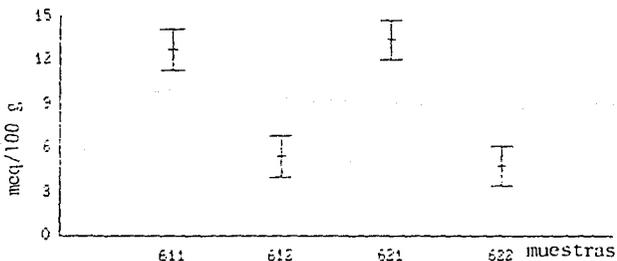


FIGURA I.22 SEXTO PUNTO DE MUESTREO. VALORES MEDIOS Y DESVIACION TIPO GENERAL DEL CALCIO DE LOS SUELOS RECUPERADOS CON EL LICOR ACIDO. 611= SUELO COMPACTO Y 0-20 cm, 612=SUELO COMPACTO Y 20-40 cm, 621= SUELO SUELTO Y 0-20 cm Y 622= SUELO SUELTO Y 20-40 cm.

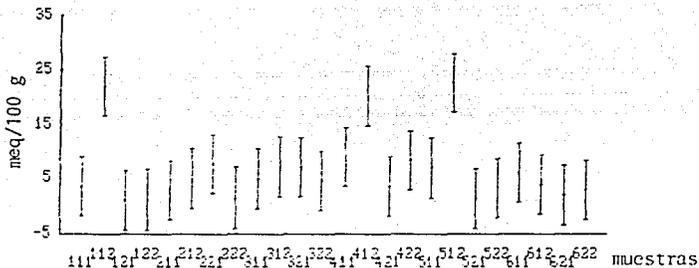


FIGURA I.24 VALORES MEDIOS Y SU DESVIACION TIPO GENERAL DEL SODIO INTERCAMBIABLE DE LOS SUELOS RECUPERADOS POR PUNTO DE MUESTREO (1,2,3,4,5, y 6) POR TRATAMIENTO AL SUELO (1= compactos y 2= sueltos) Y POR PROFUNDIDAD (1= 0-20 y 2= 20-40 cm).

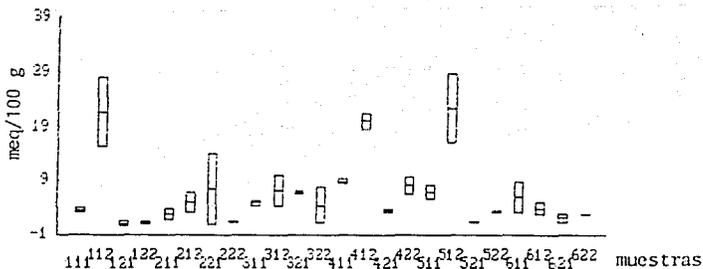


FIGURA I.23 VALORES MEDIOS Y SU DESVIACION TIPO INTERNA DEL SODIO INTERCAMBIABLE DE LOS SUELOS RECUPERADOS POR PUNTO DE MUESTREO (1,2,3,4,5, y 6) POR TRATAMIENTO AL SUELO (1= compactos y 2= sueltos) Y POR PROFUNDIDAD (1= 0-20 y 2= 20-40 cm).

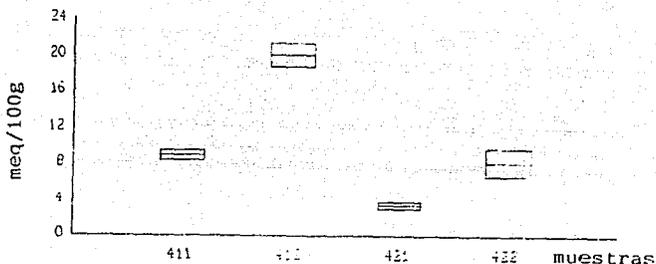


FIGURA I.25 CUARTO PUNTO DE MUESTREO. VALORES MEDIOS Y DESVIACION TIPO INTERNA DEL SODIO DE LOS SUELOS RECUPERADOS CON EL LICOR ACIDO. 411= SUELO COMPACTO Y 0-20 cm, 412=SUELO COMPACTO Y 20-40 cm, 421= SUELO SUELTO Y 0-20 cm Y 422= SUELO SUELTO Y 20-40 cm.

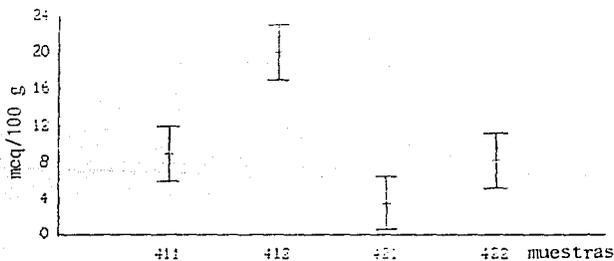


FIGURA I.26 CUARTO PUNTO DE MUESTREO. VALORES MEDIOS Y DESVIACION TIPO GENERAL DEL SODIO DE LOS SUELOS RECUPERADOS CON EL LICOR ACIDO. 411= SUELO COMPACTO Y 0-20 cm, 412=SUELO COMPACTO Y 20-40 cm, 421= SUELO SUELTO Y 0-20 cm Y 422= SUELO SUELTO Y 20-40 cm.

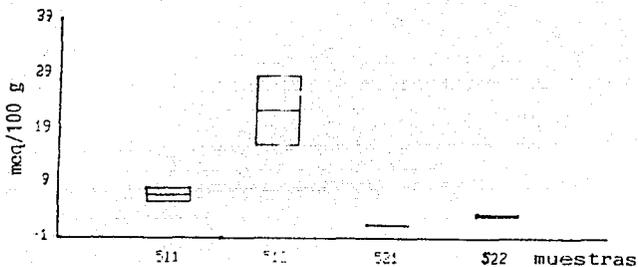


FIGURA I.27 QUINTO PUNTO DE MUESTREO. VALORES MEDIOS Y DESVIACION TIPO INTERNA DEL SODIO DE LOS SUELOS RECUPERADOS CON EL LICOR ACIDO. 511= SUELO COMPACTO Y 0-20 cm, 512=SUELO COMPACTO Y 20-40 cm, 521= SUELO SUELTO Y 0-20 cm Y 522= SUELO SUELTO Y 20-40 cm.

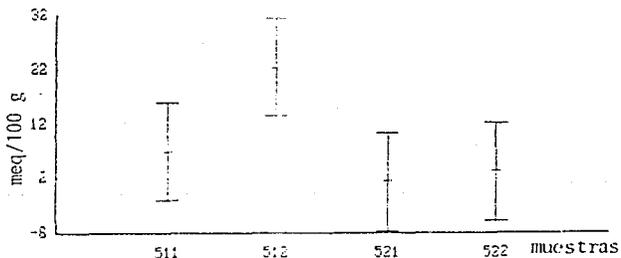


FIGURA I.28 QUINTO PUNTO DE MUESTREO. VALORES MEDIOS Y DESVIACION TIPO GENERAL DEL SODIO DE LOS SUELOS RECUPERADOS CON EL LICOR ACIDO. 511= SUELO COMPACTO Y 0-20 cm, 512=SUELO COMPACTO Y 20-40 cm, 521= SUELO SUELTO Y 0-20 cm Y 522= SUELO SUELTO Y 20-40 cm.

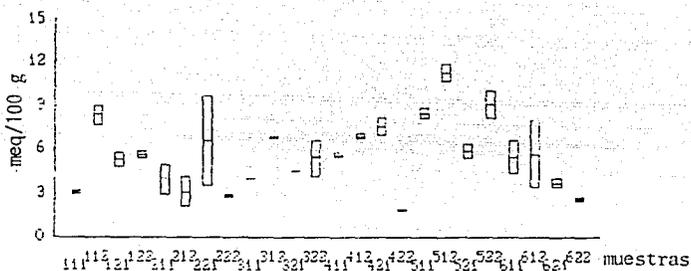


FIGURA I.29 VALORES MEDIOS Y SU DESVIACION TIPO INTERNA DEL POTASIO INTERCAMBIABLE DE LOS SUELOS RECUPERADOS POR PUNTO DE MUESTREO (1,2,3,4,5, y 6), POR TRATAMIENTO AL SUELO (1= compactos y 2= sueltos) Y POR PROFUNDIDAD (1= 0-20 y 2= 20-40 cm).

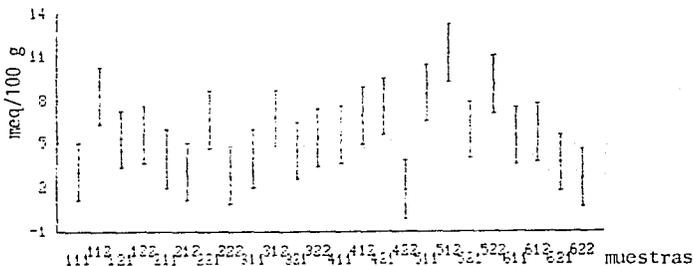


FIGURA I.30 VALORES MEDIOS Y SU DESVIACION TIPO GENERAL DEL POTASIO INTERCAMBIABLE DE LOS SUELOS RECUPERADOS POR PUNTO DE MUESTREO (1,2,3,4,5, y 6), POR TRATAMIENTO AL SUELO (1= compactos y 2= sueltos) Y POR PROFUNDIDAD (1= 0-20 y 2= 20-40 cm).

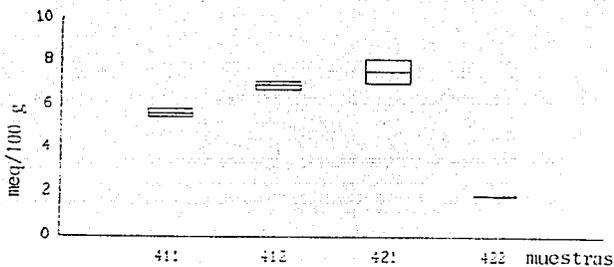


FIGURA I.31 CUARTO PUNTO DE MUESTREO. VALORES MEDIOS Y DESVIACION TIPO INTERNA DEL POTASIO DE LOS SUELOS RECUPERADOS CON EL LICOR ACIDO. 411= SUELO COMPACTO Y 0-20 cm, 412=SUELO COMPACTO Y 20-40 cm, 421= SUELO SUELTO Y 0-20 cm Y 422= SUELO SUELTO Y 20-40 cm.

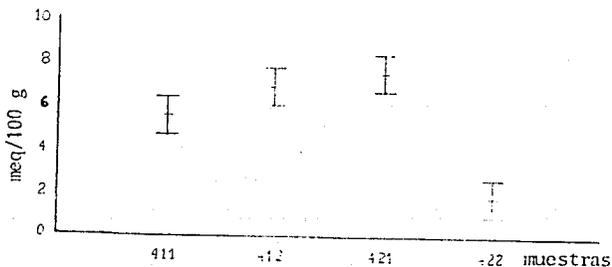


FIGURA I.32 CUARTO PUNTO DE MUESTREO. VALORES MEDIOS Y DESVIACION TIPO GENERAL DEL POTASIO DE LOS SUELOS RECUPERADOS CON EL LICOR ACIDO. 411= SUELO COMPACTO Y 0-20 cm, 412=SUELO COMPACTO Y 20-40 cm, 421= SUELO SUELTO Y 0-20 cm Y 422= SUELO SUELTO Y 20-40 cm.

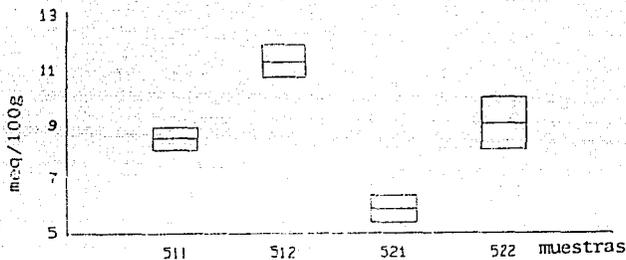


FIGURA I.33 QUINTO PUNTO DE MUESTREO. VALORES MEDIOS Y DESVIACION TIPO INTERNA DEL POTASIO DE LOS SUELOS RECUPERADOS CON EL LICOR ACIDO. 511= SUELO COMPACTO Y 0-20 cm, 512=SUELO COMPACTO Y 20-40 cm, 521= SUELO SUELTO Y 0-20 cm Y 522= SUELO SUELTO Y 20-40 cm.

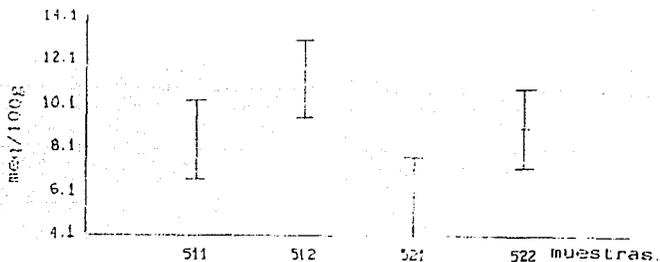


FIGURA I.34 QUINTO PUNTO DE MUESTREO. VALORES MEDIOS Y DESVIACION TIPO GENERAL DEL POTASIO DE LOS SUELOS RECUPERADOS CON EL LICOR ACIDO. 511= SUELO COMPACTO Y 0-20 cm, 512=SUELO COMPACTO Y 20-40 cm, 521= SUELO SUELTO Y 0-20 cm Y 522= SUELO SUELTO Y 20-40 cm.