

00381

17
2ef



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS
División de Estudios de Posgrado

ACUMULACION DE IONES Y DESARROLLO DE
HALOFITAS EN SUELOS SALINO-SODICOS
DEL EX-LAGO DE TEXCOCO, MEXICO

T E S I S
Que para obtener el grado académico de
DOCTOR EN CIENCIAS (BIOLOGIA)
p r e s e n t a

MIGUEL ORTIZ OLGUIN

Directores de Tesis:
DRA. NORMA E. GARCIA CALDERON
DR. DAVID FLORES ROMAN

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

273023

1999



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

ESTA TESIS LA DEDICO^o
CON MUCHO CARIÑO
A MIS HIJAS NADIA Y DIANA
A MI ESPOSA VERONICA
Y A MIS PADRES

MEXICO, 1999

AGRADECIMIENTOS

Quiero dejar asentado mi más profundo agradecimiento a las siguientes personas por su apoyo y colaboración en la realización de esta tesis:

A la Doctora Norma Eugenia García Calderón y al Doctor David Flores Román de la Universidad Nacional Autónoma de México, quienes como directores de la presente tesis dieron todo su apoyo y dedicación durante el desarrollo de la misma, además de que siempre he contado con su amistad, consejo y motivación a lo largo de toda mi carrera académica en el área de la Edafología, desde mi etapa de licenciatura.

Al Doctor Jorge Batlle-Sales, de la Universidad de Valencia, asesor de esta tesis, por brindar todos sus recursos y conocimiento para contribuir a encauzar y enriquecer este trabajo, y por su atención y apoyo para la realización de una estancia de trabajo en su Universidad.

A los miembros del jurado, los Doctores María Cristina Pérez Amador Barrón, Alma Delfina Lucía Orozco Segovia, Margarita Collazo Ortega y Jorge Gama Castro, de la Universidad Nacional Autónoma de México, por sus valiosos consejos y contribuciones que mejoraron notablemente este trabajo.

Al Maestro en Ciencias Carlos Ramírez Ayala, del Colegio de Postgraduados, por sus valiosos consejos y comentarios y por poner a mi alcance valioso material sobre geoestadística.

A la Doctora Vallivana Bordás Valls, de la Universidad de Valencia, por todo el apoyo que me brindó en mi estancia en Valencia y especialmente en la preparación del material para análisis de Rayos X.

Al siguiente personal de la Gerencia del proyecto del Lago de Texcoco, por toda la asistencia que desinteresadamente ofrecieron para lograr llevar a cabo el trabajo de campo: El Ing. Gerardo Cruickshank, Gerente, el Ing. Fernando Mercado, el Ing. Edgard Roesner, el M.V.Z. Sergio Gutiérrez, y los Ingenieros Ing. Humberto Tomé, Primitivo Ramírez, Julio Martínez, Jorge Yépez, Edgar Flores, Edgardo Morales, Juan Carlos Flores y Luz Elena Hernández.

A mi esposa, la M. en C. Blanca Verónica Juárez Jaimes por todo su apoyo y comentarios durante la realización de este trabajo.

A mis hijas Nadia Mariel y Diana Valeria por su cariño y comprensión.

A mi padre, el Ing. Miguel Ortiz Lacariere quien me ayudó considerablemente durante el arduo muestreo de campo, y a mi madre, la Sra. Dolores Olguín Domínguez, por su constante estímulo para lograr la conclusión de este trabajo.

A mis compañeros del Laboratorio de Edafología de la Facultad de Ciencias, por su ayuda y amistad: Biól. Abel Ibáñez, M. en C. Rosalía Ramos, M. en C. Italia Mercado, Dra. Laura Reyes y la Sra. Consuelo González.

A los Ingenieros Rocío Cerda y Vicente Claramunt, del Laboratorio de Edafología de la Universidad de Valencia, por su asistencia y amistad durante mi estancia de investigación en Valencia.

A la Universidad Autónoma Chapingo, por haber brindado todas las facilidades para que yo pudiera realizar mis estudios de doctorado, así como por haber apoyado mis asistencias a Valencia.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, en particular al Programa de Apoyo a Estudios de Posgrado y a la Dirección General de Intercambio Académico, por el apoyo otorgado para mis asistencias a Valencia.

A la Universidad de Valencia, España, por haber concedido el apoyo para realizar una estancia de investigación.

AGRADECIMIENTO ESPECIAL

Agradezco al Maestro en Ciencias Nicolás Aguilera Herrera, de la Facultad de Ciencias, Profesor Emérito y Doctor *Honoris Causa*, por haberme impulsado dentro de la Edafología y entregado su amistad durante todos estos años, desde que egresé de la licenciatura. Quisiera que estuviera presente para que viera el final de este trabajo.

PROLOGO	1
RESUMEN - ABSTRACT	2
1. INTRODUCCION Y OBJETIVOS	
1.1 INTRODUCCION	3
1.2 OBJETIVOS	4
2. ANTECEDENTES	
2.1. ASPECTOS GENERALES DE LOS SUELOS POR SALES	5
2.1.1. Definición	5
2.1.2. Caracterización del grado de salinidad y sodicidad	5
2.2. FORMACION DE SUELOS SALINOS, SALINO-SODICOS Y SODICOS	8
2.2.1. Factores que favorecen la acumulación de sales	8
2.2.2. Suelos salinos	9
2.2.3. Suelos salino-sódicos	9
2.2.4. Suelos sódicos	10
2.2.5. Suelos sódicos degradados	11
2.3. CLASIFICACION DE LOS SUELOS AFECTADOS POR SALES	11
2.4. TIPOS DE SALES PRESENTES EN LOS SUELOS AFECTADOS POR SALES	15
2.5. MANEJO Y RECUPERACION DE LOS SUELOS AFECTADOS POR SALES	18
2.5.1. Métodos de recuperación de suelos afectados por sales	18
2.5.1.1. RECUPERACION DE SUELOS SALINOS	18
2.5.1.2. RECUPERACION DE SUELOS SODICOS	20
2.5.1.2.1. Tipos de mejoradores	20
2.5.1.2.2. Cálculo de la necesidad de mejorador	22
2.5.1.2.3. Cálculo de la lámina para disolver el mejorador	23
2.5.1.3. RECUPERACION DE SUELOS SALINO-SODICOS	23
2.5.1.4. OTROS METODOS	24
2.5.2. Uso de halófitas para el manejo biológico de suelos afectados por sales	25
2.5.3. Algunos casos de trabajos de recuperación efectuados en la zona del lago de Texcoco	26
2.6. EFECTOS DE LA SALINIDAD DEL SUELO SOBRE EL DESARROLLO VEGETAL	28
2.6.1. Efectos osmóticos	28
2.6.2. Efectos tóxicos	29
2.6.3. Efectos nutricionales	30
2.6.4. Otros efectos	30
2.7. RESPUESTAS ADAPTATIVAS DE LAS PLANTAS A LAS CONDICIONES DE SALINIDAD DEL SUELO	31
2.7.1. Adaptaciones de las plantas a la salinidad	31
2.7.1.1. ADAPTACIONES PARA EVADIR LA SALINIDAD	31
2.7.1.1.1. Exclusión de sales a nivel de la raíz	31
2.7.1.1.2. Acumulación de sales en la raíz y retranslocación de sales del brote	32
2.7.1.1.3. Secreción de sales	32
2.7.1.1.4. Exclusión de iones del citoplasma e inactivación de los mismos	32
2.7.1.1.5. Incremento en la succulencia	32
2.7.1.2. ADAPTACIONES PARA TOLERAR LA SALINIDAD	33
2.7.1.2.1. Presencia de sistemas metabólicos resistentes o redundantes	33
2.7.1.2.2. Osmoregulación o ajuste osmótico	33
2.7.1.2.3. Adaptaciones encaminadas a evitar la pérdida de agua	34

2.8.	ASPECTOS BASICOS DE GEOESTADISTICA	35
2.8.1.	Definición	35
2.8.2.	Varianza y semivarianza	35
2.8.3.	Semivariogramas	36
2.8.4.	Kriging	40
2.8.5.	Aplicaciones de la geoestadística en suelos	41
3.	METODOLOGIA	
3.1.	DESCRIPCION GENERAL DE LA ZONA DE ESTUDIO	44
3.1.1.	Localización	44
3.1.2.	Geología	44
3.1.3.	Hidrología	48
3.1.4.	Clima	49
3.1.5.	Fauna	51
3.1.6.	Vegetación	52
3.1.6.1.	ASOCIACIONES DE HALÓFITAS	52
3.1.6.2.	ASOCIACIONES DE HIDRÓFITAS	54
3.1.6.3.	ESPECIES INTRODUCIDAS	54
3.1.7.	Suelos	55
3.1.7.1.	TAXONOMÍA DE LOS SUELOS DE LA ZONA	55
3.1.7.2.	COMPOSICIÓN DEL SUELO	56
3.1.7.3.	SALINIDAD Y SODICIDAD	57
3.2.	MATERIALES Y METODOS	58
3.2.1.	Determinación de la variación espacial y temporal de la salinidad en un perfil de suelo	58
3.2.2.	Análisis de la distribución espacial y temporal de la salinidad en la capa superficial del suelo	61
3.2.3.	Determinación de la producción de biomasa y acumulación de sodio y potasio de halófitas	63
3.2.4.	Mejoramiento del suelo	63
3.2.5.	Establecimiento de halófitas	68
3.2.6.	Análisis de difracción de rayos X	70
3.2.7.	Microscopía electrónica	72
3.2.8.	Resumen	72
4.	RESULTADOS Y DISCUSION	
4.1.	CARACTERISTICAS DEL SUELO Y VARIACION MENSUAL DE LA SALINIDADEN UN PERFIL	75
4.1.1.	Análisis físico y químico del perfil	75
4.1.2.	Variación mensual de la salinidad	83
4.1.2.1.	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA Y PH	83
4.1.2.2.	CATIONES SOLUBLES	85
4.1.2.3.	RAS Y PSI	89
4.1.2.4.	ANIONES SOLUBLES	90
4.2.	ANALISIS GEOESTADISTICO DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA SALINIDAD	101
4.2.1.	Semivariogramas	101
4.2.2.	Kriging	107
4.2.2.1.	CONDUCTIVIDAD ELECTRICA	107
4.2.2.2.	pH	107
4.2.2.3.	SODIO	110
4.2.2.4.	POTASIO	111
4.2.2.5.	CALCIO	112
4.2.2.6.	MAGNESIO	113

4.2.2.7. RAS	114
4.2.2.8. PSI	115
4.2.2.9. CLORUROS	116
4.2.2.10. CARBONATOS	117
4.2.2.11. BICARBONATOS	118
4.2.2.12. SULFATOS	118
4.2.3. Efecto de la vegetación	119
4.3. PRODUCCION DE BIOMASA Y ACUMULACION DE SODIO Y POTASIO DE HALOFITAS	162
4.3.1. <i>Distichlis spicata</i>	163
4.3.2. <i>Sporobolus pyramidatus</i>	165
4.3.3. <i>Suaeda torreyana</i>	166
4.3.4. Relación entre las variables analizadas y los parámetros edáficos	168
4.4. MEJORAMIENTO DEL SUELO	181
4.5. ESTABLECIMIENTO DE HALOFITAS	186
4.6. ANALISIS DE DIFRACCION DE RAYOS X Y MICROSCOPIA ELECTRONICA	190
4.6.1. Suelo total (polvo desorientado)	192
4.6.2. Fracción arcillosa orientada	193
4.6.3. Microscopia electrónica	194
5.0 CONCLUSIONES	205
LITERATURA CITADA	210
ANEXOS	223
Anexo A	224
Anexo B	236
Anexo C	254
Anexo D	257
Anexo E	261

PROLOGO

Dentro de la Ciencia del Suelo, el problema de la salinidad es uno de los temas que han sido sujetos a mayor número de estudios, incluso desde el siglo pasado. Cada año es posible encontrar docenas de artículos científicos que aparecen en las distintas revistas especializadas sobre edafología, agronomía, fisiología vegetal, ecología, y muchas otras, lo cual en parte revela que la salinidad es un tema que puede ser estudiado desde numerosos puntos de vista. Además, en el mundo anualmente tienen lugar al menos uno o dos encuentros científicos especializados sobre el tema, independientemente de secciones dedicadas a la salinidad en reuniones sobre temas más generales como irrigación, desertización, etc. Cada año se publican cuatro o cinco libros dedicados al tema. Con tantas contribuciones, surge la pregunta ¿porqué se ha llevado a cabo el presente trabajo? La realidad es que la salinidad de los suelos es un problema que no tiene aún una solución a la vista. A pesar de todos los logros alcanzados, actualmente nos encontramos en una posición incómoda, ya que las tierras cultivables y las aguas dulces de nuestro planeta están disminuyendo rápidamente antes las necesidades de una población cada día mas grande, y estamos expuestos a enfrentar graves carencias en el futuro a menos de que seamos capaces de encontrar alternativas viables a corto plazo. Y sin embargo, la gran mayoría de la gente no se percata de que la salinidad de los suelos es un problema que tiene un gran impacto en su vida, y de que este impacto será mayor en el futuro.

En comparación con otros países como Israel, la India o los Estados Unidos, en México los estudios sobre salinidad son relativamente escasos. Carecemos de mucha información básica sobre las características de nuestros suelos, y muchas veces tratamos de resolver sus problemas imponiéndoles soluciones traídas del extranjero, con resultados generalmente decepcionantes. Necesitamos realizar nuestros propios estudios, y proponer nuestras propias soluciones. Es en este contexto donde queda englobado el presente trabajo.

RESUMEN

El área del antiguo lago de Texcoco, México, fue sujeta a desecación desde el siglo pasado, para prevenir inundaciones de la Ciudad de México. Sin embargo, la desecación y las características geológicas del área condujeron a la aparición de suelos con niveles de sales solubles y sodio intercambiable extremadamente elevados, lo que impide en ellos el establecimiento de especies vegetales y los hace susceptibles a la erosión eólica, a pesar de la existencia de programas oficiales para cubrirlos con vegetación. En este trabajo, se llevó a cabo un estudio de la acumulación y distribución de la salinidad y sodicidad del suelo, tanto a nivel de profundidades en un perfil de suelo como a nivel superficial, y considerando los cambios que se dan a lo largo del año. El comportamiento de la distribución espacial de la salinidad y sodicidad se estudió mediante métodos geoestadísticos, generando mapas a través de la metodología conocida como kriging, con la finalidad de separar áreas con distintos grados de afectación y para los cuales se requieren distintas estrategias de manejo. Relacionando los niveles de salinidad del suelo con el desarrollo de halófitas presentes en el área, se diseñó una estrategia de mejoramiento limitado del suelo, buscando disminuir la salinidad y sodicidad sólo en un grado que permitiera el desarrollo vegetal de especies de halófitas nativas e introducidas. Con este fin se determinó que mediante el uso de polisulfuro de calcio en cantidades limitadas, es posible forestar o pastizar áreas actualmente desprovistas de vegetación.

ABSTRACT

Located near Mexico City, the area formerly occupied by the Texcoco Lake was subjected to drainage since the past century, to prevent flooding of the city; however, the progressive dessication and the geological origin of the area gave place to the appearance of highly salt and sodium affected soils. Lacking vegetation, these soils are very susceptible to wind erosion, and there are official programs to provide the area with a plant cover, using mostly native species. In this research, a study on distribution of soil salinity and sodicity was conducted, in a soil profile along the year and also in an area of 1.1 x 1.4 km using geostatistics, and obtaining maps by means of kriging in order to distinguish areas of different salinity and sodicity levels which require different kinds of reclamation methods. Relating soil salinity with halophyte development in the area, a method of limited amelioration was designed in order to reduce soil salinity and sodicity to a level acceptable by native and exotic halophytes. As a result, it was concluded that using calcium polysulphide in limited quantities, it is possible to develop a plant cover in areas which lack vegetation.

1. INTRODUCCION Y OBJETIVOS

1.1. INTRODUCCION

El principal reto al que se enfrenta la humanidad en la actualidad es el de proveer de alimentos suficientes para una población que cada día es mayor. Una solución inmediata puede consistir en ampliar las superficies de suelos agrícolas, pero esta solución no es la respuesta final, porque la superficie de suelos potencialmente incorporables a la agricultura que aún existen es ya limitada, se sujeta a un recurso más escaso aún que es el agua, y este proceso tiene un costo ambiental muy grande. Otra posibilidad, más factible, consiste en incrementar la productividad de los suelos actualmente bajo cultivo. Sin embargo, este proceso debe llevarse a cabo a través de un manejo adecuado, que conserve y aumente en los suelos su estado productivo de manera indefinida. Desafortunadamente, los suelos no son bien manejados en muchos casos, y tanto en el pasado como en el presente, grandes superficies de suelos productivos se han perdido a través de diversas formas de degradación. De ellas, una de las más importantes es la salinización. Este proceso afecta principalmente a los suelos que se encuentran sometidos a riego, que son los que producen la mayor parte de los alimentos de nuestro planeta, y miles de hectáreas se han perdido por esta causa. Si bien existe solución, la inversión que se requiere es tan grande que lo más común es que los suelos que sufren este problema sean simplemente abandonados. Incluso en el abandono, estos suelos poseen características desfavorables desde un punto de vista ambiental, y contribuyen a generar otros tipos de problemas socioeconómicos y de salud. Este proceso continúa actualmente en todo el mundo, y no existe hasta el momento una solución definitiva debido a que existen aún muchos aspectos relacionados con los procesos de salinización de los suelos que no son bien conocidos, así como tampoco acerca de la relación entre las sales del suelo y el desarrollo vegetal. El presente trabajo pretende ser una contribución al conocimiento de los suelos salinos, examinando algunas de las características dinámicas de la salinidad y sodicidad a través del método geoestadístico, aportando conceptos básicos sobre la estructura espacial de la salinidad en el suelo; asimismo, la salinidad es relacionada con el desarrollo vegetal de las especies nativas, mostrando las diferencias entre áreas ocupadas por vegetación y áreas carentes de ella, y se

propone una posibilidad de manejo práctico de estos suelos, con la meta de aportar información que contribuya a dar una solución definitiva a este serio problema.

1.2. OBJETIVOS

El presente trabajo tiene los siguientes objetivos:

- A. Evaluar los niveles de acumulación y distribución en el suelo de los iones procedentes de las sales en un perfil, tanto a nivel temporal como espacial, y contribuir al conocimiento de la composición mineralógica del perfil
- B. Determinar los patrones de distribución espacial de la salinidad y sodicidad del suelo de la zona del ex-lago de Texcoco mediante geoestadística, y evaluar el efecto que la estacionalidad tiene en ellos.
- C. A partir de la información anterior, elaborar mapas de distribución de los niveles de salinidad y sodicidad.
- D. Relacionar estos niveles con el desarrollo de las especies de halófitas presentes en la zona.
- E. Evaluar el establecimiento de halófitas en suelos sujetos a un método de mejoramiento limitado.

Las metas de este trabajo consisten en contribuir al conocimiento de la dinámica espacial y temporal de la salinidad del suelo, evaluando el uso de geoestadística, y establecer una metodología que permita determinar, para la zona, las áreas susceptibles de ser sujetas a plantaciones directamente, y las áreas en donde se requiere llevar a cabo algún tipo de trabajo de mejoramiento.

2. ANTECEDENTES

2.1. ASPECTOS GENERALES DE LOS SUELOS AFECTADOS POR SALES

2.1.1. Definición

Dentro del término “suelos afectados por sales” se incluyen dos conceptos diferentes pero íntimamente relacionados en su origen, y frecuentemente se les encuentra juntos. El primero es el de la salinidad de los suelos. Se conoce en general como suelos salinos a aquéllos que presentan una elevada concentración de sales solubles, en un grado tal que puede afectar al crecimiento de las plantas. El segundo es el de la sodicidad de los suelos. Los suelos sódicos se definen como aquéllos que presentan una elevada proporción de sodio en estado intercambiable, en un grado tal que afecta las propiedades del suelo (Richards, 1954; Szabolcs, 1989).

Todos los suelos presentan siempre una cierta cantidad de sales solubles y de sodio intercambiable, pero la presencia en exceso de cualquiera de éstos es nocivo para el desarrollo vegetal. En el caso de las sales, el exceso provoca una pérdida en la capacidad de absorción de agua por parte de las plantas, y diversos problemas de toxicidad cuando los iones producto de su disociación se acumulan en las células. Por este motivo, las sales más importantes en la manifestación de este problema son las de mayor solubilidad (Strogonov, 1964). En el caso del sodio intercambiable, si se presenta en una proporción elevada con respecto a los demás cationes intercambiables del suelo, provoca un fenómeno de dispersión de las partículas coloidales que lleva a una pérdida en la permeabilidad y conductividad hidráulica del suelo, con lo cual se crean condiciones de saturación de humedad, inundación o encharcamiento y anaerobiosis, los cuales a su vez afectan negativamente el desarrollo vegetal (Bresler *et al.*, 1982).

2.1.2. Caracterización del grado de salinidad y sodicidad

La metodología más extendida en la actualidad para determinar el grado de salinidad de los suelos se basa en la medición de la conductividad eléctrica de un extracto acuoso obtenido del suelo (Bresler *et al.*, 1982; Tanji, 1992). Esta metodología se basa en que la presencia de sales solubles en una solución, incrementa su capacidad para conducir la corriente eléctrica. Sin embargo, la conductividad eléctrica depende del tipo de sales

presentes, y como en un suelo o en las aguas naturales se tiene una mezcla de distintos tipos de sales, no es posible establecer una relación directa entre la conductividad eléctrica y la concentración de sales en estos casos. Por ello, la determinación de la conductividad eléctrica de un suelo o agua permite estimar, pero no medir, la concentración de sales disueltas; a mayor conductividad, mayor concentración de sales, y viceversa (Wilcox, 1947).

Para el caso de los suelos y aguas, la conductividad eléctrica se expresa en unidades llamadas dS m^{-1} (decisiemens · metro⁻¹). Dentro de un rango de 1 a 4 dS m^{-1} , un dS m^{-1} es aproximadamente igual a 640 partes por millón de sales disueltas (Richards, 1954). Desde la primera mitad de este siglo se observó que cuando el suelo alcanzaba un contenido de sales igual o superior al 0.2% con respecto al peso seco del suelo, la mayoría de los cultivos agrícolas comenzaban a tener afectación en su rendimiento, con lo cual se estableció inicialmente este límite como el valor que define a un suelo salino (Sigmond, 1938). Sin embargo, posteriormente se propuso realizar las mediciones de conductividad eléctrica en un extracto de una pasta de suelo que era llevada a condiciones de saturación con agua destilada, y de la cual se obtenía el extracto (llamado extracto de saturación) mediante vacío; se estableció entonces el valor de 4 dS m^{-1} , medido de esta manera, como el nivel de conductividad eléctrica que define a los suelos salinos (Richards, 1954; Abdel y Mounir, 1964). Una conductividad eléctrica de 4 dS m^{-1} equivale a 2560 partes por millón de sales, o sea 0.2%, con lo que se observa correspondencia entre esta forma de definir numéricamente a los suelos salinos y la anterior.

Hay que señalar, sin embargo, que estos valores deben ser considerados como arbitrarios, ya que existen muchos casos de plantas sensibles que se ven afectadas por las sales aún cuando la conductividad eléctrica del suelo esté muy por debajo de estos valores. Por ejemplo, muchas leguminosas reducen su rendimiento notablemente en suelos que presentan una conductividad eléctrica de tan sólo 1 dS m^{-1} , como el frijol (Maas, 1986).

En el caso de la sodicidad, la metodología lógica a seguir para determinar el porcentaje de sodio intercambiable del suelo consiste en extraerlo, cuantificarlo, y relacionarlo con el valor de la capacidad de intercambio catiónico. Sin embargo, si bien existen métodos establecidos para llevar a cabo este proceso, la realidad es que la separación del sodio

intercambiable del soluble es muy difícil, particularmente en los suelos con altos niveles de sales (Tanji, 1992), por lo que los resultados obtenidos de esta manera frecuentemente son erróneos, al encontrarse porcentajes de sodio intercambiable superiores al 100%, lo cual no es posible .

Una metodología alternativa para determinar el porcentaje de sodio intercambiable de los suelos se basa en los aspectos teóricos del intercambio catiónico, a partir de los cuales es posible establecer una relación entre el porcentaje de sodio intercambiable y la relación de adsorción de sodio (RAS) del suelo. La RAS se define como:

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

donde las concentraciones de los cationes Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} se determinan en el extracto de saturación y se expresan en milimoles por litro (si las concentraciones de los cationes se expresan en miliequivalentes por litro, $(Ca^{2+}+Mg^{2+})$ se sustituye por $(Ca^{2+}+Mg^{2+})/2$). Una vez calculada la RAS, el porcentaje de sodio intercambiable del suelo (PSI) se obtiene a través de la ecuación siguiente (Richards, 1954; Bresler *et al.*, 1982):

$$PSI = \frac{100(0.01475RAS - 0.0126)}{1 + (0.01475RAS - 0.0126)}$$

Se ha observado de manera general que cuando en los suelos se alcanza un PSI de 15 se comienza a manifestar el fenómeno de dispersión de coloides, por lo cual se ha establecido este valor como el límite que define a los suelos sódicos (Richards, 1954). Sin embargo, como el cálculo del PSI a través de la ecuación arriba señalada se ha popularizado, se tiende también a definir a los suelos sódicos como aquéllos que presentan un valor de RAS mayor o igual a 13 (Ghassemi *et al.*, 1995), ya que este valor a través de la ecuación anterior, nos da un valor de PSI de 15.

Debe notarse que, al igual que ocurre para el caso de los suelos salinos, estos valores no deben ser tomados como definitivos ya que existen muchos suelos, particularmente los más arcillosos, donde el fenómeno de dispersión de coloides se presenta con valores de PSI muy por debajo de 15; en algunos casos, se han reportado suelos que se dispersan tan sólo con un PSI de 3 (Sumner, 1993).

2.2. FORMACION DE SUELOS SALINOS, SALINO-SODICOS Y SODICOS

2.2.1. Factores que favorecen la acumulación de sales

Todos los suelos se encuentran sujetos a la llegada de sales provenientes de distintas fuentes, o bien a la génesis *in situ* de diversas sales. Sin embargo, en todos los suelos existen también pérdidas de sales, de tal manera que los suelos afectados por sales se van a encontrar sólo en sitios donde existan condiciones que favorezcan la acumulación sobre la remoción de las sales (Aceves, 1989).

A nivel de grandes áreas, las condiciones que favorecen la acumulación de sales en los suelos son fundamentalmente de dos tipos, climáticas y topográficas (Basilevich, 1970). En el primer caso, la acumulación de sales solubles en los suelos se da en sitios donde exista una escasa precipitación y una elevada evaporación, lo cual impide el lavado natural de las sales del suelo y favorece su concentración en la solución del suelo. Es por este motivo que es muy común encontrar suelos afectados por sales en zonas áridas y semiáridas, y en cambio es raro encontrarlos en zonas de alta precipitación como las regiones tropicales, ya que la lluvia lava las sales que pudieran llegar al suelo.

Por otro lado, la acumulación de sales se ve favorecida topográficamente en sitios bajos del terreno, donde tienden a acumularse las aguas que escurren de grandes áreas y que disuelven y arrastran consigo grandes cantidades de sales en el proceso; este fenómeno se da con mayor intensidad cuando se presentan cuencas de tipo endorreico, carentes de drenaje natural.

Asimismo, pueden presentarse suelos afectados por sales en otros casos en los cuales exista una influencia particularmente intensa de alguna fuente de sales; por ejemplo, en áreas costeras, donde los suelos pueden estar expuestos a invasiones o intrusiones directas del agua de mar, o en áreas interiores de los continentes que se encuentren en contacto

directo con depósitos fósiles o con aguas que tengan un elevado grado de mineralización (Waisel, 1972).

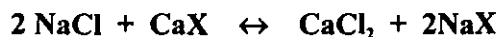
2.2.2. Suelos salinos

Si en un suelo existen condiciones favorables para la acumulación de sales, el suelo se convertirá en un suelo salino. A este proceso de acumulación de sales se le denomina salinización del suelo y puede ser relativamente lento o rápido, dependiendo de la tasa de acumulación de sales en el suelo. En un principio, las sales que llegan y que pueden ser de diversos tipos permanecen en solución. Sin embargo, con el paso del tiempo y el incremento en la concentración de la solución del suelo, las sales de menor solubilidad tenderán a precipitarse, como es el caso de los carbonatos y bicarbonatos de calcio y magnesio, así como el sulfato de calcio, permaneciendo en solución sales de mayor solubilidad como los cloruros y sulfatos de sodio y magnesio, y el carbonato de sodio. Se da así un cambio en las proporciones relativas de cationes, tendiendo a dominar el sodio, por su mayor abundancia y movilidad, aunque al dominar sales de tipo neutro, como el cloruro y el sulfato de sodio, el pH del suelo mantiene valores cercanos a la neutralidad o a una ligera alcalinidad (Basilevich, 1970). Por otro lado, la elevada concentración de sales mantiene a los coloides del suelo en un estado de agregación, con lo cual el suelo mantiene una buena permeabilidad, aún cuando el drenaje de la zona pueda ser muy reducido o inexistente.

2.2.3. Suelos salino-sódicos

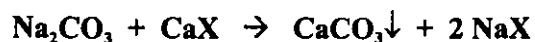
El incremento en la concentración de sales del suelo, con la consiguiente disminución en los contenidos relativos de calcio y magnesio en solución, y el aumento de sodio, tiende a iniciar un fenómeno de intercambio catiónico en el cual el sodio empieza a ser adsorbido en mayor proporción por los coloides del suelo, iniciándose un incremento en el porcentaje de sodio intercambiable, que conduce a que el suelo salino se transforme en salino-sódico. El proceso se conoce con el nombre de sodificación, alcalinización o solonetización (Szabolcs, 1989), y es favorecido en parte por el aumento en la concentración total de la solución del suelo, lo que se explica por el principio de valencia-dilución (Aceves, 1979) que señala que, al incrementarse la concentración de la solución del suelo los cationes de menor

valencia tienden a desplazar de la fase intercambiable a los cationes de mayor valencia, y viceversa. Sin embargo, las sales neutras de sodio, como el cloruro de sodio, no provocan un incremento muy marcado en el porcentaje de sodio intercambiable. Considérese la reacción siguiente, donde los cationes en estado intercambiable se representan con una X:



En esta reacción, tanto el cloruro de sodio como el cloruro de calcio formados son sales muy solubles, lo cual permite que la reacción sea reversible. Esto tiene como consecuencia que, una vez alcanzado el equilibrio, ya no se formará más sodio intercambiable.

Por otra parte, el incremento más notable en el porcentaje de sodio intercambiable se da cuando aparece en el suelo el carbonato de sodio, ya que esta sal provoca una mayor tasa de sustitución de los cationes divalentes por el sodio. Esto se ejemplifica con la siguiente reacción de intercambio:



En esta reacción, el carbonato de calcio formado se precipita, con lo cual el equilibrio de la reacción se desplaza hacia la derecha, y esto quiere decir que, mientras más carbonato de sodio aparezca en el suelo, mayor será el incremento en el contenido de sodio intercambiable. Adicionalmente, el carbonato de sodio es una sal alcalina, ya que mediante hidrólisis forma un ácido débil y una base fuerte, con lo cual provoca la elevación en el pH del suelo. De este modo, el carbonato de sodio es la sal responsable de la aparición del fenómeno de sodicidad en los suelos (Basilevich, 1970; Aceves, 1979).

Un elevado porcentaje de sodio intercambiable favorece la dispersión de las partículas coloidales del suelo, pero una alta concentración de sales tiene el efecto contrario, de tal modo que en los suelos salino-sódicos, los coloides se mantienen agregados y con ello se conserva la permeabilidad del suelo (FAO/UNESCO, 1973).

2.2.4. Suelos sódicos

Los suelos salino-sódicos constituyen la etapa más frecuente y estable en la evolución de los suelos afectados por sales. Si las condiciones que favorecieron en un principio la acumulación de sales persisten, el suelo no sufrirá otros cambios más que un incremento en

la salinidad. Sin embargo, si estas condiciones llegan a cambiar, ya sea por cambios en las condiciones climáticas o topográficas se da una pérdida de sales del suelo, el suelo salino sódico se transforma en un suelo sódico. El proceso se denomina desalinización, y va a implicar profundos cambios en las características del suelo. En primer lugar, al reducirse la concentración de sales del suelo, el efecto que provocaba en la agregación de las partículas coloidales desaparece, y estas partículas sufren una intensa dispersión, lo cual provoca una reducción de los espacios porosos del suelo y una pérdida en la permeabilidad y aereación del suelo, fenómeno más marcado en suelos con altos contenidos de coloides, como los suelos arcillosos. Por otro lado, el pH puede aumentar considerablemente, llegándose a alcanzar valores de 10, 11 o aún más (Basilevich, 1970).

2.2.5. Suelos sódicos degradados

Si las condiciones de lixiviación y pérdida de sales que llevaron a la formación de un suelo sódico persisten, el suelo puede sufrir un proceso más, denominado degradación o solotización del suelo. En este caso, parte del sodio intercambiable del suelo sufre hidrólisis, siendo sustituido el sodio por hidrógeno, y formándose hidróxido de sodio. Con este fenómeno el suelo continúa siendo sódico, pero se incrementa el porcentaje de hidrógeno intercambiable. Si el hidróxido de sodio formado es lavado, parte del hidrógeno intercambiable pasa a la fase soluble, con lo cual se da un aumento en la concentración de iones hidrógeno, y por lo tanto una disminución del pH. Entonces, se presenta el caso de un suelo sódico que sin embargo presenta un pH ácido. A este tipo de suelo se le conoce como suelo sódico degradado, y corresponde al denominado solodi (Sigmond, 1938; Joffe, 1949; Richards, 1954).

2.3. CLASIFICACION DE LOS SUELOS AFECTADOS POR SALES

Los suelos afectados por sales han sido clasificados de diferentes maneras por distintos autores. Por ejemplo, Sigmond (1938) introdujo los términos solonchak y solonetz, para referirse, en el primer caso, a los suelos salinos y en el segundo a los suelos sódicos, aunque en realidad describió todo un proceso y no sólo la existencia de sales o sodio en el suelo, de modo que en la actualidad no puede considerarse que cualquier suelo que tenga un exceso

de sales sea un solonchak, ni que un suelo con alto contenido de sodio intercambiable sea un solonetz. En Norteamérica, Hilgard (1906) a su vez introdujo los términos de suelos de álcali blanco, para referirse a los suelos salinos, y de álcali negro, para los sódicos, aludiendo a que en ambos casos se trata de suelos con pH alcalino, con la diferencia de la coloración de las costras que se presentan en la superficie del suelo, al menos durante la estación seca del año.

En la actualidad, la clasificación más común que se utiliza para los suelos afectados por sales es la propuesta por el Laboratorio de Salinidad del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América (Richards, 1954). Se requiere de la determinación de la conductividad eléctrica (CE) de un extracto obtenido por vacío de una pasta saturada del suelo, expresada a una temperatura de 25 °C, y del porcentaje de sodio intercambiable (PSI) del suelo, el cual se calcula a través de la determinación de la relación de adsorción de sodio (RAS) en el mismo extracto, de acuerdo con la ecuación señalada en el apartado anterior. De esta manera, los suelos se clasifican en cuatro categorías posibles:

Categoría	CE (dS·m ⁻¹)	PSI
Salinos	≥ 4	< 15
Salino-sódicos	≥ 4	≥ 15
Sódicos	< 4	≥ 15
No salinos no sódicos	< 4	< 15

A pesar de que data del año 1954, esta clasificación continúa teniendo una amplia aceptación, aunque en la actualidad, es común sustituir el valor de PSI de 15 por el de una RAS de 13.

Ya se ha señalado que los valores que definen los grupos anteriores se basaron en la respuesta promedio de los suelos y los cultivos agrícolas a la salinidad y sodicidad; sin embargo, en virtud de que existen cultivos sensibles a la salinidad que pueden verse afectados por niveles menores de sales, y que hay suelos que sufren problemas de dispersión a valores de PSI muy bajos, se ha propuesto reducir estos valores límites a la mitad (Massoud, 1971), denominando salinos a los suelos con CE a partir de 2, y sódicos a los suelos con PSI superior a 7.

Con fines de manejo agrícola, Aceves (1979) presenta una clasificación donde agrupa a los suelos salinos y sódicos en cuatro categorías cada uno, considerando el grado de salinidad y sodicidad y su efecto sobre el rendimiento de los cultivos agrícolas en general:

Suelos salinos	Características
Ligeramente salinos	CE 2 - 4 dS m ⁻¹ . Sólo cultivos muy sensibles se ven afectados en su rendimiento.
Medianamente salinos	CE 4 - 8 dS m ⁻¹ . La mayoría de los cultivos agrícolas comunes reducen su rendimiento; los sensibles prácticamente no se desarrollan.
Fuertemente salinos	CE 8 - 12 dS m ⁻¹ . Sólo unos pocos cultivos agrícolas muy tolerantes pueden producir cosechas redituables
Extremadamente salinos	CE > 12 dS m ⁻¹ . No son aptos para cultivos agrícolas convencionales. Sin embargo, es posible el cultivo de halófitas.
Suelos sódicos	
Ligeramente sódicos	PSI 7 - 15. El rendimiento de los cultivos agrícolas se reduce de 20 hasta 40%, sobre todo en suelos arcillosos.
Medianamente sódicos	PSI 15 - 20. El rendimiento de los cultivos se reduce de 40 a 60 %.
Fuertemente sódicos	PSI 20 - 30. El rendimiento de los cultivos se reduce de 60 a 80%.
Extremadamente sódicos	PSI > 30. El rendimiento de los cultivos agrícolas se reduce en más del 80%.

Szabolcs (1989), ha propuesto un esquema diferente de clasificación, basado en las características y tipos de sales presentes en los suelos; de este modo, agrupa a los suelos afectados por sales en cinco categorías:

Categoría	Características
Salinos	Presentan elevadas acumulaciones de sales solubles neutras de sodio, como el cloruro o el sulfato de sodio.
Alcalinos	Poseen altos contenidos de carbonato de sodio, los cuales propician la elevación del PSI.
Yesosos	Poseen altas cantidades de sulfato de calcio (yeso);
Acidos de sulfatos	Son suelos salinos costeros ácidos por acumulación de sulfuro de fierro que se oxida y provoca la formación de ácido sulfúrico.
Magnésicos	Grandes cantidades de sales de magnesio, las cuales son particularmente tóxicas para las plantas; se presentan generalmente en áreas costeras, donde el origen de las sales de magnesio es marino.

De las categorías anteriores, cabe señalar que los suelos yesosos anteriormente no se incluían como salinos debido a la baja solubilidad del yeso, por lo cual no se consideraba que esta sal pudiera ejercer efectos nocivos sobre las plantas; sin embargo, estudios más recientes señalan la presencia de efectos tóxicos en ciertas plantas debidos al yeso, razón por la cual ahora se incluye a estos suelos dentro de los suelos afectados por sales (Szabolcs, 1989). Los suelos ácidos de sulfatos, por su parte, son comunes en zonas costeras de todo el mundo, aunque son particularmente importantes en los países del sureste asiático, donde afectan notablemente la producción de arroz en las zonas de deltas de ríos. En cuanto a los suelos magnésicos, se trata de suelos poco estudiados; en México, Ortiz (1994) encontró este tipo de suelos en la costa del estado de Sinaloa, presentando una conductividad eléctrica incluso superior a 200 dS m⁻¹, y soportando una comunidad de *Allenrolfea occidentalis*.

Basilevich (1970) clasifica a los suelos afectados por sales en las siguientes categorías, en función de los tipos de acumulaciones salinas presentes en el suelo, así como en su composición iónica:

Tipo de Acumulación salina	Relación del contenido de aniones, en mg equiv.		
	Cl/SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻ /Cl	HCO ₃ ⁻ /SO ₄ ²⁻
Cloruro	≥2.5	---	---
Sulfato-cloruro	1-2.5	---	---
Cloruro-sulfato	0.2-1	---	---
Soda-sulfato-cloruro	>1	<1	<1
Soda-cloruro-sulfato	<1	<1	<1
Soda-cloruro	>1	<1	>1
Soda-sulfato	<1	>1	<1
Cloruro-soda	>1	>1	>1
Sulfato-soda	<1	>1	>1
Sulfato-cloruro-bicarbonato	---	>1	>1
Bicarbonato	---	---	---

2.4. TIPOS DE SALES PRESENTES EN LOS SUELOS AFECTADOS POR SALES

En los suelos afectados por sales puede existir una gran variedad de sales; sin embargo, en función de su importancia, tanto por su amplia distribución y abundancia, así como por su toxicidad sobre las plantas, se puede afirmar que son cinco las sales principales que definen a los suelos salinos y sódicos (FAO/UNESCO, 1973; Ortiz, 1991b; Ortega, 1993):

a. **Cloruro de sodio.** El cloruro de sodio es la sal más abundante en los suelos afectados por sales, llegando comúnmente a representar más del 50% del total de sales presentes en solución. Esta abundancia en los suelos salinos se debe en parte a su gran solubilidad, que es de alrededor de 317 g L^{-1} a 20°C y no cambia significativamente de este valor en un amplio rango de temperatura, lo que le permite disolverse fácilmente del mineral que la contiene, la halita, así como permanecer en solución en aguas de escurrimiento, y ser transportada hasta sitios donde el agua se acumule. Es igualmente proveniente en grandes cantidades del agua marina, la que en la actualidad se considera su principal fuente a nivel global (Waisel, 1972), y de aguas subterráneas que estén en contacto con depósitos fósiles de sal. Su alta solubilidad ejerce efectos osmóticos considerables sobre las plantas, y la elevada movilidad de los iones Na^+ y Cl^- permite que sean absorbidos por éstas, acumulándose en las células y provocando efectos de tipo tóxico. Puede esperarse que los cultivos no se desarrollen bien en suelos que contengan cloruro de sodio en proporciones superiores a 0.1 % con respecto al peso seco del suelo, y es muy común encontrar suelos con contenidos de 2 a 5 % que son completamente inútiles para la agricultura.

b. **Sulfato de sodio.** El sulfato de sodio es un constituyente común de los suelos afectados por sales, y también se le encuentra abundantemente en aguas subterráneas. Si bien su toxicidad es menor que la del cloruro de sodio, su solubilidad tiene la característica de variar mucho con la temperatura: a 10°C es de 90 g L^{-1} , a 20°C es de 185 g L^{-1} , y a 30°C es de 373 g L^{-1} . Por esta razón su papel en los suelos es muy complejo; en la estación calurosa del año su solubilidad se ve incrementada y se mueve a la superficie del suelo junto con las sales más solubles. Al llegar la estación fría, esta sal disminuye su solubilidad y tiende a precipitarse en forma de grandes cristales transparentes de mirabilita ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{ H}_2\text{O}$), los cuales tienden a separar las partículas del suelo. Cuando la temperatura vuelve a aumentar, si el contenido de humedad del suelo es bajo, la mirabilita fácilmente se

deshidrata y se forma un polvo blanco, la tenardita (Na_2SO_4 anhidro). Al desaparecer los cristales de mirabilita, queda en el suelo una gran cantidad de espacios vacíos que dan al suelo una consistencia esponjosa en la superficie, fenómeno que se nota comúnmente en suelos salinos que tengan costras en su superficie, las cuales llegan a estar constituidas por sulfato de sodio hasta en un 30 %. Al caminar en ellas, el pie se hunde varios centímetros en el suelo seco.

c. Cloruro de magnesio. El cloruro de magnesio no tiende a acumularse en grandes cantidades en los suelos, a excepción de los suelos magnésicos, y aún así esto se da en condiciones de salinidad extrema. Posee una gran solubilidad, de 410 g L^{-1} a 20°C , y es una sal excepcionalmente tóxica para la mayoría de los cultivos. Es una sal higroscópica y absorbe la humedad atmosférica rápidamente, con lo cual los cristales se disuelven y forman una solución muy concentrada; debido a ello, los suelos que contienen cloruro de magnesio en grandes cantidades permanecen húmedos largo tiempo después de la última lluvia o riego.

d. Sulfato de magnesio. El sulfato de magnesio es una sal típica de los suelos salinos, y aunque es raro que se presente en abundancia, es común que represente porcentajes moderados del total de sales del suelo. Esta sal tiene una solubilidad elevada, del orden de 262 g L^{-1} a 20°C , y tiene un alto grado de toxicidad para los cultivos agrícolas, aunque menor que el del cloruro de magnesio. La gran solubilidad de minerales magnésicos como la epsomita ($\text{Mg SO}_4 \cdot 7 \text{ H}_2\text{O}$) origina la presencia de esta sal por el simple contacto del mineral con el agua.

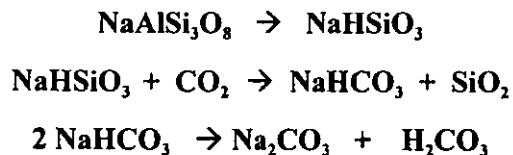
e. Carbonato de sodio. El carbonato de sodio es una sal muy común en suelos y aguas, donde puede llegar a acumularse en cantidades considerables, cristalizando en los suelos con diferentes proporciones de agua ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10 \text{ H}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), así como en combinación con el bicarbonato ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3 \cdot 10 \text{ H}_2\text{O}$). Es altamente soluble (178 g L^{-1} a 20°C), y como resultado de su hidrólisis, en la que forma ácido carbónico e hidróxido de sodio, provoca una aguda elevación del pH del suelo. Adicionalmente, su presencia en la solución del suelo induce a un incremento en el porcentaje de sodio intercambiable (ver apartado 2.2.3.), con lo cual provoca una pérdida en la permeabilidad del suelo. Por último, es muy tóxica para la mayoría de las plantas. El carbonato de sodio se

asocia frecuentemente al bicarbonato, el cual es menos alcalino y tóxico debido a que se encuentra parcialmente neutralizado por ácido carbónico

La tendencia del carbonato a convertirse en bicarbonato se ve acentuada con el incremento del contenido de ácido carbónico en la solución y la atmósfera del suelo (o sea, un aumento en la presión parcial de CO₂), así como con una disminución del pH (Lindsay, 1979).

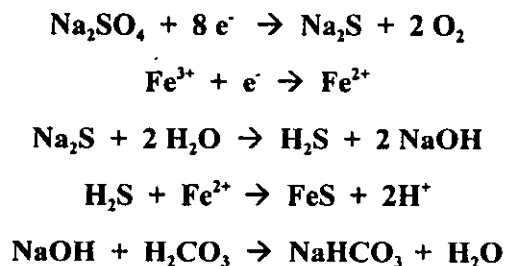
El carbonato de sodio puede originarse de diversas maneras (Koshevnikov, 1974; Aceves, 1979). Las vías de formación más aceptadas en la actualidad son tres:

A partir del intemperismo de minerales ricos en sodio como la albita, como ilustran las siguientes reacciones:



Este proceso es tal vez el más importante por la cantidad de carbonato de sodio que se puede formar (Whittig y Janitzky, 1963), pero es difícil de evaluar, lo que llevó a que algunos autores lo menospreciaran en el pasado.

2. A partir de una reducción biológica de sulfato de calcio. Para que este proceso pueda tener lugar, se requiere la presencia de condiciones anaeróbicas, cantidades suficientes de materia orgánica disponible como fuente de energía para los microorganismos, y de cantidades moderadas de sulfato de calcio. Una de las bacterias responsables de este proceso es *Desulfovibrio desulfuricans*. Los microorganismos reducen sulfatos a sulfuros y hierro férrico a la forma ferrosa. A partir de los sulfuros se produce ácido sulfhídrico e hidróxido de sodio y éste reacciona con ácido carbónico formando bicarbonato de sodio, el cual puede luego ser convertido a carbonato:



Este medio de formación de carbonato de sodio no es muy común, pero adquiere importancia en suelos inundados. Por ejemplo, se ha detectado en el área del ex-Lago de Texcoco y otros sitios de México (Santana *et al.*, 1989).

3. Por la descomposición de tejidos vegetales de plantas natrófilas, que acumulan grandes cantidades de sodio en sus tejidos. Durante la mineralización de la materia orgánica procedente de ellas, el exceso de sodio absorbido se combina con el bióxido de carbono, formándose carbonato de sodio. Este proceso es importante en áreas de desiertos y estepas (Basilevich, 1970).

2.5. MANEJO Y RECUPERACION DE LOS SUELOS AFECTADOS POR SALES

Los suelos afectados por sales limitan considerablemente la actividad agrícola. Aunque es posible bajo ciertas condiciones poder obtener cosechas redituables de ellos, en la mayor parte de los casos cuando se alcanzan niveles elevados de salinidad, los suelos se convierten en inútiles para la actividad agrícola. En este caso, se tienen dos alternativas: una, continuar cultivando el suelo, haciendo uso de halófitas, de lo que se hablará más adelante, y la otra es proceder a eliminar del suelo los excesos de sales y sodio intercambiable, proceso al cual se conoce comúnmente como recuperación.

2.5.1. Métodos de recuperación de suelos afectados por sales

2.5.1.1. RECUPERACION DE SUELOS SALINOS

Los suelos que presentan altos niveles de sales exclusivamente, pueden ser recuperados a base de lavados con agua. Puesto que las sales que constituyen el problema se caracterizan por su alta solubilidad, el aplicar agua al suelo permitiendo que ésta se infiltre, disuelve las sales y las transporta a capas más profundas o de preferencia a un sistema de drenaje previamente existente en el suelo. El volumen de agua a aplicar depende de la cantidad de sales que se desea desplazar, aunque por lo general puede decirse que este volumen tiende a ser muy grande, por lo cual en muchas ocasiones el lavado de los suelos resulta impracticable.

La forma de aplicación más común de la lámina de lavado es por inundación, fraccionándola en láminas más pequeñas de 15 o 20 cm., las cuales deben aplicarse

sucesivamente, evitando que la superficie del suelo bajo lavado quede al descubierto entre fracción y fracción. Para esto, el suelo debe dividirse mediante la construcción de bordos, en melgas de un tamaño que puede ser de hasta 1 hectárea, según la nivelación y pendiente del terreno. Sin embargo, también es posible aplicar la lámina por aspersión (Aceves, 1981).

Existen varias ecuaciones que han sido propuestas por diversos autores para calcular la lámina de lavado. De ellas, las más conocidas son las siguientes:

Autores y referencias	Ecuación
Rozov (FAO/UNESCO, 1973; Aceves, 1981; González, 1982;)	$N = \Pi - m + n\Pi$
Kovda (Elgabali, 1971; FAO/UNESCO, 1973)	$Y = n1 \cdot n2 \cdot n3 \cdot 400x \pm 100$
Volobúyev (Volobúyev, 1959; FAO/UNESCO, 1973)	$N = \log \left(\frac{Si}{So} \right)^{\alpha} \quad N = \alpha \cdot \log \frac{Si}{So}$
Volobúyev modificada (De la Peña, 1982)	$L = \alpha \cdot \log \frac{CEi}{CEf} \quad L = \log \left(\frac{CEi}{CEf} \right)^{\alpha}$
Sejas (Aceves, 1979)	$L = 9.0(p)^{0.75} \left(\frac{70 - CER}{CEi - CER} \right)^{0.3} \log \frac{CEi}{CEf}$
Panin (González, 1982; López, 1988)	$Qa = \Pi K \ln \frac{Si}{So}$
Safonov (López, 1988)	$Qa = 28.6 \cdot \Pi \left(\frac{Si - So}{Si} \right)^{2.7}$
Safonov, Galinskiy y Mitronkin (González, 1982)	$Q = \left(\frac{100}{a} \right)^{\frac{1}{b}} \cdot \Pi \left(\frac{Si - So}{Si} \right)^{\frac{1}{b}}$
Legostayev (González, 1982):	$N = 100hj \left[(Bo - B) + \frac{Si - S_2}{k} \right]$
Musichuc (FAO/UNESCO, 1973)	$N = M - m + \frac{H - h}{Zo} \cdot 10000$
Pizarro (Pizarro, 1978)	$Ccc = Ci + [C^0cc - \alpha Ci] e^{-\frac{rR}{hc}}$
Hoffman (Oster <i>et al.</i> , 1989; Tanji, 1990)	$\frac{C}{Co} = \frac{k}{\left(\frac{D}{Ds} \right)}$

Una descripción detallada de estas ecuaciones se muestra en el anexo D.

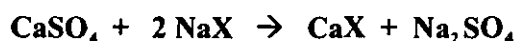
2.5.1.2. RECUPERACION DE SUELOS SODICOS

En el caso de los suelos sódicos, un lavado no es suficiente para lograr la recuperación del suelo, ya que el sodio se encuentra retenido en un estado intercambiable por las partículas coloidales del suelo, por lo que es necesario primero separarlo de ellas; el intercambio se logra mediante la adición de compuestos químicos conocidos como mejoradores, los cuales aportan calcio soluble al suelo, o bien solubilizan el calcio precipitado existente en el suelo (Oster *et al.*, 1989).

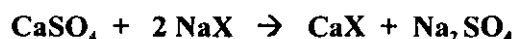
2.5.1.2.1. Tipos de mejoradores.

Si bien existe una gran variedad de mejoradores reportados en la literatura, los más comunes se citan a continuación (Richards, 1954):

a. Yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$). El sulfato de calcio hidratado o yeso es un mejorador ampliamente utilizado por ser económico, de fácil obtención y de fácil manejo. Su desventaja principal radica en su baja solubilidad (1.9 g L^{-1} a $20 \text{ }^\circ\text{C}$), por lo cual se requieren de grandes cantidades de agua para disolverlo. La reacción por la cual reduce el PSI es la siguiente:



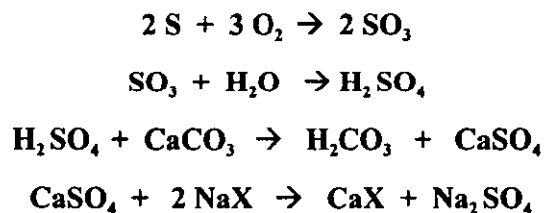
b. Acido sulfúrico ($\text{H}_2 \text{SO}_4$). El ácido sulfúrico no es muy utilizado por las dificultades que representa su transporte y aplicación, en virtud de tratarse de un compuesto corrosivo y peligroso, así como por su mayor costo. Sin embargo, al ser soluble en agua, puede aplicarse junto disuelto en la lámina de lavado, aunque esta lámina es igualmente grande, pues forma yeso y es al yeso formado al que se debe disolver. Por otro lado, una ventaja de este compuesto es que acidifica al suelo, lo cual es ventajoso para los suelos sódicos. Las reacciones por las cuales actúa es la siguiente:



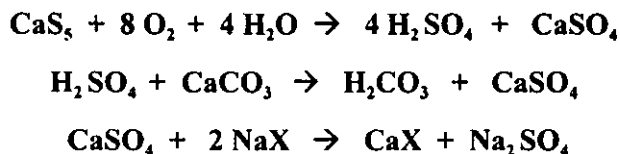
Como se aprecia, este mejorador, al igual que otros, lo que hace es disolver el carbonato de calcio previamente presente en el suelo, formando yeso, el cual es el que lleva a cabo la reacción de intercambio. Al mismo tiempo esto señala un importante requerimiento para el

uso de este tipo de mejoradores: el suelo debe contener previamente cantidades suficientes de carbonato de calcio.

c. Azufre (S). El azufre elemental no es soluble en agua. Sin embargo, si se aplica al suelo y éste se mantiene húmedo, sufre una reacción de oxidación en la que participan microorganismos, y forma ácido sulfúrico, el cual reacciona entonces con el carbonato de calcio para formar sulfato de calcio. Su principal ventaja radica en ser el más económico de todos los mejoradores, ya que si bien por peso puede ser más caro que el yeso, se requiere de aproximadamente 5 veces más yeso que azufre para lograr el mismo grado de recuperación de un suelo. Por otro lado, su principal desventaja consiste en el prolongado tiempo que se requiere para que la reacción de oxidación tenga lugar, que puede ser desde varias semanas hasta algunos meses, dependiendo para esto del grado de molienda, de la humedad del suelo y de la presencia de las bacterias. Las reacciones de mejoramiento del suelo mediante el azufre son las siguientes:



d. Polisulfuro de Calcio (CaS₅). El polisulfuro de calcio es un líquido de color naranja, y generalmente se presenta con una pureza de 24 a 30 % de azufre. Produce azufre elemental al ser aplicado al suelo, teniendo las mismas ventajas y desventajas y modo de acción que los mejoradores anteriores. Las reacciones que lleva a cabo en el suelo son:



e. Cloruro de calcio (CaCl₂). El cloruro de calcio no es un mejorador muy utilizado por considerarse que es muy costoso, pero en realidad existe abundantemente como subproducto de varias ramas de la industria. Su principal ventaja radica en su elevada solubilidad (410 g L⁻¹ a 20 °C), de manera que se requiere una cantidad de agua mucho menor. La reacción mediante la cual actúa es la siguiente:



Otros mejoradores. Existen otros compuestos que pueden ser utilizados como mejoradores, aunque su uso, particularmente en México, no se da en condiciones prácticas, debido a causas como su elevado costo o baja disponibilidad; dentro de ellos se incluyen al sulfato ferroso, al sulfato de aluminio, al sulfuro de fierro, al ácido clorhídrico, al ácido nítrico y varios más que tengan la capacidad de aportar de alguna manera calcio soluble al suelo.

2.5.1.2.2. Cálculo de la necesidad de mejorador.

La cantidad de mejorador necesaria para disminuir el PSI de un suelo de un valor inicial PSI_i a un valor final o deseado PSI_f , puede determinarse conociendo la cantidad de miliequivalentes de sodio que representa el cambio de PSI_i a PSI_f , y aplicando al suelo la misma cantidad de miliequivalentes de calcio (en forma de mejorador). La necesidad de mejorador por hectárea, Nm , puede calcularse de la siguiente manera:

$$Nm = \frac{(PSI_i - PSI_f)}{100} \cdot CIC \cdot P \cdot D \cdot 100000$$

donde Nm es la cantidad de miliequivalentes de calcio aportados por el mejorador que deben aplicarse a una hectárea para reducir el valor de PSI de PSI_i a PSI_f , y a la profundidad P ; CIC es la capacidad de intercambio catiónico en $\text{cmol}(+) \text{ kg}$, P es la profundidad a recuperar en metros, y D es la densidad aparente en kg/m^3 . Una vez conocido Nm , la cantidad de mejorador a aplicar dependerá de la cantidad de miliequivalentes de calcio soluble que el mejorador sea capaz de aportar. La siguiente tabla muestra la cantidad de miliequivalentes de calcio aportados al suelo por una tonelada de los distintos mejoradores:

mejorador	pureza	meq. de calcio/tonelada
Yeso	100%	11.6×10^6
Acido sulfúrico	100%	20.4×10^6
Azufre	100%	62.5×10^6
Polisulfuro de calcio	24% de S	17.4×10^6
Cloruro de calcio	100%	18.6×10^6

2.5.1.2.3. Cálculo de la lámina para disolver el mejorador.

La acción de los mejoradores mencionados depende de que sean disueltos en su totalidad para que pueda efectuarse la reacción de intercambio entre calcio y sodio. De esta manera, es necesario calcular la cantidad de agua necesaria para tal fin. En el caso del yeso y de todos los mejoradores que basan su acción en él, la solubilidad se calcula con base a la solubilidad de éste.

Entonces, la lámina Lm puede determinarse de la siguiente forma:

$$Lm = \frac{Nm}{15}$$

donde Lm es la lámina para disolver el mejorador, en litros por hectárea (si Lm se divide entre 10^5 nos da la altura de la lámina en centímetros), y 15 es la solubilidad del yeso en mmol L^{-1} .

2.5.1.3. RECUPERACION DE SUELOS SALINO-SODICOS

La forma más común para recuperar los suelos salino-sódicos consiste en realizar un proceso similar al anterior, ya que los suelos salino sódicos requieren tanto de una lámina que lave el exceso de sales, como de la aplicación de mejoradores, con la diferencia de que en este caso la lámina aplicada tendrá tanto la función de lavar sales, como la de disolver el mejorador. Por este motivo, para determinar la lámina adecuada es necesario calcular tanto la lámina para lavar sales como la lámina para disolver el mejorador, como se ha descrito en los apartados anteriores, y comparando las dos, se aplica la que sea mayor (Aceves, 1981).

Un método alternativo para recuperar suelos salino-sódicos consiste en la utilización de mezclas de agua salada con agua dulce (Reeve y Bower, 1960). En este caso, el suelo es sometido a lavado con una serie de láminas que, comenzando por la de mayor concentración, van siendo diluidas progresivamente hasta terminar con agua dulce. Este método se basa en el principio de valencia-dilución (apartado 2.2.3), donde, al irse diluyendo progresivamente la concentración de la solución del suelo, el sodio intercambiable va siendo desplazado por cationes de mayor valencia, con lo cual disminuye

tanto la salinidad como la sodicidad del suelo. Para lograr este objetivo, el suelo debe mantenerse permeable durante todo el proceso, por lo cual es muy importante el cálculo adecuado de la concentración de las diluciones, ya que si la diferencia de concentración entre una lámina de lavado y la siguiente, más diluida, fuera muy grande, el suelo salino sódico corre el riesgo de perder demasiadas sales y convertirse en sódico. La concentración mínima de cada dilución se conoce como concentración crítica, y debe determinarse experimentalmente para cada caso (Doering y Reeve, 1965; Tanji, 1990)

2.5.1.4. OTROS METODOS

Existen otras metodologías que permiten la recuperación de los suelos afectados por sales; dentro de ellas pueden señalarse:

a. Métodos físicos. Consisten en buscar el mejoramiento de las propiedades físicas del suelo para incrementar la permeabilidad y el lavado de las sales. Dentro de ellos se incluyen los métodos de labranza como barbecho profundo o subsoleo (Alcántara, 1986), así como la utilización de compuestos químicos denominados acondicionadores de suelo y cuyo objetivo es también el mejoramiento de la estructura (Levy, 1989). Mención aparte merecen otros métodos menos prácticos como la inversión del perfil, o el acondicionamiento de la textura que, a pesar de sus dificultades reales, se siguen evaluando por algunos autores (Aceves, 1981).

b. Métodos biológicos. Incluyen la aplicación de materia orgánica al suelo (estiércoles, compostas, abonos verdes) los cuales mejoran las características del suelo a través del mejoramiento de la estructura, así como de la neutralización del pH e incremento de la fertilidad del suelo. En algunos casos, se ha demostrado que es posible recuperar un suelo salino por completo a través de la aplicación durante varios años, de 200-300 ton ha⁻¹ año⁻¹ (Aceves, 1981).

El uso de halófitas, que será tratado más adelante, también puede considerarse dentro de esta categoría.

c. Existen algunos otros métodos que podrían servir para la recuperación de suelos afectados por sales, pero que no se utilizan debido a su elevado costo. Dentro de ellos se incluyen a los métodos eléctricos, que se basan en la utilización de intensas y prolongadas

aplicaciones de corriente eléctrica a los suelos, lo que favorece la rápida eliminación de las sales y el sodio intercambiable, así como los métodos térmicos, que se basan en dar un fuerte calentamiento al suelo para reducir el PSI (Tyurin *et al.*, 1967).

2.5.2. Uso de halófitas para el manejo biológico de suelos afectados por sales

En muchos casos la recuperación de los suelos afectados por sales es impracticable debido a los altos costos que implica, por lo cual estos suelos son comúnmente abandonados. Sin embargo, es posible incorporar a la agricultura muchos suelos afectados por sales haciendo uso de plantas que sean tolerantes a altos niveles de salinidad, como son las halófitas. Existe una gran cantidad de especies de halófitas que pueden ser cultivadas con diferentes fines (Hollaender, 1979; Barret-Lennard *et al.*, 1986). Incluso, en muchos casos es posible utilizar aguas salobres y aun agua de mar para su cultivo. A continuación se citan algunos ejemplos (National Research Council, 1990):

a. Alimentación humana. En este rubro pueden incluirse a:

Grano: *Distichlis palmeri*, *Zostera marina*, *Pennisetum typhoides*, *Chenopodium quinoa*, *Kosteletzkya virginica*, *Terminalia catappa*, y *Salicornia bigelovii*.

Tubérculos y follaje: *Eleocharis dulcis*, *Batis maritima*, *Portulaca oleracea*, *Atriplex* spp., *Mesembryanthemum crystallinum*, *Suaeda maritima*, *Suaeda torreyana*, *Kochia scoparia*.

Frutos: *Salvadora persica*, *Lycium fremontii*, *Santalum acuminatum*, *Coccoloba uvifera*.

b. Combustible. *Prosopis juliflora*, *Eucalyptus* spp., *Casuarina equisetifolia*, *Rhizophora* spp., *Avicennia* spp., *Melaleuca* spp., *Tamarix* spp., *Acacia* spp.

c. Forraje. *Leptochloa fusca*, *Paspalum vaginatum*, *Salsola* spp., *Distichlis spicata*, *Echinochloa* spp., *Spartina alterniflora*., *Sporobolus airoides*, *Puccinellia* spp., *Mairena* spp., *Salicornia bigelovii*, *Kochia* spp., *Atriplex* spp., y muchas otras.

d. Fibras y otros productos: *Pandanus fascicularis* (aceites esenciales), *Seshania hispinosa* (gomas), *Grindelia* spp. (terpenos), *Phragmites australis*, *Juncus* spp., *Hibiscus* spp. (fibras).

e. Usos ornamentales. Muchas especies tienen gran valor ornamental, y un caso especial es su uso en las áreas verdes de zonas hoteleras ubicadas junto al mar. Pueden citarse como

ejemplos de México, a: *Tournefortia gnaphalodes*, *Suriana maritima*, *Sesuvium portulacastrum*, *Scaveola plumeri* y muchas otras (Ortiz *et al.*, 1994).

f. Protección del suelo. Varias especies rastreras y arbóreas pueden utilizarse para proveer a los suelos de una cubierta o de cortinas rompevientos que los protejan de la erosión eólica. Tal es el caso en México de *Tamarix chinensis* y *T. aphylla*. (Pedraza, 1988).

2.5.3. Algunos casos de trabajos de recuperación efectuados en la zona del lago de Texcoco.

El área del ex-lago de Texcoco se caracteriza por sus elevados niveles de sales y sodio intercambiable, los cuales limitan seriamente el desarrollo vegetal, con lo cual su uso agrícola se ve impedido por completo. Este problema fue reconocido desde principios de siglo. Fue así que Barragán (1913) diseñó un programa de mejoramiento en el que el área central del entonces aún lago de Texcoco serviría como un reservorio para almacenar los excedentes de agua de la región y así evitar problemas de inundación a la Ciudad de México, y las áreas adyacentes serían sujetas a lavados para reducir la salinidad y utilizarlas para la agricultura. Este plan no se llevó a cabo, y la progresiva desecación de la zona trajo otros problemas, ya que la superficie desnuda de los suelos queda expuesta a la erosión eólica, con problemas de tolveneras y enfermedades pulmonares para los habitantes de la Ciudad de México. Por este motivo, en años recientes se han intensificado los trabajos de investigación tendientes a recuperar o mejorar las características de estos suelos. Dentro de los trabajos más relevantes, pueden señalarse a los siguientes:

Juárez (1967), en un estudio utilizando tambos de 200 litros, aplicó diferentes láminas de lavado y una dosis de 56 ton/ha de yeso, incorporado en los primeros 15 cm. de profundidad, encontrando que con esto aumentaba la velocidad de infiltración de manera considerable.

Villaseñor (1973), en un estudio preliminar sobre la recuperación de estos suelos, concluyó que el principal problema, además de la salinidad, es la baja velocidad de infiltración, y que la adición de yeso y materia orgánica en el suelo aceleran los procesos de recuperación de estos suelos.

Mízquez (1973), probó la eficiencia de algunos mejoradores químicos: yeso, ácido sulfúrico y azufre, en niveles de 100, 150 y 200% de la necesidad de mejorador calculada. Encontró que la mayor eficiencia en la recuperación se da con el yeso, seguido por el ácido sulfúrico y por último el azufre, utilizando una lámina de 70 cm.

Ureña (1975), probó yeso, azufre, polisulfuro de calcio, bioazufre y basura, encontrando que podía desplazar el 90% de las sales solubles del suelo aplicando una lámina de 120 cm. en intervalos de 10 cm. cada dos semanas, y no encontró diferencias significativas entre los mejoradores utilizados.

Ortega (1976), estudió el efecto de diferentes concentraciones de láminas de lavado sobre la permeabilidad, y estableció una ecuación para determinar la concentración crítica de las aguas para evitar pérdida en la permeabilidad del suelo.

Sejas (1978), evaluó el uso de diluciones graduales, y eventualmente propuso una ecuación para calcular las láminas de lavado para los suelos de esta zona, derivada de la de Volobúyev.

Díaz (1982), determinó en el invernadero la velocidad de oxidación del azufre en suelos con diferentes texturas y con niveles medios de sodio intercambiable, hallando una clara relación con el tamaño de las poblaciones bacterianas y el tiempo de incubación de las mismas.

Becerra (1983), utilizó azufre para la recuperación de estos suelos, con varias dosis y tiempos de oxidación; encontró un marcado efecto el azufre sobre el pH y el desplazamiento de sales en los primeros 40 cm. de profundidad.

Anguiano (1984), evaluó la utilización del método de diluciones graduales, utilizando agua del manto freático en combinación con aguas negras, encontrando que la eficiencia de los lavados aumenta al disminuir el número de diluciones, pero esto afecta adversamente al PSI.

Caraveo (1984), estudió el efecto del ácido sulfúrico en diferentes concentraciones, en el desplazamiento de sales de estos suelos, encontrando que es más efectivo en altas concentraciones.

Jaime (1985), comparó el azufre con el cloruro de calcio, encontrando un mayor efecto benéfico en la recuperación de los suelos, al aplicar combinaciones de cloruro de calcio y

azufre, en comparación con la aplicación de estos mejoradores por separado.

Velázquez y Ortiz (1990), compararon varios mejoradores del grupo del yeso con varios mejoradores del grupo del cloruro de calcio, encontrando que el ácido clorhídrico, cloruro de calcio y sulfato ferroso, tuvieron mayores efectos en el abatimiento del pH del suelo; que el cloruro férrico, cloruro ferroso, ácido sulfúrico y cloruro de calcio, tuvieron los mayores efectos en la disminución de la conductividad eléctrica; y que el sulfato de calcio, el sulfato férrico, el sulfato ferroso y el cloruro férrico tuvieron los mayores efectos en la disminución del PSI.

Valenzuela (1991), evaluó distintas formas de aplicación de láminas de lavado en combinación con la aplicación de yeso, para la recuperación de los suelos, encontrando que lo más efectivo es fraccionar la lámina en 3 partes, aplicadas cada 21 días.

Sandoval (1993), estudió el efecto de la aplicación de yeso sobre la distribución de sales en las capas inferiores del suelo, encontrando un grado de recuperación directamente proporcional a la profundidad de mezclado del yeso y a la cantidad de lámina aplicada.

Vargas y Ortiz (1993), estudiaron el desplazamiento de sales llevado a cabo a través de aplicación de yeso y cloruro de calcio, encontrando que el desplazamiento de las sales es secuencial, y es más efectivo utilizando yeso.

2.6. EFECTOS DE LA SALINIDAD DEL SUELO SOBRE EL DESARROLLO VEGETAL

Los altos niveles de sales y iones presentes en los suelos afectados por sales provocan distintos tipos de efectos negativos sobre el desarrollo de las plantas, y especialmente de los cultivos agrícolas, ocasionando una disminución en sus rendimientos. Desde hace mucho tiempo se ha establecido que las sales afectan a las plantas de tres maneras: disminuyendo su capacidad de absorción de agua, provocando toxicidad, y afectando a la nutrición (Bernstein y Hayward, 1958; Strogonov, 1964; Levitt, 1980).

2.6.1. Efectos osmóticos

La absorción de agua del suelo por parte de las plantas depende de la presencia de una serie de gradientes de potencial de agua entre el suelo y la atmósfera. Con el fin de que el

agua entre en la raíz, el potencial osmótico de ella debe ser menor (o sea, más negativo) que el del agua del suelo; así, el agua se mueve de la región de mayor potencial a la de menor potencial (Wyn Jones y Gorham, 1983). En suelos no salinos, el potencial osmótico presenta generalmente valores de entre -0.1 y -0.2 MPa; las raíces de las plantas, en cambio, presentan potenciales osmóticos de entre -0.5 y -2.0 Mpa (Jeffrey, 1987). El bajo potencial osmótico de la raíz proviene de la presencia en ella de una gran cantidad de solutos orgánicos e inorgánicos, presentes tanto en el citoplasma como en la vacuola. Sin embargo, en los suelos afectados por sales, la alta concentración de sales provoca una marcada disminución del potencial osmótico del suelo, el cual puede alcanzar comúnmente valores de -5.0 MPa o aún menores (Stewart y Ahmad, 1983), con lo cual el movimiento de agua del suelo a la raíz se ve interrumpido, e incluso puede darse una deshidratación parcial de las células de los tejidos exteriores de la raíz; la planta se ve sometida a un estrés de tipo hídrico, por lo que su desarrollo se ve fuertemente limitado y puede llegar a la muerte (Levitt, 1980). Por su naturaleza, los efectos osmóticos dependen sólo del total de la concentración de solutos, sin importar la naturaleza de éstos (Bernstein y Hayward, 1958).

2.6.2. Efectos tóxicos

Se ha observado que una solución diluida de agua de mar (que es una mezcla de sales) es menos dañina para las plantas que soluciones isoosmóticas de algunas sales individuales (Gale, 1975). Este efecto puede atribuirse a la toxicidad de los iones individuales. Los efectos tóxicos consisten en que la acumulación excesiva en los tejidos y células de iones específicos absorbidos del suelo puede provocar alteraciones en el metabolismo (Strogonov, 1964). En muchos casos esto puede deberse a que los iones interfieren con el funcionamiento de enzimas, lo cual acarrea una disminución de productos esenciales para la planta, o la acumulación de compuestos nocivos. Dentro del primer caso, puede señalarse que se da una inhibición en la síntesis de almidón, de ATP, ADN y ARN, una disminución en las tasa fotosintética, de asimilación de CO_2 , y de división celular (Waisel, 1972; Maas y Nieman, 1978; Levitt, 1980). En el segundo caso, se ha llegado a observar que se presenta una acumulación de compuestos como el amonio o el peróxido de hidrógeno (Strogonov, 1964). Los efectos tóxicos también incluyen una pérdida en la semipermeabilidad de las

membranas (Kylin y Quatrano, 1975). Los iones más tóxicos son el sodio y el cloruro, pero otros iones pueden provocar efectos específicos dependiendo de la especie de planta de que se trate; por ejemplo, el algodón es más afectado por una salinidad a base de sulfatos, que por una de cloruros (Strogonov, 1964); existe también mucha variabilidad en la manifestación de estos efectos dependiendo de factores como la edad de la planta, la concentración del ion, y aún factores externos como la humedad ambiental (Gorham, 1996).

2.6.3. Efectos nutricionales

Estos efectos consisten en que la acumulación excesiva de iones específicos provoca deficiencias nutrimentales en la planta, las cuales se presentan no por carencia del nutrimento específico en el suelo, sino porque disminuye la tasa de absorción o asimilación al darse competencia entre iones (como entre sodio y calcio, o entre sodio y potasio; Marschner, 1986; Kafkafi, 1987), o al presentarse daños a membranas que provocan cambios en la permeabilidad (Campbell y Pitman, 1971), así como al alterar la necesidad de los nutrimentos por parte de la planta (Grattan y Grieve, 1996).

2.6.4. Otros efectos

En los suelos afectados por sales los microorganismos se ven igualmente sujetos a los efectos anteriores, con lo cual se ven alterados los ciclos ecológicos en los cuales intervienen, y esto afecta de manera indirecta a las plantas. Por ejemplo, en el caso del ciclo del nitrógeno, bajo condiciones de salinidad la nitrificación y la fijación se ven disminuidas (Rankov, 1964; Laura, 1974), mientras que la desnitrificación se ve incrementada, lo que provoca una disminución del contenido de nitrógeno disponible del suelo (Gandhi y Paliwal, 1976).

En los suelos afectados por sodicidad, se presenta además una reducción en la permeabilidad del suelo, con lo que se generan condiciones de anaerobiosis, con todos los efectos negativos que esto provoca en las plantas. Todos los efectos mencionados actúan al mismo tiempo sobre las plantas, lo que puede hacer difícil distinguir entre ellos (Levitt, 1980).

2.7. RESPUESTAS ADAPTATIVAS DE LAS PLANTAS A LAS CONDICIONES DE SALINIDAD DEL SUELO

No todas las plantas se afectan de la misma manera por las condiciones de salinidad de los suelos; algunas son más tolerantes que otras, y esto incluye a los cultivos agrícolas, ya que los hay muy tolerantes a la salinidad, como el algodón, mientras que otros son sumamente sensibles, como la mayoría de las leguminosas. Incluso, existen numerosas especies vegetales que se desarrollan de manera normal en estos tipos de suelos, las cuales reciben el nombre de halófitas, en oposición a las plantas que no pueden desarrollarse en condiciones de salinidad, las cuales se denominan glicófitas (Bernstein, 1964). No existe una línea divisoria definida entre ambos tipos; así como hay glicófitas de diversos grados de tolerancia a la salinidad, hay halófitas que pueden desarrollarse en suelos no salinos. Sin embargo, se acepta en general la definición de Waisel (1972) que señala que las halófitas son plantas que crecen y completan su ciclo de vida en suelos con altos contenidos de sales que se consideran como aquéllos que presentan una conductividad eléctrica medida en el extracto de pasta de saturación de 10 dS m^{-1} o más.

2.7.1. Adaptaciones de las plantas a la salinidad

El desarrollo exitoso de las plantas bajo condiciones de salinidad depende de la presencia de una serie de adaptaciones les que permiten evadirla manteniendo bajas las concentraciones internas de sales, o tolerarla soportando altos contenidos internos de sales y sus efectos (Flowers *et al.*, 1977; Levitt, 1980; Greenway y Munns, 1980; Jacobi, 1994; Gorham, 1996).

2.7.1.1. ADAPTACIONES PARA EVADIR LA SALINIDAD

2.7.1.1.1. Exclusión de sales a nivel de la raíz.

Este mecanismo de adaptación se basa en la presencia de barreras impermeables a los iones en las raíces, como la exodermis y la endodermis, que limitan el libre paso de los iones al cilindro central, o su expulsión al suelo, con gasto de energía (transporte activo) (Flowers *et al.*, 1976).

2.7.1.1.2. Acumulación de sales en la raíz y retranslocación de sales del brote

La llegada de sales a la parte aérea de la planta, acarreadas por el flujo del agua hacia las hojas, puede ser impedida acumulando las sales en los tejidos de la raíz, sobre todo en el parénquima de la corteza, o, en el caso de las sales que alcanzan a llegar al brote, se da una retranslocación vía floema, con gasto de energía, del tallo a la raíz (Jacobi, 1994).

2.7.1.1.3. Secreción de sales

La concentración interna de sales de los tejidos de la parte aérea de la planta puede ser disminuida a través de secreción activa de las sales, por medio de las llamadas glándulas de sal, que son estructuras uni o pluricelulares localizadas a nivel de la epidermis de hojas y tallos (Thomson, 1975; Fahn, 1979). También puede incluirse en este rubro a la caída de órganos saturados de sal.

2.7.1.1.4. Exclusión de iones del citoplasma e inactivación de los mismos

La célula puede disminuir los efectos de iones como el sodio en el metabolismo, excluyéndolo del citoplasma, ya sea sacándolo de la célula, o compartimentalizándolo en la vacuola; este proceso se efectúa con gasto de energía (Jacobi, 1996). Por otro lado, se ha observado que algunos compuestos que se encuentran en plantas sujetas a estrés salino pueden ser utilizados para la inactivación del ión sulfato con el cual se conjugan, como son los flavonoides 7,3'-disulfato de luteolina, presente en *Zostera*, o el 3-sulfato de tamarixetina, presente en *Tamarix* (Harborne, 1985).

2.7.1.1.5. Incremento en la succulencia

Puede darse una disminución en la concentración interna de sales a través de un aumento en el contenido de agua de las células, lo cual conduce a la succulencia (Jacobi, 1994).

Algunos autores proponen como una estrategia de evasión que el desarrollo del ciclo de vida se dé durante la época más favorable (Crawford, 1989), por ejemplo, durante la época de lluvias, donde baja la salinidad, aunque en este caso la planta propiamente no estaría

creciendo en un suelo salino. Waisel (1972) denomina pseudohalófitas a este tipo de plantas.

2.7.1.2. ADAPTACIONES PARA TOLERAR LA SALINIDAD

2.7.1.2.1. Presencia de sistemas metabólicos resistentes o redundantes

En este caso, existe una tolerancia de las plantas a la toxicidad a través de enzimas o isozimas que no son afectadas por los iones, lo cual se ha observado, por ejemplo, con la malato deshidrogenasa, (Kylin y Quatrano, 1975; Greenway y Munns, 1980; Gorham, 1996).

2.7.1.2.2. Osmoregulación o ajuste osmótico

Este proceso permite a la planta reducir su potencial osmótico a un nivel inferior que el del suelo, con lo cual el efecto osmótico desaparece y el flujo de agua del suelo a la raíz se reestablece. De esta manera, en las halófitas es posible encontrar potenciales osmóticos sumamente negativos, del orden de -4.0 a -5.0 MPa y aún más bajo; para comparación, puede señalarse que el potencial osmótico del agua de mar es de -2.5 Mpa (Jefferies, 1981). Estos bajos potenciales osmóticos pueden lograrse acumulando sales en el interior de las células, pero en muchos casos los niveles de sales alcanzados pueden provocar toxicidad (Yeo, 1983). Por este motivo, en muchas plantas la osmoregulación se logra a través de acumular compuestos orgánicos osmóticamente activos. Dentro de estos compuestos, puede señalarse a los siguientes, y a algunas especies donde se han encontrado:

Glicinbetaina (*Atriplex patula*, *Beta maritima*, *Salicornia europaea*, *Salsola kali*, *Suaeda maritima*) (Stewart *et al.*, 1979; Jefferies, 1980; Wyn Jones, 1980; Wyn Jones y Storey, 1981).

Alaninbetaina (Plumbaginaceae) (Stewart *et al.*, 1979; Wyn Jones, 1980).

Prolinbetaina (*Medicago sativa*) (Wyn Jones, 1980).

Prolina (*Cochlearia officinalis*, *Glaux maritima*, *Juncus roemerianus*, *Medicago*, *Puccinellia maritima*, *Spergularia marina*, *Triglochin maritima*, *Triticum durum*) (Jefferies

et al., 1979; Stewart y Lee, 1974; Wyn Jones, 1980; Wyn Jones y Storey, 1981; Alarcon *et al.*, 1994; Mattioni *et al.*, 1997, Petrusa y Winicov, 1997).

Colina (*Spartina townsendii*) (Storey y Wyn Jones, 1979).

Acido S-Dimetilsulfoniopropanoico (*Spartina anglica*, *Limonium vulgare*) (Storey y Wyn Jones, 1979; Harborne, 1985).

Acido S-dimetilsulfoniopentanoico (*Diplotaxis tenuifolia*) (Harborne, 1985).

Acido β -trimetilaminopropanoico (*Limonium vulgare*) (Harborne, 1985).

Sorbitol (*Plantago maritima*, *P. coronopus*) (Jefferies, 1979; Gorham *et al.*, 1981; Harborne, 1985).

Pinitol (*Spergularia marina*, *Mesembryanthemum crystallinum*) (Harborne, 1985; Jacobi, 1994).

Varios otros compuestos osmoreguladores se han encontrado en algas, hongos y bacterias, como glicerol, glicinbetaína aldehído, γ -butirobetaína, pipercolatobetaína, sacarosa, manitol, y varios otros (Le Rudulier, 1993); también es posible que se incluyan a oligosacáridos de la familia de la rafinosa (McKersie y Leshem, 1994).

2.7.1.2.3. Adaptaciones encaminadas a evitar la pérdida de agua

En virtud de que las plantas que crecen en suelos salinos están expuestas a un estrés hídrico, son útiles y frecuentes todo tipo de adaptaciones encaminadas a conservar el agua, como reducción en el área foliar, reducción en el número de estomas por unidad de área, incremento en el grosor de la cutícula, adopción de metabolismo tipo C_3 o CAM, etc. (Poljakoff-Mayber, 1975).

Además de los utilizados en la osmoregulación, en las plantas que crecen bajo estrés de sales pueden aparecer algunos otros compuestos que podrían tener que ver con la adaptación de las plantas, pero aún se encuentran bajo estudio. Así, existe evidencia de que algunas proteínas se forman bajo estrés de sales, aunque su papel no ha sido aún aclarado; en particular, Singh *et al.* (1985) y Ho y Sachs (1989) señalan el caso de una proteína

inducida por este estrés, la cual ha sido denominada osmotina, y hallada en tabaco, tomate y soya; otra proteína denominada SRgp 24, parecida a la osmotina, en *Mesembryanthemum crystallinum* (Thomas y Bohnert, 1993; Yen *et al.*, 1994); igualmente, se han identificado otros polipéptidos inducidos por estrés salino en cebada, llamados Gs1 y Gs2 (Hurkman, 1992). Por último, Santa-Cruz *et al.* (1997) reportan que los contenidos de las poliaminas espermidina y espermina se incrementan bajo estrés salino en las hojas del tomate, y proponen que sirven para mantener el balance cationes/aniones en los tejidos.

2.8. ASPECTOS BASICOS DE GEOESTADISTICA

2.8.1. Definición

Los métodos convencionales de estadística consideran a las propiedades del suelo como variables aleatorias. Sin embargo, en geoestadística estas variables se consideran como “variables regionalizadas”. Una variable regionalizada es aquella que se encuentra distribuida espacialmente en una región, como por ejemplo un yacimiento mineral, o una propiedad edáfica (Knudsen y Kim, 1977). La geoestadística tiene como objeto de estudio la determinación espacial de las variables regionalizadas. Los primeros estudios llevados a cabo con el método geoestadístico tienen su origen en la actividad minera, habiendo tenido como objetivo inicial el conocer la distribución de yacimientos de mineral, aunque posteriormente se ha visto su utilidad en el estudio de varias propiedades de los suelos, así como de otros aspectos, como la hidrología (Samper y Carrera, 1990).

2.8.2. Varianza y semivarianza

Una de las medidas más comunes para estimar la dispersión de los valores de una población, es la estimación de la varianza, definida como:

$$\sigma^2 = \frac{\sum(Z(x) - \bar{Z})^2}{n - 1}$$

donde $Z(x)$ es el valor de la variable Z en el punto x , \bar{Z} es la media poblacional, y n el número de observaciones.

Si se consideran dos valores de la variable Z tomados en dos puntos distintos, x y $x+h$, la diferencia entre esos valores sería $[Z(x+h) - Z(x)]$. De acuerdo con la ecuación de arriba, la varianza, para estos dos valores, sería

$$\sigma^2 = \frac{[Z(x+h) - \bar{Z}]^2}{2-1} = \frac{\frac{1}{2}[(Z(x+h) - Z(x))]^2}{1} = \frac{1}{2}[Z(x+h) - Z(x)]^2$$

Si para una población se mide la varianza entre numerosos pares de datos de Z ubicados a diferentes distancias $x+h$, se tiene la semivarianza $I(h)$ de la variable Z :

$$I(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{x=1}^n [Z(x+h) - Z(x)]^2$$

donde $n(h)$ es el número de pares de puntos separados a una distancia h .

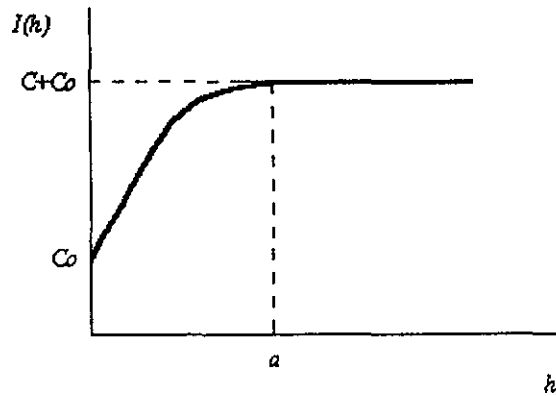
2.8.3. Semivariogramas

Cuando se grafican los valores de semivarianza $I(h)$ calculados para varios valores de distancia h , se obtiene el llamado semivariograma (también conocido como variograma). El semivariograma indica qué tan diferentes se hacen los valores de la variable Z conforme se incrementa la distancia de muestreo. Un rápido incremento de la semivarianza con la distancia, refleja la tasa de deterioro de la influencia de la variable entre puntos más y más distantes. A veces se alcanza un valor límite llamado meseta o *sill*, donde la semivarianza ya no aumenta con la distancia; en este caso, esto significa que hay una distancia a partir de la cual los valores $Z(x)$ y $Z(x+h)$ ya no tienen correlación, y esta distancia se conoce como el rango o alcance del semivariograma (Delfiner, 1979).

Cuando la correlación entre $Z(x)$ y $Z(x+h)$ desaparece, la semivarianza se hace igual a la varianza:

$$I(h) = \frac{1}{2} Var[Z(x+h) - Z(x)] = \frac{1}{2} \{Var[Z(x+h)] + Var[Z(x)]\} = \frac{2\sigma^2}{2} = \sigma^2$$

Un semivariograma típico presenta la forma siguiente:



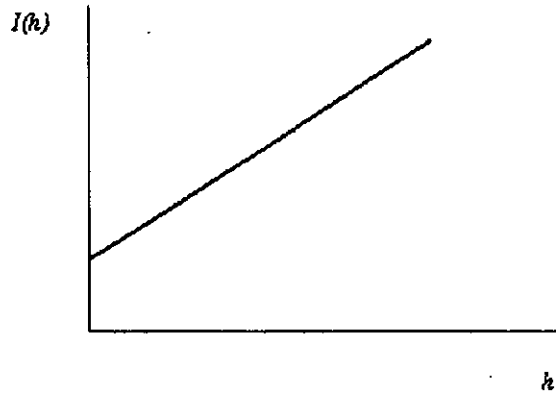
En esta gráfica, se observa que la semivarianza $I(h)$, para una distancia 0, parte inicialmente de un valor que no es 0, sino es una ordenada al origen. A este punto se le designa como C_0 , y se le denomina el “efecto nugget”, “efecto pepita” o “residuo”. A partir de este punto, $I(h)$ aumenta conforme h aumenta, hasta que se llega a la meseta, definida como $C_0 + C$, donde C es la varianza estructural y $C_0 + C$ es la varianza total (Ryel *et al.*, 1996). El valor de h donde se alcanza el valor $C_0 + C$ es el rango o alcance, a . Los valores de la variable Z que se encuentran separados entre sí por distancias menores que el rango, están correlacionados, mientras que los que se encuentran separados por distancias mayores, son independientes. Desde este punto de vista, puede considerarse que las mediciones separadas entre sí por distancias menores que el rango constituyen una misma medición, puesto que están correlacionadas (Utset, 1993). De este modo, al hacer un muestreo para caracterizar la distribución espacial de la variable, no sería necesario tomar muestras a distancias menores que el rango.

El valor asintótico de la semivarianza que es la meseta $C_0 + C$, es, como se señaló anteriormente, aproximadamente igual a la varianza; por ello $C_0 + C$ se denomina también la varianza total.

A partir de la ecuación que define a la semivarianza, se puede deducir que el valor de la semivarianza es cero cuando h , la distancia de separación, es igual a cero. Por este motivo, el semivariograma debería partir del origen. Sin embargo, como se señaló arriba, generalmente parte de una ordenada al origen C_0 , el efecto nugget. Este efecto se debe a la microestructura espacial, es decir, que un componente de la variable tiene un rango menor

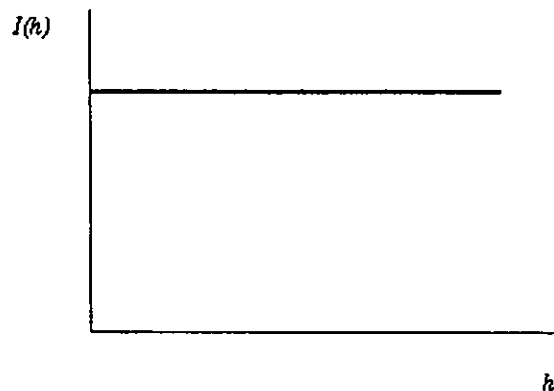
que la menor distancia computada para el semivariograma, aunque también se puede deber a errores de medición o a errores de ubicación de los sitios de muestreo. Para determinar la causa con mayor exactitud, sería necesario hacer mediciones de la variable a distancias más cortas.

Es posible que el semivariograma tenga otras formas. Por ejemplo, en la gráfica siguiente, no se observa una meseta:



En esta gráfica, la semivarianza aumenta monótonamente con la distancia, sin alcanzar la meseta. En este caso, los valores de Z se encuentran correlacionados entre sí a todas las distancias de separación analizadas, y el rango es mayor que la mayor distancia medida. Es posible que con la realización de mediciones a mayores distancias se lograra eventualmente alcanzar una meseta y definir un rango (Delfiner, 1979).

En la siguiente gráfica, la semivarianza se muestra constante para todas las distancias consideradas:



Este tipo de semivariograma se conoce como “efecto nugget puro”. Muestra que no existe estructura espacial de la variable para ninguna de las distancias de separación analizadas. Los valores son independientes para todas las distancias consideradas, y el rango es menor que la menor distancia. Es posible que si se tomaran muestras a menores distancias, se llegara a encontrar el rango.

Mientras mayor resulte ser el valor del efecto nugget C_0 con respecto al valor de la meseta $C_0 + C$, más próximo estará el semivariograma al efecto nugget puro. Es posible, entonces, utilizar el valor del porcentaje de la meseta que corresponde al efecto nugget como un criterio para evaluar la magnitud de la estructura espacial encontrada. Esta relación, $C/(C_0 + C)$, se conoce como la dependencia espacial; se define como la relación entre la varianza estructural C y la varianza total $C_0 + C$ (Ryel *et al.*, 1996), y sirve para relacionar la variabilidad de grupos de datos a pequeña escala.

Cuando se analiza la estructura espacial de una variable en dos o tres dimensiones, se puede encontrar isotropía o anisotropía en la variación de la propiedad. Si se elaboran semivariogramas en varias direcciones dentro del campo estudiado, y éstos resultan ser similares, se presenta isotropía. Sin embargo, si los semivariogramas son diferentes, entonces se presenta anisotropía. Así, si para elaborar un semivariograma se toma en cuenta sólo la separación h entre los pares de puntos, sin importar su dirección relativa, el semivariograma es isotrópico. En cambio, si se elabora un semivariograma tomando en cuenta sólo los pares de puntos que hay en una dirección, entonces el semivariograma es direccional (Delfiner, 1979).

Es posible ajustar un modelo teórico a la distribución de los puntos del semivariograma. Existen varios modelos que pueden ser utilizados con este fin, como el esférico, el exponencial, el linear, o el gaussiano; sin embargo, el modelo más utilizado es el esférico, que se define como:

$$\begin{aligned}
 I(h) &= C [1.5 h/a - 0.5 h^3/a^3] + C_0 & h \leq a \\
 I(h) &= C + C_0 & h > a \\
 I(0) &= 0
 \end{aligned}$$

El modelo esférico se da donde los valores se hacen independientes unos de otros cuando una cierta distancia denominada a , es alcanzada. Representa estructuras espaciales independientes unas de otras, pero dentro de ellas los valores están altamente correlacionados.

2.8.4. Kriging

La geoestadística cuenta con una metodología de interpolación mediante la cual, a partir de varias mediciones de una variable en puntos conocidos y del semivariograma correspondiente, ajustado a un modelo teórico, es posible estimar los valores de la variable en puntos intermedios.

Esta metodología recibe el nombre de “krigeado” o “kriging”, por su creador, el geólogo sudafricano D.G. Krige, quien lo desarrolló para estimar reservas de oro (David, 1975).

La estimación por kriging es de tipo local, pues sólo se utilizan los valores medidos más cercanos al punto a estimar. Entre las ventajas de este método se cuenta el ser un interpolador exacto; la interpolación es exacta cuando pasa realmente a través de los puntos, en lugar de cerca de ellos. Además, es insesgado, ofrece una estimación del error en que se incurre al efectuar la interpolación, y esta interpolación se efectúa minimizando la varianza del error de la estimación, por lo que se dice que el kriging es un interpolador óptimo.

La mayor exactitud con el kriging se obtiene si los valores medidos se distribuyen normalmente y la línea de regresión es una recta, y cuando el valor promedio de la variable se conoce. Sin embargo, en caso contrario, el kriging es de todas formas la mejor aproximación a las expectativas condicionales (Yates y Yates, 1990) así que pueden utilizarse datos no distribuidos normalmente. El kriging puede repetirse para todos los puntos donde se desee estimar un valor de la propiedad. De este modo, es posible estimar muchos valores a partir de unas pocas mediciones. A partir de esto se desprende una de las principales aplicaciones del kriging, que es la elaboración de mapas que muestran la distribución espacial de la variable estudiada. Además, es posible también la elaboración de mapas de que muestran la distribución del grado de error y que ayudan a la interpretación de los primeros.

Un inconveniente de esta metodología es que se requiere de un número elevado de observaciones, digamos más de 100, pero algunos autores (González, 1997) han producido mapas con sólo 20 puntos.

2.8.5. Aplicaciones de la geoestadística en suelos

Como se ha señalado, la geoestadística se desarrolló inicialmente para el estudio de yacimientos de minerales, pero muchas de las propiedades de los suelos pueden también ser consideradas como variables regionalizadas, y pueden ser estudiadas desde esta óptica.

Burgess y Webster (1980 a, b, c y 1981) han resumido los aspectos teóricos de la geoestadística aplicada al estudio de las propiedades de los suelos.

Yost *et al.* (1982 a y b) realizó un análisis geoestadístico de varias propiedades del suelo (pH, Ca, Mg, K, Si y P, encontrando que el valor del rango para estos parámetros era de 32 a 42 km., y procediendo a realizar mapas que muestran el requerimiento de fósforo del suelo, para grandes áreas.

Xu y Webster (1984) estudiaron por estas metodologías los patrones de distribución de pH y materia orgánica, en china. Concluyendo que el muestreo a distancias de 1.3 km en una cuadrícula es satisfactorio para fines de elaboración de mapas.

Warrick *et al.* (1986) realizaron una revisión de las aplicaciones de métodos geoestadísticos en la ciencia del suelo, y recopilan una serie de valores de rangos calculados para diversas variables edáficas.

Muñiz *et al.* (1991), utilizó el kriging para la elaboración de mapas de la distribución del pH, cationes intercambiables y otras propiedades de suelos dedicados al cultivo del arroz.

Jarvinen *et al.* (1993), en un muestreo superficial de un bosque de *Pinus sylvestris* basado en 107 sitios dentro de una hectárea, hallaron que la fracción de arena fina de la textura del suelo y el contenido de magnesio estaban autocorrelacionadas a 15 metros de distancia entre los sitios de muestreo, y elaboraron mapas de su distribución dentro de esta hectárea.

Utset (1993) encontró que el uso de la geoestadística permitió elaborar mapas confiables de la distribución espacial de la conductividad eléctrica, resultando más económico el muestreo basado en los parámetros geoestadísticos.

González y Zak (1994) a través de geoestadística evaluaron la relación espacial de la textura, pH, carbono orgánico, mineralización del nitrógeno y fósforo disponible en un bosque tropical, encontrando relación a distancias de 24 metros o menos.

Palacio *et al.* (1994) estudiaron la variabilidad del pH, conductividad eléctrica, cloruros, materia orgánica, carbonatos totales y boro para una área de riego, utilizando 204 muestras al azar de un total de 2000 posibles dentro de una cuadrícula de 500 x 500 metros. Encontraron isotropía para las variables estudiadas, excepto conductividad eléctrica y pH, y encontrando en todos los casos un efecto nugget muy elevado para los casos de cloruros, pH y carbonatos totales, (Co representando más del 60% de Co + C), y concluyen que las variaciones más significativas se dan a distancias menores a 450 metros. Con esos mismos datos, Palacio y Siebe (1994) procedieron a cartografiar las variables estudiadas mediante kriging.

Ryel *et al.* (1996) evaluaron mediante técnicas geoestadísticas la variabilidad en los contenidos de amonio, nitratos, fósforo, potasio y humedad del suelo, de una zona de matorral, tomando muestras cada metro dentro de una superficie de 10 x 10 metros, cada 20 centímetros dentro de áreas de 1 x 1 metros y cada 3 centímetros en áreas de 15 x 15 centímetros, encontrando correlación sólo a distancias menores de 2 metros, aunque observando cambios en los patrones de distribución espacial entre diferentes épocas del año para los nitratos y humedad del suelo, no así para potasio y fósforo, que permanecieron relativamente constantes a lo largo del año; también observaron una mayor concentración de fósforo y potasio cerca de la base de los arbustos.

Bourgault *et al.* (1997) evaluaron las posibilidades de la geoestadística, mostrando su superioridad sobre otras metodologías de análisis espacial de datos, usando un conjunto de valores de conductividad eléctrica.

Chien *et al.* (1997) utilizaron geoestadística para examinar la distribución de calcio, magnesio, fósforo, fierro y textura, con sitios de muestreo separados a 250 metros entre sí, encontrando una correlación espacial moderadamente dependiente entre estas variables.

González (1997) estudió mediante geoestadística la distribución de los cloruros en mantos freáticos de una zona costera de España, para determinar el nivel de intrusión marina en los suelos costeros.

Pepiól (1997) realizó mediante kriging la cartografía de una zona afectada por sales, a dos profundidades, y encontró una mayor variación en la capa superficial, la cual atribuyó a las condiciones de evaporación y ascenso capilar.

La geoestadística también ha sido aplicada a varias otras disciplinas. Por ejemplo, a la hidrología (Samper y Carrera, 1990), a estudios relacionados con la distribución de vegetación (Palmer, 1988; Legendre y Fortin, 1989), y aún a estudios ecológicos sobre comunidades de animales invertebrados (Rossi *et al.*, 1992).

3. METODOLOGIA

3.1. DESCRIPCION GENERAL DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.1.1. Localización

La actual zona federal del ex-lago de Texcoco, se encuentra localizada dentro de la cuenca llamada Valle de México, al noroeste de la Ciudad de México y queda comprendida entre los paralelos 19° 22' y 19° 37' de latitud norte y los meridianos 98° 54' y 99° 03' de longitud oeste (Fig. 3.1.1.). El área es una planicie de pendientes menores al 1%; presenta algunas variaciones altimétricas, pero en promedio se ubica a una altitud sobre el nivel del mar de 2236 m.

La zona forma parte del Estado de México, y está constituida por porciones de los municipios de Acolman, Atenco, Chicoloapan, Chimalhuacán, Ecatepec, La Paz, Tezoyuca y Texcoco., aunque es de jurisdicción federal. Comprende aproximadamente 32,208.4 hectáreas (SRH, 1971).

3.1.2. Geología

Durante el Terciario, en lo que hoy es el área central de la República Mexicana se inició una intensa actividad volcánica, formándose diversas cuencas y sistemas montañosos por elevaciones, fracturas y hundimientos. De estos procesos, en la zona hoy ocupada por el ex-lago de Texcoco se formó una fosa tectónica donde se depositaron sedimentos continentales de la formación Balsas, constituidos por clastos gruesos derivados de la erosión de las sierras calizas cretácicas y de la actividad volcánica de la época. Durante el Terciario Superior se formó el eje neovolcánico, originándose los volcanes Ajusco, Iztaccíhuatl y Popocatepetl. Estos levantamientos permitieron el almacenamiento del agua y la formación de varios lagos. Durante esta actividad ígnea surgieron aguas magmáticas sulfurosas que al reaccionar con las calizas del Cretácico produjeron grandes cantidades de sulfato de calcio, por lo que el agua acumulada paulatinamente se fue haciendo sulfatada. Posteriormente, las condiciones de intensa evaporación condujeron a la formación y depositación de grandes espesores de anhídrita (sulfato de calcio anhidro), después de lo cual sobrevinieron depositaciones de materiales volcánicos formados por lavas y materiales piroclásticos.

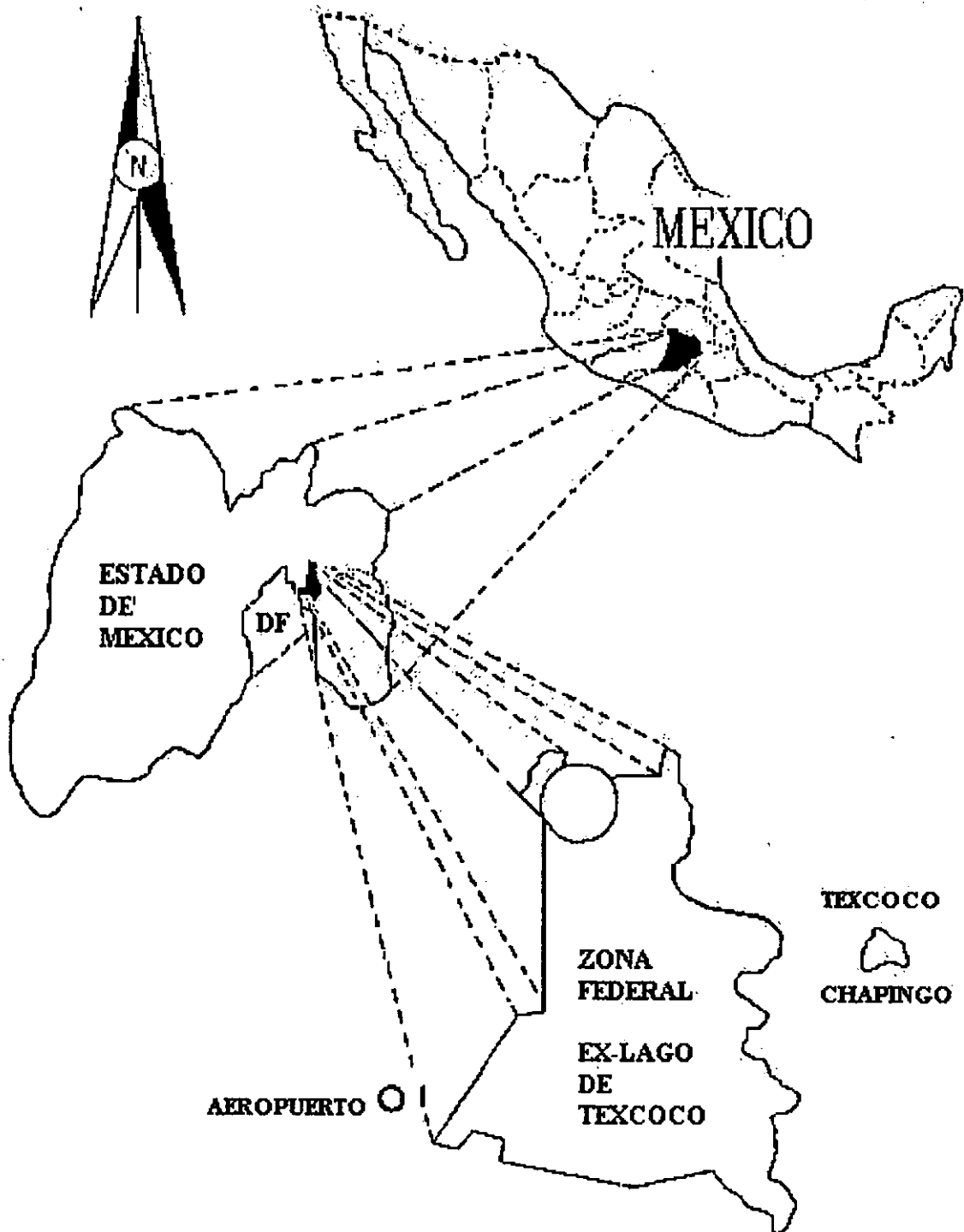


Figura 3.1.1. Localización del área del ex-lago de Texcoco.

En el Cuaternario, la efusión de lavas produjo un represamiento del antiguo drenaje que corría hacia el sur, formando la cuenca cerrada que hoy se conoce como Valle de México. Una vez formada esta cuenca y un gran lago en ella, las frecuentes erupciones de cenizas volcánicas, en combinación con lluvias abundantes que contribuían a la erosión, comenzaron a rellenarla. Este relleno se dio con mayor intensidad entre el Oligoceno Superior y el Mioceno Superior, y los materiales, consistentes en series clásticas de material andesítico, con tobas y conglomerados en una matriz de arenas y gravas, constituyen la llamada formación Tarango. Por otro lado, las corrientes lávicas, tobas, brechas y materiales clásticos de composición andesítica o basáltica más recientes componen la formación Chichinautzin. El espesor de estos materiales indica la gran profundidad de la cuenca o el levantamiento de las partes altas que la rodeaban, ya que actualmente existen afloramientos de caliza en la zona a 1600 m.s.n.m. Estos levantamientos continuos deben haber sido fundamentales en el relleno de la cuenca, con los materiales más finos siendo arrastrados hacia el fondo del Lago (SRH, 1971; Velázquez y Luna, 1981; Comisión de Lago de Texcoco, 1982).

En la perforación de un pozo en la parte central del ex-lago de Texcoco (Oviedo de León, 1970), se encontró la siguiente secuencia:

- a. De 0 a 180 metros de profundidad, los materiales presentes están constituidos por estratos predominantemente arcillosos, aunque intercalados con lechos arenosos y limosos y existen también depósitos de microfósiles.
- b. De 180 a 330 metros, se observa una alternancia de tobas, conglomerados, arenas y arcillas.
- c. De 330 a 480 metros, existe alternancia de calizas y margas, que posiblemente indican el cierre inicial de la cuenca.
- d. De 480 a 1965 metros, existe alternancia de rocas ígneas y tobas.
- e. De 1965 a 2060 metros, se presenta la capa de anhidrita, sobre la formación Balsas, con limolitas calcáreas.
- f. De 2060 metros en adelante, se encuentra un conglomerado calizo heterogéneo con fósiles del Cretácico Superior.

En lo referente a la parte más superficial, con base en una serie de sondeos profundos realizados en el centro del ex-lago de Texcoco hasta la profundidad de 80 metros, (Herrera *et al.*, 1972), se encontró la siguiente secuencia estratigráfica:

a. Costra superficial, de espesor medio de 1.5 m. La capa superficial está constituida por arcillas, arenas y limos que han sido consolidados por secado, y a esta profundidad se registra el nivel freático medio. Esta capa está surcada por grietas donde se han infiltrado materiales de tipo eólico.

b. Formación arcillosa superior. Esta capa, que comienza a partir de 1.5 metros de profundidad y termina a un poco más de 40 metros en los sitios sondeados, posee un espesor que varía de 18 a 40 metros; está constituida por arcillas blandas, altamente plásticas, de color gris verdoso a café rojizo y que tienen contenidos de agua de 200 a 400%. En esta capa se presentan algunas intercalaciones de materiales arenosos, sobre todo entre 6 y 22 metros de profundidad. Esta capa presenta alta compresibilidad y consistencia muy suave, contenido variable de microfósiles y lentes delgadas de arena y vidrio volcánico.

c. Capa dura. Es una capa de un espesor de alrededor de 3 metros, ubicada a una profundidad de entre 35 y 40 metros; está integrada por materiales limo arenosos, ligeramente cementados, y hay presencia de vidrios volcánicos.

d. Formación arcillosa inferior. Esta capa, que comienza entre los 38 y los 43 metros de profundidad, está compuesta por arcillas de elevada plasticidad, con un contenido de agua de 220% en promedio y tiene un espesor medio de 15 metros. Posee también microfósiles, lentes de arena y vidrio volcánico.

e. Depósitos profundos. Encontrándose a profundidades mayores de 45 a 50 metros de profundidad, se trata de formaciones de materiales muy heterogéneos, principalmente arcillas, limos y arenas muy finas, En un sondeo, los primeros 14 metros de espesor están constituidos por arenas y limos de color gris verdoso, muy compactos pero permeables, de 58 a 66 metros de profundidad, son de tipo arcilloso con microfósiles, vidrios volcánicos y estratos delgados de arena fina, y de 66 a 80 metros, se presenta limo arenoso color gris, muy compacto, con grava fina.

3.1.3. Hidrología

En el siglo XVI, el Valle de México era una región lacustre, y su parte central y más baja estaba ocupada por el lago de Texcoco, cuyas aguas eran saladas. En la parte norte, y en más altos niveles, se encontraban los lagos de Xaltocan y Zumpango, y al sur se encontraban los lagos de Xochimilco y Chalco. Estos lagos eran de agua dulce, y desaguan al lago de Texcoco a través de una serie de compuertas existentes en diques contruidos por los aztecas para separar las aguas dulces de las saladas. La ciudad de Tenochtitlan estaba también separada del lago de Texcoco por este medio, y la laguna donde se asentaba, era también de agua dulce. El lago de Texcoco era alimentado por una serie de ríos y arroyos, de los cuales el más importante por su caudal era el río Cuautitlán, ubicado al poniente del lago.

Después de la conquista, y a partir de una serie de inundaciones sufridas por la Ciudad de México en los siglos XVI y XVII, se llevaron a cabo obras de desague general de la cuenca, incluyendo en primer lugar la desviación del mayor afluente del lago, el río Cuautitlán, y posteriormente la construcción del gran canal y el túnel de Zumpango. (Gurría, 1978; Lemoine, 1978). Con estas obras, la zoha lacustre comenzó a desaparecer progresivamente, hasta alcanzar su estado actual, en que sólo sobreviven como áreas permanentemente inundadas algunos sitios de la zona federal del ex-lago de Texcoco, Chalco y Xochimilco.

El área del ex-lago de Texcoco recibe actualmente escurrimientos de los siguientes ríos: al oriente, San Juan Teotihuacán, Papalotla, Jalapango, Coxcacoaco, Texcoco, Chapingo, San Bernardino, Santa Mónica y Coatepec; y por el sur, San Francisco, La Compañía y Churubusco. El caudal llevado por estas corrientes es cada día menor, debido a que el agua es interceptada para uso urbano, además de que se han construido obras de conservación en las partes altas que han tenido la finalidad de retener azolves y propiciar la infiltración y recarga de los mantos acuíferos. Por otro lado, gran parte del agua que llega al ex-lago por estas vías está constituida por aguas negras, en particular por el río Churubusco. Todas estas aguas, sin embargo, son canalizadas en la actualidad a una serie de lagos artificiales de los cuales el mayor es el Nabor carrillo, con una superficie de 1000 hectáreas.

La desecación sufrida por el lago de Texcoco dejó al descubierto sedimentos fuertemente salinos y sódicos, los cuales constituyen un obstáculo para el establecimiento vegetal. Puesto que la superficie se encontraba expuesta a la erosión eólica, se creó la Comisión del Lago de Texcoco con el fin de efectuar trabajos de mejoramiento de la zona, y dentro de estos trabajos se ha dado énfasis al drenaje de los suelos para abatir los mantos freáticos, efectuar lavados del suelo y llevar a cabo labores de pastización y forestación. De este modo, en la actualidad la mayor parte del lecho del ex-lago de Texcoco se encuentra libre de agua la mayor parte del año, y sólo algunos sitios muy localizados se inundan durante la época de lluvias, o permanecen inundados todo el año.

Una característica de la zona del ex-lago de Texcoco es la existencia de un manto acuífero de alta concentración de sales, localizado a una profundidad de alrededor de 30 metros, el cual era anteriormente explotado para la obtención de sosa por la desaparecida empresa Sosa Texcoco.

3.1.4. Clima

De acuerdo a la clasificación climática de Koppen, modificada por García (1973), el clima de la zona corresponde al BS₁ Kw(w)(1'), semiseco con verano fresco (temperatura media del mes más caliente inferior a 18°C) y lluvioso, e invierno con total de lluvia menor del 5% del total anual.

Con base en los datos reportados para el período 1967-1996 por la estación meteorológica ubicada en el campamento central de la Comisión del Lago de Texcoco, la precipitación media anual es de 544.2 mm, con una precipitación anual máxima de 697.3 mm y una mínima de 432.1 mm (figura 3.1.2.). Existe un período definido de lluvias que comprende de finales de mayo a principios de octubre, siendo julio el mes más lluvioso y febrero el más seco; la precipitación en términos de porcentaje se distribuye en un 87% para el período lluvioso y 12.2% para el período seco. Esta precipitación se presenta generalmente de tipo torrencial. La temperatura media anual es de 15.3°C, con una variación de 6.4°C; la media más baja se registra durante el mes de enero, con 11.6°C, y la media más alta en el mes de junio, con 18°C. Las temperaturas mínimas extremas son de -10°C la más baja, durante el mes de enero, y de 8°C la más alta, durante el mes de julio,

con una variación de 18°C. Las temperaturas máximas extremas son de 28°C la más baja, durante diciembre, y de 36°C la más alta, durante abril, con una variación de 8°C.

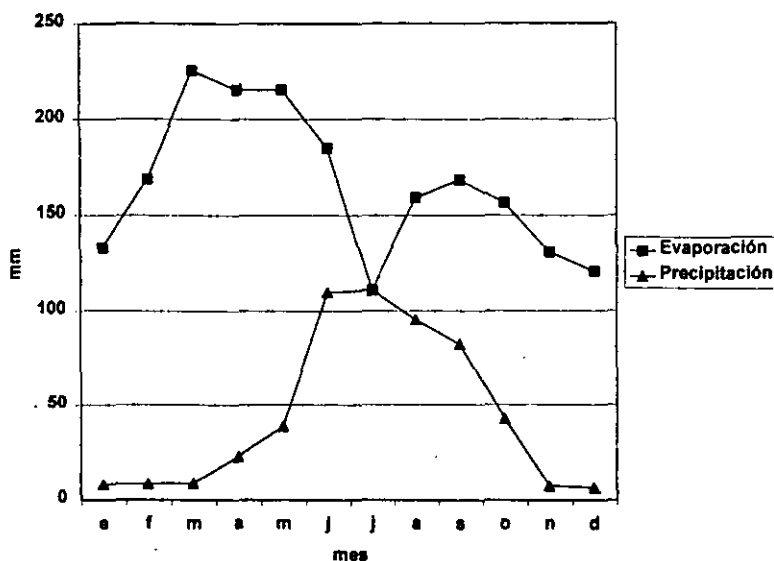


Figura 3.1.2. Promedios mensuales de precipitación y evaporación en el área del ex-lago de Texcoco, periodo 1967-1996.

Los vientos presentes en la zona son de tres tipos: de altura, rasantes y convectivos. Los primeros provienen de la serranía del Ajusco, a una altura aproximada de 3000 m.s.n.m. Los vientos rasantes, con velocidades de 2.3 a 4.1 m/seg. provienen de varias direcciones: del noreste, vientos polares entran al ex-lago de Texcoco y salen en la dirección de Amecameca o a veces de Tlalnepantla; del norte llegan vientos fríos que corren de norte a sur durante las noches; vientos del sur-sureste provienen de la zona de Chalco, y vientos del noroeste llegan de Pachuca. Los vientos convectivos se producen en la zona, durante las horas más calientes del día. Estos vientos convectivos, junto con los vientos rasantes del noreste y sur-sureste, son los que llegan a ocasionar tolvaneras, las cuales eran de gran importancia en décadas pasadas por su efecto negativo sobre la Ciudad de México; actualmente su magnitud ha decrecido considerablemente gracias a las labores de pastización y forestación del área.

En lo que respecta a la evaporación, las altas temperaturas y las características de los vientos presentes en el área, producen valores de evaporación muy elevados (figura 3.1.2.),

con una media de 1989.7 mm y un máximo de 2454 mm. Si se comparan los datos de precipitación con los de evaporación, es posible observar que en general la cantidad de agua evaporada supera en tres veces a la cantidad de agua recibida en forma de lluvia. Esta es una de las razones de que en la zona del ex-lago de Texcoco exista una fuerte acumulación de sales en la superficie de suelo, ya que se propicia el ascenso capilar del agua del manto freático, evaporándose el agua pero quedando depositadas en la superficie las sales que lleva en solución..

Existen heladas en la zona, principalmente en los meses de noviembre a abril.

3.1.5. Fauna

El ecosistema de tipo lacustre que existía en la cuenca de México desde hace milenios dio origen a una diversa y abundante y fauna que aún existía en la época de la conquista española. En la actualidad, con la desecación de la zona lacustre y el crecimiento de la Ciudad de México, esta fauna ha disminuido considerablemente.

a. Vertebrados. En el área del ex-lago, sobre todo en las áreas inundadas permanentes y en los lagos artificiales, es posible observar la presencia de diversas aves, algunas de las cuales son nativas de la zona y otras son de carácter migratorio procedentes de Alaska, Canadá y los Estados Unidos de América. Los mayores números de éstas últimas se presentan durante los meses de agosto a enero. Estas especies incluyen varias especies de la familia Anatidae, (patos), Charabridae, Recurrostridae (monjitas), Rallidae (gallaretas) y Ardeidae (garzas). Por otro lado, en la zona son abundantes varias especies de la familia Scolopacidae (chichicuילות), como: *Venenius americanus* (chichicuילות), *Crocethia alba* (chichicuילות), *Tringa solitario* (chichicuילות solitario) *Actitis macularia* (patas amarillas), y *Catoptrophorus semipalmatus* (patas amarillas). Existen también algunas especies de mamíferos, de los cuales pueden mencionarse algunos roedores y liebres.

b. Invertebrados. Un insecto que reviste especial importancia en la zona es el mosco (*Ahuautlea mexicana* La Llave), el cual es aún utilizado en la obtención del ahuate, que es el huevo de este insecto, y que se utiliza con fines alimenticios. Sin embargo, esta práctica tradicional está en decadencia.

3.1.6. Vegetación

En la zona del ex-Lago de Texcoco, existen en la actualidad dos tipos de asociaciones naturales: las asociaciones de halófitas y las asociaciones de hidrófitas, de acuerdo con la clasificación de Rzedowski (1978). Estas asociaciones han sido descritas en detalle por varios autores, incluyendo a Rzedowski (1957), SRH (1971), Evans (1978), y Cabrera (1988).

3.1.6.1. ASOCIACIONES DE HALOFITAS

Se denominan asociaciones de halófitas a las asociaciones de plantas que poseen alta tolerancia a la salinidad del suelo. En los suelos del lago de Texcoco existe este tipo de asociación, constituida principalmente por tres especies de la familia Poaceae: *Distichlis spicata* (L.) Greene, (pasto salado); *Eragrostis obtusiflora* Fourn., (zacahuistle), y *Sporobolus pyramidatus* (Lam.) Hitch., y una de la familia Chenopodiaceae: *Suaeda torreyana* (S. Wats.), conocida comúnmente como romerito. Estas cuatro especies pueden encontrarse constituyendo comunidades monoespecíficas, o pueden encontrarse mezcladas. Las características de estas especies son:

a. *Distichlis spicata*. El pasto salado constituye la especie más abundante que se encuentra en la zona del ex-lago de Texcoco. Su descripción botánica se presenta en el apéndice 1. Este pasto se presenta en sitios con altas concentraciones de sales, aunque por lo general su desarrollo es mayor en suelos con valores de conductividad eléctrica inferior a 30 dS m⁻¹. Forma colonias densas, aunque esta densidad disminuye al incrementarse la salinidad del suelo. Resiste períodos de inundación, y puede desarrollarse bien en suelos con valores de pH de 9 a 10, y de texturas arcillosas o arenosas, aunque la resistencia a la penetración por parte del suelo afecta el desarrollo de sus raíces (Ortiz, 1988a). De acuerdo con Hansen *et al.*, (1976), dentro de las características que le confieren resistencia a la inundación se encuentran: rizomas puntiagudos con numerosas células silíceas, y presencia de espacios aéreos (aerénquima) en los rizomas, raíces y vainas de las hojas. Por otro lado, la presencia de glándulas de sal le confiere tolerancia a la salinidad, y tiene asimismo una elevada capacidad de ajuste osmótico. Evans (1978) señala que los estolones de esta especie no pueden establecerse con éxito si hay altas concentraciones de sodio en la zona radical, y añade que este pasto crece mejor en condiciones de inundación parcial, en virtud de la dilución de la

concentración de sales; sin embargo, debe haber un mínimo de 150 mmol L⁻¹ de sodio y 250 mmol L⁻¹ de cloruros en la zona radical, durante la época de crecimiento. García y Montanez (1992) en un estudio realizado en Montecillos, México, cerca de la zona federal del ex-lago de Texcoco, reportan tasas de productividad primaria neta de esta especie del orden de -79 g m⁻² a 350 g m⁻² al mes, con el valor más bajo en enero, y el más alto en marzo, con una producción primaria neta anual de 1422 g m⁻² a 1995 g m⁻², y señalan su dependencia de las variaciones en precipitación y la presencia de fuegos ocasionales. Desafortunadamente, estos autores no señalan los valores de conductividad eléctrica de los suelos del sitio de estudio.

b. *Suaeda torreyana*. Esta especie es una herbácea suculenta, siendo esta suculencia una adaptación al medio salino para diluir la concentración interna de sales. Posee una elevada capacidad de ajuste osmótico, y es capaz de sobrevivir en suelos con valores de conductividad eléctrica de más de 80 dS m⁻¹. Produce una gran cantidad de semillas, las cuales son de dos tipos: una membranosa, que posee menor tolerancia a la salinidad, y una con testa dura, con mayor capacidad de latencia (Ortiz, 1992) Este fenómeno, denominado polimorfismo de la semilla, confiere a esta especie una mayor capacidad de colonización. Evans (1978) señala que las semillas no germinan cuando la concentración de sodio en el suelo sobrepasa los 500 mmol L⁻¹ y la de cloruros los 1000 mmol L⁻¹, aunque una vez establecidas, las plántulas toleran el triple de estas concentraciones (estos resultados probablemente corresponden a las semillas de testa dura). Esta especie, a diferencia del pasto salado, no tolera condiciones de inundación.

c. *Eragrostis obtusiflora*. Este pasto es el de menor tolerancia de las cuatro especies señaladas. Forma manchones monoespecíficos, en ocasiones dentro de comunidades de *Distichlis*. No soporta periodos prolongados de inundación, y para desarrollarse con una cobertura densa requiere de la presencia de menos de 500 mmol L⁻¹ de sodio y de menos de 300 mmol L⁻¹ de cloruros en el suelo. Posee un doble sistema de raíces: uno, profundo, opera en época de sequía fuera del alcance de las capas superficiales donde se acumulan las sales; el otro, somero, en tiempo de lluvias, cuando las sales de la superficie se han diluido o lixiviado.

d. *Sporobolus pyramidatus*. Este pasto posee una tolerancia intermedia a la de las otras especies, y se encuentra comúnmente en combinación con *Distichlis* y con *Suaeda*. Tampoco resiste periodos de inundación prolongada. Por las características de los sitios donde se

desarrolla, podría considerarse como una halófito facultativa, ya que frecuentemente se encuentra en suelos no salinos en el Valle de México.

e. Otras especies presentes en las asociaciones de halófitas. En la zona de estudio existen varias otras especies de halófitas, que se encuentran generalmente incluidas en las asociaciones que han sido arriba señaladas, aunque son más comunes a lo largo de caminos, canales y drenes, así como en áreas de menor salinidad. Dentro de las más comunes de estas especies se incluyen a *Sesuvium portulacastrum* (Aizoaceae), *Atriplex semibaccata*, *Kochia scoparia* (Chenopodiaceae), *Heliotropium curassavicum* (Boraginaceae), *Tamarix chinensis* (Tamaricaceae), *Hordeum jubatum* y *Chloris* sp. (Poaceae).

3.1.6.2. ASOCIACIONES DE HIDROFITAS

A lo largo de drenes y canales, y en algunos de los sitios que aún presentan condiciones de inundación permanente, se encuentran asociaciones de plantas acuáticas, dentro de las cuales se incluye a especies como *Scirpus lacustris* (Cyperaceae), *Typha latifolia* (Typhaceae), y algunas especies del género *Lemna* (Lemnaceae).

3.1.6.3. ESPECIES INTRODUCIDAS

Con el fin de proporcionar a los suelos del ex-lago de Texcoco una cubierta vegetal, se ha fomentado el establecimiento de *Distichlis spicata*, y se han introducido en el área a manera de prueba numerosas especies de halófitas; la mayoría de ellas no han podido ser establecidas con éxito, pero en algunos casos las especies han logrado establecerse e incluso llegan ya a reproducirse de manera espontánea, pasando a formar parte de las asociaciones de la zona. Merecen ser mencionadas dentro de este caso *Tamarix chinensis*, y varias especies de *Atriplex*. *Tamarix aphylla*, en cambio, no se ha establecido naturalmente, ya que a pesar de haber sido introducida con éxito desde hace varios años, casi no existen aún individuos que hayan alcanzado la etapa de floración.

Actualmente, la mayor parte del área del ex-lago de Texcoco ha sido sujeta a programas de pastización con *Distichlis spicata*, o de forestación con las dos especies de *Tamarix* arriba mencionadas.

En el caso de *Distichlis*, la pastización se lleva a cabo en suelos desnudos de vegetación, utilizando "tepes", que son bloques de suelo con pasto de aproximadamente 30 x 30 x 30 cm. Estos tepes se extraen de sitios donde exista pasto bien desarrollado, y se transportan al sitio final donde se colocan en hoyos de las mismas dimensiones. Es muy importante que inmediatamente después se apliquen riegos por inundación intensos para favorecer el establecimiento del pasto. A través de esta metodología se ha logrado obtener un éxito de más del 80% en la pastización, pero en las áreas con niveles de salinidad muy elevados se hace necesario el mejoramiento del suelo a través de la construcción de sistemas de drenaje parcelario y aplicación de láminas de lavado para reducir la salinidad. La siembra directa de semillas de esta especie no se practica debido a la baja viabilidad de las mismas, y a su elevada latencia, la cual es necesario romper mediante congelamiento (Contreras, 1983).

Las especies de *Tamarix* que se utilizan en la zona se reproducen en viveros; en el caso de *Tamarix chinensis*, se ha utilizado la micropropagación (Orduña, 1994), aunque actualmente la mayor parte de la producción se obtiene a partir de semillas, mismas que se siembran en almácigos en una dosis de 50 g m⁻², y posteriormente se pasan a bolsas cilíndricas de plástico de 5 x 20 cm con tierra de monte; otra parte se obtiene de esquejes sembrados directamente en las bolsas de plástico, con enraizador. *Tamarix aphylla*, en cambio, se reproduce sólo por esquejes, ya que hasta este momento prácticamente no presenta floración en el área. Las plantas obtenidas del vivero se trasplantan a los dos años de edad, en sitios que se preparan mediante la construcción de bordos de 50 cm. de altura, sembrando las plantas en los taludes, y posteriormente son regados (Solano *et al.*, 1994; Flores *et al.*, 1994). Sin embargo, la forestación puede fracasar por completo en sitios de muy alta salinidad o donde falle el riego.

3.1.7. Suelos

3.1.7.1. TAXONOMÍA DE LOS SUELOS DE LA ZONA

De acuerdo con el estudio agrológico detallado efectuado para la zona por Velázquez y Luna (1981), en la actual zona del ex-lago de Texcoco los suelos quedan agrupados en tres órdenes: Entisoles, Inceptisoles y Molisoles, y en su conjunto comprenden un total de 17 series de suelos:

SERIE	ORDEN	SUBORDEN	GRAN GRUPO	SUBGRUPO
Agua Negra	Inceptisol	Aquept	Halaquept	Typic halaquept
Aguila	Inceptisol	Aquept	Halaquept	Vertic halaquept
Ahuehuetes	Entisol	Fluvent	Ustifluent	Typic ustifluent
Charco	Entisol	Fluvent	Ustifluent	Typic ustifluent
Chimalhuacán	Inceptisol	Aquept	Halaquept	Typic halaquept
Gaviotas	Inceptisol	Aquept	Halaquept	Typic halaquept
Liebres	Inceptisol	Aquept	Halaquept	Typic halaquept
Nabor Carrillo	Inceptisol	Aquept	Halaquept	Typic halaquept
Patos	Entisol	Fluvent	Ustifluent	Typic ustifluent
Potreros	Inceptisol	Aquept	Halaquept	Typic halaquept
Ranchito	Molisol	Ustoll	Durustoll	Typic durustoll
Salada	Inceptisol	Aquept	Halaquept	Vertic halaquept
Sumidero	Inceptisol	Aquept	Halaquept	Typic halaquept
Taralanes	Inceptisol	Aquept	Halaquept	Typic halaquept
Torres	Inceptisol	Aquept	Halaquept	Vertic halaquept
Víboras	Inceptisol	Aquept	Halaquept	Vertic halaquept
Xochiaca	Inceptisol	Aquept	Halaquept	Typic halaquept

Los suelos de la zona se han formado a partir de deposición aluvial o eólica de materiales de origen ígneo intusivo y extrusivo, incluyendo cenizas volcánicas, y materiales derivados de basaltos, andesitas, tobas y brechas procedentes de la erosión de las sierras que rodean a la zona y de algunos cerros aislados, como el Peñón de los Baños, y los cerros de Chimalhuacán y de la Estrella.

3.1.7.2.COMPOSICION DEL SUELO

En un estudio de los sedimentos superficiales del suelo del ex-lago de Texcoco, Rivera (1975) encontró que la fracción de arenas está constituida por minerales procedentes de rocas ígneas, principalmente andesitas, incluyendo cuarzo, feldspatos, piroxeno y olivino. De acuerdo con este autor, en el suelo seco existe una gran cantidad de partículas de diámetros mayores a 2 mm que corresponden a cristales de sales, tanto cloruros como sulfatos y carbonatos de sodio, principalmente. Por otro lado, la fracción de partículas de menos de 2 micras de diámetro, se compone de minerales arcillosos del tipo de las esmectitas (montmorillonita, hectorita y clorita), siendo la más abundante de ellas la montmorillonita; además se incluyen en esta categoría la calcita y minerales amorfos como el alofano.

La presencia de altos contenidos de arcillas confiere a estos suelos una alta capacidad de retención de agua, y las capas con estas características reciben el nombre de “jaboncillo”. Este material se caracteriza por retener una alta proporción de humedad, superior al 400%, y presenta un secado irreversible, ya que si el material se seca y se trata de saturar con agua nuevamente, no se alcanzan los niveles de humedad previos (Ramírez, 1985)

3.1.7.3. SALINIDAD Y SODICIDAD

Una característica de los suelos del área es su alto contenido de sales solubles y su elevado porcentaje de sodio intercambiable; es común encontrar sitios donde el suelo, al menos en las capas superiores, alcanza valores de conductividad eléctrica cercanos o aún superiores a los 200 dS m⁻¹, y porcentajes de sodio intercambiable superior a 90 y aún de 99 (calculados a través de la RAS, de acuerdo con Richards, 1954). En el estudio realizado por la SRH en 1971, los suelos fueron agrupados en 8 categorías de acuerdo con sus niveles de salinidad y sodicidad:

Categoría	CE (dS m ⁻¹)	PSI
Sin afectación	< 4	< 15
Ligeramente afectado	4 – 8	15 – 20
Moderadamente afectado	8 – 16	20 – 25
Fuertemente afectado	16 – 25	25 – 40
Muy fuertemente afectado	25 – 50	40 – 55
Extremadamente afectado	50 – 100	70 – 90
Muy extremadamente afectado	100 – 200	70 – 90
Excesivamente afectado	> 200	> 90

En el campo se observa en general que a partir de la categoría de “extremadamente afectado”, los suelos se presentan desnudos, sin una cubierta vegetal, con gruesas costras de sales en la superficie. En las categorías de menor salinidad y sodicidad se encuentran las asociaciones de halófitas señaladas, y es en éstas áreas donde se ha logrado el mayor éxito en el establecimiento de pasto o las especies de *Tamarix*.

3.2. MATERIALES Y METODOS

3.2.1. Determinación de la variación espacial y temporal de la salinidad en un perfil de suelo

Con el fin de determinar la variación espacial y temporal de los contenidos de iones en el suelo, a nivel de un perfil, se eligió un sitio con alto grado de afectación por sales y sodio intercambiable, y en este sitio se elaboró un perfil de suelo donde se tomaron muestras de suelo hasta la profundidad de 2 metros, en intervalos de 10 cm. Estas muestras fueron de tipo compuesto; tomando tres submuestras, una en cada pared de la excavación, y mezclándolas para tener una sola muestra final para cada profundidad. La ubicación del sitio se muestra en la figura 3.2.1. De acuerdo con el estudio de Velázquez (1980) el suelo corresponde a un halaquept. Las muestras obtenidas se secaron al aire, y en un principio se procedió a realizar en ellas las siguientes determinaciones físicas y químicas, con el fin de conocer las características generales del suelo, de acuerdo con los métodos establecidos por Page (1982), Jackson (1968), Black (1965) y Richards (1954):

1. Textura, por el método de Bouyoucos
2. Densidad aparente, por el método de la parafina
3. Densidad real, por el método del picnómetro
4. Capacidad de campo y porcentaje de marchitez permanente, por el método de la olla y la membrana de presión
5. Color en seco y húmedo, por comparación con las tablas de color Munsell
6. pH en agua, relación 1:2.5 con un potenciómetro
7. Materia orgánica, por el método de Walkley y Black
8. Nitrógeno total, por el método de Kjeldahl, usando un analizador automático Tecator Kjeltex 800
9. Fósforo, por el método de Olsen
10. Capacidad de intercambio catiónico, por el método de Polemio y Rhoades (Rhoades, 1982)
11. Contenidos de micronutrientes: Fe, Zn, Cu y Mn, por medio de extracción con DTPA y posterior determinación por absorción atómica

Además, a partir del extracto de pasta de saturación se realizaron las siguientes determinaciones de salinidad y sodicidad:

12. Conductividad eléctrica, medida con un puente de conductividad
13. pH por medio de un potenciómetro
14. Na⁺ por flamometría
15. K⁺ por flamometría
16. Ca²⁺ por absorción atómica
17. Mg²⁺ por absorción atómica
18. Cl⁻ por volumetría (titulación con nitrato de plata)
19. CO₃²⁻ por volumetría (titulación con ácido sulfúrico)
20. HCO₃⁻ por volumetría (titulación con ácido sulfúrico)
21. SO₄²⁻ por gravimetría (precipitación como sulfato de bario)
22. Relación de adsorción de sodio (RAS), obtenida de la ecuación

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

donde Na⁺, Ca²⁺ y Mg²⁺ se expresan en mmol L⁻¹.

23. Porcentaje de sodio intercambiable (PSI), obtenido a partir de la ecuación

$$PSI = \frac{100(0.01475RAS - 0.0126)}{1 + (0.01475RAS - 0.0126)}$$

24. Boro, colorimétricamente, usando carmín

Cabe señalar que no se determinó el PSI a través del análisis de cationes intercambiables y su comparación con la capacidad de intercambio catiónico, ya que en suelos con altos niveles de sales estos análisis están sujetos a un alto porcentaje de error, resultando valores de PSI demasiado elevados (Becerra, 1983).

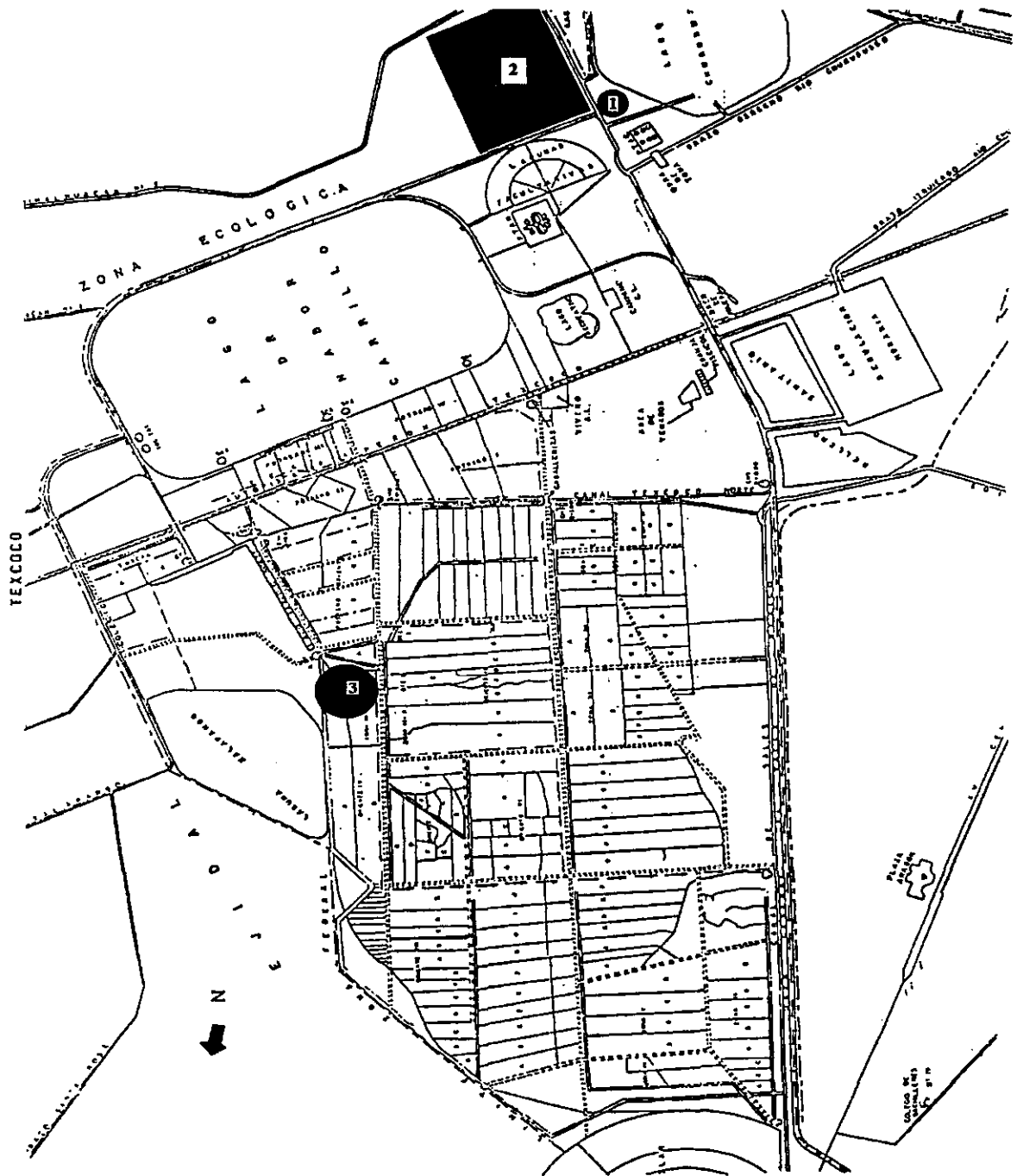


Figura 3.2.1. Ubicación en el área del ex-lago de Texcoco del perfil (1), la zona ecológica (2) y el sitio sujeto a mejoramiento (3).

La toma de muestras descrita para este perfil se repitió mensualmente, durante el período de 1 año; en las muestras tomadas mensualmente se realizaron sólo las determinaciones analíticas correspondientes a salinidad y sodicidad (determinaciones del 12 al 23), con el fin de conocer los cambios en estas propiedades que se dan a lo largo del año.

3.2.2. Análisis de la distribución espacial y temporal de la salinidad en la capa superficial del suelo

Para conocer la variación y distribución de la salinidad en la capa superficial del suelo, se eligió, dentro de una zona carente de perturbación, denominada “zona ecológica”, una área de 154 hectáreas de superficie, donde se estableció inicialmente un cuadrante de muestreo basado en una cuadrícula con 100 m. de separación entre líneas, quedando ubicados un total de 180 sitios de muestreo en los puntos donde las líneas se cruzaban.

La ubicación del área estudiada se muestra en la figura 3.2.1.; una imagen aérea con el cuadrante de muestreo se muestra en la fig. 3.2.2. Las coordenadas que delimitan al sitio, determinadas con un geoposicionador, son las siguientes:

<i>Coordenadas X/Y</i>	<i>Latitud N</i>	<i>Longitud W</i>
0,0	19° 26' 36.4"	98° 59' 53.4"
1.4, 0	19° 25' 53.4"	98° 59' 35.6"
0, 1.1	19° 26' 49.7"	98° 59' 17.7"
1.4, 1.1	19° 26' 08.0"	98° 59' 02.1"

Cabe señalar que el área consiste en una serie de manchones de vegetación alternados con sitios donde el suelo se encuentra desnudo, sin una cubierta vegetal. De acuerdo con Velázquez (1980) el suelo corresponde a un halaquept.

En cada uno de los sitios de muestreo se tomaron muestras de suelo a la profundidad de 0-30 cm., las cuales fueron de tipo compuesto, constituidas por 5 submuestras tomadas al azar en una superficie de unos 100 m² tomando como centro el sitio de muestreo. En cada sitio se colocó una estaca marcada, y en las muestras tomadas se efectuaron los mismos análisis de salinidad y sodicidad (12 al 23) señalados en el apartado anterior.

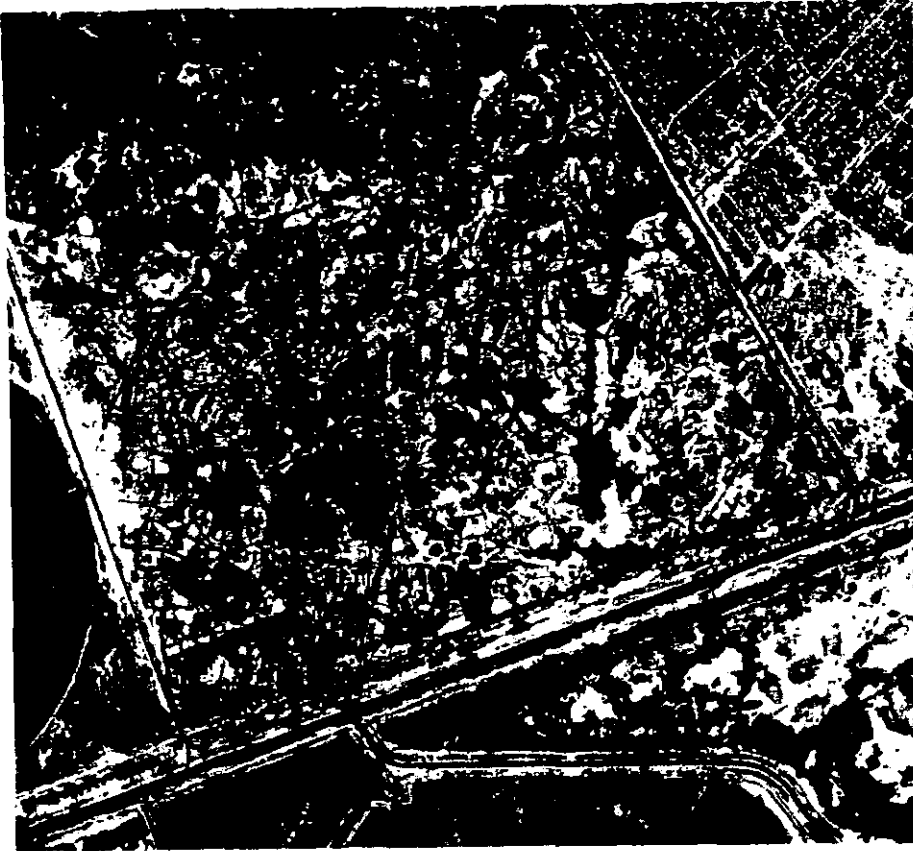


Figura 3.2.2. Imagen aérea de la zona ecológica y disposición del cuadrante de muestreo.

Con el fin de conocer los cambios generados durante el año en la distribución de las sales, en los 180 sitios se realizaron dos muestreos: uno durante el mes de enero, en la estación seca del año, y otro durante el mes de septiembre, en la estación húmeda.

Adicionalmente se realizó un muestreo similar pero dentro de una hectárea, ubicando los sitios de muestreo en una cuadrícula con distancias de separación de 10 m entre las líneas. De este modo, se manejaron dos órdenes de magnitud para la distancia mínima de separación entre los sitios de muestreo. En este caso, el muestreo se realizó sólo durante la época húmeda del año, obteniendo un total de 121 muestras. La hectárea elegida para este muestreo se ubicó cerca del centro del área ecológica; se eligió un sitio que presentara las distintas condiciones que se observaron en el área, incluyendo sitios cubiertos con vegetación y carentes de ella.

Los resultados fueron evaluados por medio de geoestadística. Los análisis geoestadísticos y los semivariogramas se realizaron utilizando el paquete de cómputo "GS+" (Gamma Design Software, Inc.) y los mapas que muestran la distribución espacial de los parámetros estudiados se realizaron mediante "kriging" con el paquete "SURFER" versión 6 (Golden Software, Inc.).

3.2.3. Determinación de la producción de biomasa y acumulación de sodio y potasio de halófitas

En los mismos 180 sitios del cuadrante con cuadrícula de 100 m de la "zona ecológica", se efectuaron mediciones de la producción de biomasa de las especies presentes, por corte de la parte aérea de las plantas presentes en 1 m². Adyacente a cada estaca, durante el mes de enero se efectuó un corte al ras del suelo de la vegetación presente, y en septiembre, cuando las plantas habían finalizado el desarrollo vegetativo y estaban en etapa de floración, se realizó un segundo corte en el mismo sitio. Las plantas se secaron y pesaron, para conocer la cantidad de biomasa producida durante ese periodo (240 días) en 1 m², por especie.

De este mismo material vegetal se tomó una parte, para realizar análisis de los contenidos de iones Na⁺ y K⁺. Esta determinación se llevó a cabo por calcinación en una mufla a 550°C durante 2 horas, de aproximadamente 0.5 g de tejido vegetal seco y molido, el cual fue posteriormente disuelto en ácido clorhídrico 2 N, diluido a 25 ml (Chapman, 1973) y determinando las concentraciones de Na⁺ y K⁺ por flamometría. Estos valores fueron relacionados con los valores de salinidad y sodicidad presentes en cada sitio.

3.2.4. Mejoramiento del suelo

Los trabajos de forestación o pastización que se llevan a cabo en áreas desnudas de la zona del ex-lago de Texcoco se efectúan en muchos casos sin conocer de manera detallada los niveles de sales y sodio intercambiable presentes en el suelo, y el resultado es que comúnmente las plantas introducidas a sitios con alto grado de afectación mueren después de un corto tiempo. Por otro lado, la aplicación de mejoradores a los suelos es muy costosa,

de modo que sería benéfico conocer la distribución de la salinidad con el fin de llevar a cabo acciones de mejoramiento sólo en aquéllos sitios que realmente lo requieran.

Con el fin de evaluar la posibilidad de introducir halófitas en sitios desnudos a partir de la información obtenida, se diseñó un experimento a nivel de campo donde se establecieron 9 parcelas experimentales de 30 m² cada una, en un diseño de bloques al azar, en donde se aplicaron, por triplicado, tres tratamientos para mejoramiento del suelo. Este trabajo se efectuó en una zona que ha estado sujeta en el pasado a varios intentos de forestación y pastización sin éxito, y que permanece desnuda de vegetación. Los tratamientos se diseñaron no con el objeto de “recuperar” el suelo desde un punto de vista agrícola, sino con el fin de reducir los niveles de sales y sodio intercambiable sólo a un nivel que permitiera el desarrollo de plantas.

La ubicación del área elegida para este estudio se muestra en la figura 3.2.1. El suelo corresponde a un halaquept (Velázquez, 1980). En primer lugar, en el sitio se llevaron a cabo una serie de trabajos de labranza con el fin de preparar el terreno:

- a) Nivelación del sitio.
- b) Subsoleo.
- c) Barbecho.
- d) Rastreo.
- e) Delimitación de las parcelas experimentales.
- f) Levantamiento de bordos (30 cm. de altura, aproximadamente).
- g) Rehabilitación y modificación del trazo de la obra de riego del área con el fin de conducir agua al sitio experimental.

A excepción del punto e), estos trabajos fueron llevados a cabo por tractores y personal de la Gerencia del Proyecto Lago de Texcoco.

El trazo de las parcelas experimentales se muestra en la figura 3.2.3. Entre las parcelas se dejaron “calles” de 1 m de anchura, algunas de las cuales se utilizaron como regaderas para conducir al agua a cada parcela individual.

Posteriormente, con el fin de conocer con precisión el grado de afectación del sitio, se realizó en éste un muestreo, tomando muestras compuestas, de las profundidades 0-30 y 30-

60 cm., constituidas por 9 submuestras tomadas en el centro de cada una de las parcelas experimentales, a las cuales se practicaron análisis de salinidad y sodicidad.

A partir de la información obtenida del muestreo del "área ecológica", se pudo ver que, en la mayoría de los casos, la presencia de vegetación se da en sitios donde la conductividad eléctrica es menor de 70 dS m⁻¹, y donde el porcentaje de sodio intercambiable es menor de 90. Los datos del análisis practicado a las muestras compuestas del sitio mostraron que en el sitio experimental la conductividad eléctrica era de 87 dS m⁻¹ y el porcentaje de sodio intercambiable de 96.6.

Con esta información, se diseñó entonces un esquema de mejoramiento del suelo basado en la aplicación de láminas de lavado y de un mejorador químico. El mejorador elegido, por su disponibilidad en la zona, y porque es un mejorador ácido, que abate el pH del suelo (Stromberg y Tisdale, 1979), el cual es muy alto en el sitio experimental, fué un producto químico comercial denominado "Polisul" que es polisulfuro de calcio con una fuente adicional de nitrógeno. La composición de este producto es:

Ca	4.6 %
N	5 %
S total	32 %
S coloidal	16 %
S como sulfuro	13 %
S como tiosulfato	2 %
S como sulfato	1 %
Inertes	58.4 %

Se diseñaron tres tratamientos: el tratamiento O, que consistió sólo en la aplicación de una lámina de lavado para reducir la salinidad por debajo de 70 dS m⁻¹, y dos tratamientos a los que se aplicó mejorador para reducir el porcentaje de sodio intercambiable de su valor original de 96.6 a 2 niveles: tratamiento I, a 82 %, y tratamiento II, a 68%. Se consideró sólo el objetivo de mejorar las características del suelo de la capa 0-30 cm, ya que sería la capa en la que se establecerían las plantas a sembrar o trasplantar, y porque cualquier intento de mejorar el suelo a mayor profundidad incrementaría las necesidades de agua y

mejorador, con los costos consiguientes. Los cálculos de la necesidad de mejorador para los tres tratamientos fueron los siguientes:

El cálculo de la necesidad de mejorador se hizo con base en la ecuación presentada en el apartado 2.5.1.2.2.:

$$NMH = \left(\frac{PSIi - PSIf}{100} \right) \cdot CIC \cdot P \cdot DA \cdot 10^5$$

Los datos utilizados fueron: $CIC = 58 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$; $P = 0.3 \text{ m}$; $DA = 1040 \text{ kg m}^{-3}$ (estos datos se tomaron de los resultados de los análisis del sitio experimental, capítulo 4.4.)

Para los casos planteados, y considerando un valor de 23.2×10^6 miliequivalentes de calcio aportados por tonelada del polisul, se tuvieron los valores siguientes de polisul a aplicar:

a. Tratamiento I:

- $PSIi = 96.6$; $PSIf = 82$

- $NMH = 264 \times 10^6$ meq. de calcio

-se requieren 11.3 ton de polisul

-densidad del polisul, 1.3 kg L^{-1} ; 1 ton de polisul = 769 litros

-litros de polisul por hectárea para el tratamiento I = 8330

-litros de polisul para 30 m^2 del tratamiento I = 25

b. Tratamiento II:

- $PSIi = 96.6$; $PSIf = 68$

- $NMH = 528 \times 10^6$ meq. de calcio

-litros de polisul para 30 m^2 del tratamiento II = 50

c. Tratamiento O:

En el caso del tratamiento O, en el que se buscó sólo lavar sales, la cantidad de agua necesaria para el lavado se calculó en base a la ecuación de Volobúyev (Aceves, 1981), la cual tiene la forma

$$L = \log \frac{CE_i}{CE_f}$$

Donde L = lámina de lavado en metros, CE_i es la conductividad eléctrica inicial, y CE_f la conductividad eléctrica final, a la que se desea llevar al suelo.

De acuerdo con esta ecuación, la cantidad de agua necesaria para abatir la conductividad eléctrica del suelo a los niveles requeridos, es muy baja. Por ejemplo, una reducción a una conductividad eléctrica de 70 dS m^{-1} requeriría sólo de 10 cm. de lámina. Pero como esta cantidad de agua es muy pequeña, se decidió aplicar 16 cm. de lámina, que de acuerdo con la ecuación, abatiría la conductividad eléctrica a un valor de 60 dS m^{-1} .

La necesidad de agua para disolver el sulfato de calcio que se forma a partir de la reacción del polisulfuro de calcio con el agua es, sin embargo, muy grande. Considerando que la solubilidad del sulfato de calcio es de 30 me L^{-1} , se requiere de una lámina de 88 cm. para el tratamiento I, y de 166 cm. para el tratamiento II. Estas son cantidades de agua muy elevadas, de las cuales no se dispone en la zona, por lo cual, se aplicaron sólo acompañadas de una fracción del agua necesaria, y contando con el agua aportada por la estación de lluvias, para completar la disolución del mejorador bajo estas condiciones.

El agua para los lavados se aplicó por inundación; se inició con una lámina de unos 5 cm con la finalidad de llevar al suelo a capacidad de campo. Posteriormente, la cantidad de agua aplicada se fue evaluando con base en la altura alcanzada por el agua en el interior de las parcelas, medida con una escala ubicada en la parte central de cada una. La cantidad final aplicada a cada tratamiento fue de:

- a. **Tratamiento O:** 16 cm
- b. **Tratamiento I:** 40 cm
- c. **Tratamiento II:** 60 cm

De acuerdo con lo anterior, entonces, la cantidad de mejorador aplicado fue excesiva, ya que no se aplicó toda el agua que se requería; sin embargo, dado que en este caso la cantidad de mejorador no era una limitante, se decidió aplicarla, con el fin de evaluar su grado de reacción en el suelo y tomando en cuenta la llegada de la temporada de lluvias,

que podría auxiliar a la recuperación. El grado de mejoramiento alcanzado en el suelo se evaluó a partir de un muestreo y posterior análisis de salinidad y sodicidad, por parcela, realizado al final de la aplicación de los lavados, y también al final de la época de lluvias. Los análisis se practicaron en muestras compuestas, constituidas por 5 submuestras tomadas en cada parcela, en las esquinas y el centro.. Los resultados se analizaron estadísticamente.

3.2.5. Establecimiento de halófitas

Después de la aplicación de los tratamientos de recuperación del suelo, cada parcela fue subdividida, con el fin de delimitar en su interior 15 unidades de 1 m², en tres hileras separadas por 2 pasillos, como se muestra en la figura 3.2.4. Cada m² se utilizó como una unidad experimental para llevar a cabo la siembra de halófitas. De este modo, se sembraron o plantaron en cada parcela un total de 15 especies de halófitas, incluyendo especies nativas y especies que se utilizan en la pastización y forestación.

El siguiente cuadro muestra las especies utilizadas, señalando si fueron introducidas por semilla (s) o trasplante (t), y en su caso los gramos de semilla utilizados; en el caso de las especies trasplantadas, se introdujeron 5 individuos (o “tepes” en el caso de los pastos) por unidad experimental:

Especie	Siembra	g semilla m ⁻²
<i>Hordeum jubatum</i>	(t)	
<i>Sporobolus pyramidatus</i>	(s)	1
<i>Distichlis spicata</i>	(t)	
<i>Eragrostis obtusiflora</i>	(t)	
<i>Suaeda torreyana</i> 1	(s)	2
<i>Suaeda torreyana</i> 2	(s)	2
<i>Heliotropium curassavicum</i>	(t)	
<i>Sesuvium portulacastrum</i>	(s)	2
<i>Spergularia marina</i>	(s)	0.2
<i>Bassia hyssopifolia</i>	(s)	2
<i>Atriplex semibacatta</i>	(s)	4
<i>Atriplex muricata</i>	(s)	2
<i>Kochia scoparia</i>	(s)	2
<i>Tamarix chinensis</i>	(t)	
<i>Tamarix aphylla</i>	(t)	

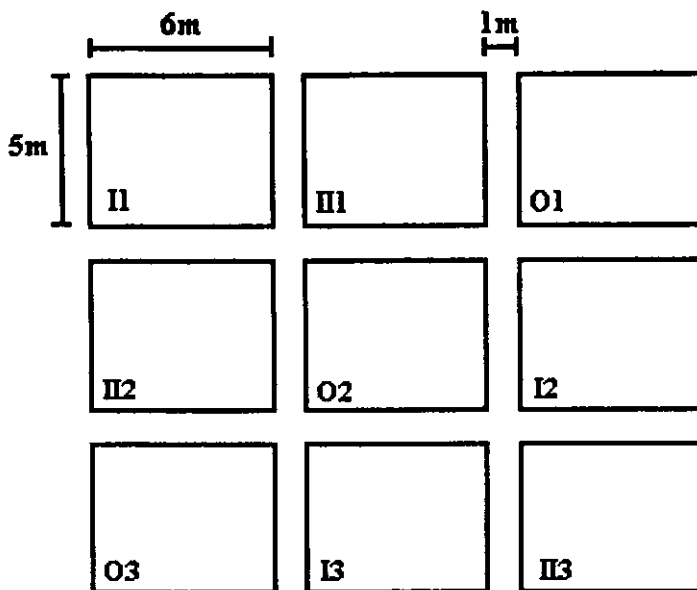


Figura 3.2.3. Diseño de los tratamientos en el área experimental

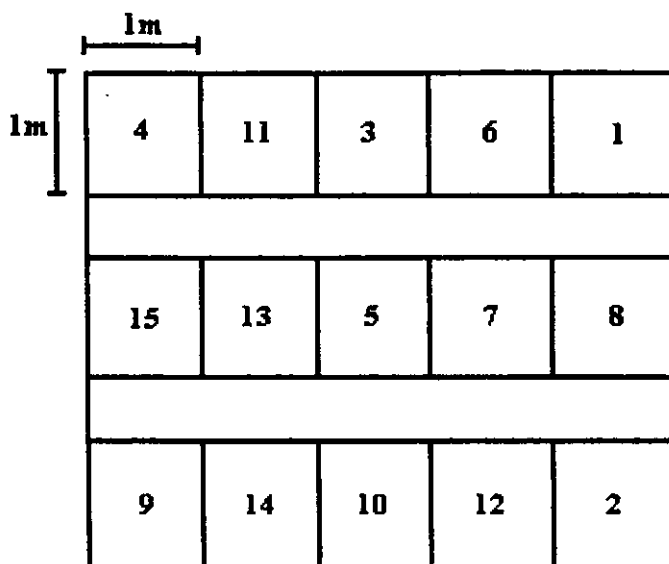


Figura 3.2.4. Disposición de las especies introducidas en las parcelas experimentales (se ilustra la parcela I-1). Los números corresponden a las especies citadas en el texto.

La disposición de las especies dentro de cada parcela se ubicó al azar. En el caso de las especies que se introdujeron por semilla, la siembra se realizó mediante cinco "microsurcos" en los que se depositaron las semillas, a una profundidad no mayor de 1 cm., siendo posteriormente cubiertas.

El material de *Kochia scoparia*, *Tamarix chinensis* y *T. aphylla* fue proporcionado por la Gerencia del Proyecto lago de Texcoco. El resto del material se obtuvo de la misma zona del ex-lago de Texcoco, a excepción de la semilla de *Bassia hyssopifolia*, que se colectó en las cercanías de Ixmiquilpan, Edo. de Hidalgo. En lo que respecta a *Suaeda torreyana*, se colectaron y sembraron por separado semillas correspondientes a lo que parecen ser dos fenotipos distintos, denominados en este trabajo como 1 y 2.

La introducción de las especies se realizó los días 16 y 17 de junio de 1997. La mayoría de las especies no lograron germinar o establecerse, pero a las que sí lo lograron, se permitió que se desarrollaran hasta fines del mes de septiembre, cuando llega el final de la época de lluvias (y finaliza la época de crecimiento para las especies nativas del área del ex-lago de Texcoco). En este momento se realizó la cosecha de la parte aérea de las especies que lograron establecerse, la cual fue secada al aire y pesada, con la excepción de las especies de *Tamarix*, para las cuales sólo se realizó un conteo del número de individuos sobrevivientes; los resultados se sometieron a un análisis estadístico.

3.2.6. Análisis de difracción de rayos X

Con el fin de contribuir al conocimiento de las sales y arcillas presentes en la zona, en el mismo perfil donde se tomaron muestras mensualmente, se hizo un muestreo por capas, obteniéndose un total de 15 muestras, incluyendo la costra superficial. A estas muestras se sumó una muestra de la profundidad 0-30 cm del área sujeta a recuperación. Estas muestras se sometieron a análisis de difracción de rayos X.

De cada muestra se hicieron dos determinaciones básicas: material completo (polvo desorientado) y arcillas separadas. En el primer caso, una porción de suelo fue molida en un mortero de ágata, y el polvo sometido directamente al análisis de rayos X.

Para el análisis de arcilla, se llevó a cabo primero la separación de las mismas, utilizando la metodología descrita por Gee y Bauder (1986). Se tomaron 10 gramos de suelo, a los

cuales se aplicaron varios lavados de hipoclorito de sodio con el fin de eliminar la materia orgánica, separando el hipoclorito de cada lavado por centrifugación a 1500 rpm. Cuando los lavados dejaron de tener coloración, se procedió a la dispersión del material mediante ultrasonido. En seguida, las arenas se separaron mediante un tamiz de malla 325. De la suspensión resultante, conteniendo limos y arcillas, las arcillas se separaron por decantación, agitando la suspensión y dejándola reposar el tiempo adecuado para que de acuerdo con la ley de Stokes, los limos se sedimenten (27 minutos 46 segundos, para el recipiente utilizado); la suspensión sobrenadante contiene las arcillas.

La preparación de las arcillas para el análisis de rayos X siguió la metodología señalada por Whittig y Allardice (1986). Se tomó una porción de las arcillas obtenidas, la cual fue sometida a saturación con magnesio, aplicando 5 lavados con cloruro de magnesio 0.5 M con pH 4.0, y después lavando con metanol al 50%, separando cada lavado mediante centrifugación. Por último, las muestras se concentraron con una centrífuga de alta velocidad, a 10,000 rpm. Para el análisis de rayos X propiamente dicho, las arcillas se orientaron colocando aproximadamente 0.5 ml. de la suspensión de arcillas en un portaobjetos de vidrio, extendiendo la suspensión por toda la superficie, y dejándola secar. Se realizaron cuatro preparaciones para cada muestra de arcillas:

a. arcillas sin tratamiento

b. arcillas saturadas con etilenglicol (exponiéndolas a vapores de etilenglicol durante la noche)

c. arcillas calcinadas a 450 °C

d. arcillas calcinadas a 550 °C

Estos tratamientos son necesarios para poder diferenciar distintos tipos de arcillas a partir de los difractogramas resultantes.

En el caso de las preparaciones de arcillas orientadas, las condiciones en que fueron expuestas a los rayos X, fueron: 2 / 32 / 0.05 / 3 (ángulo de incidencia de los rayos X de 2 a 32 grados, con intervalos de 0.05 grados y 3 segundos de duración por intervalo). Para el polvo completo desorientado, las condiciones fueron: 2 / 62 / 0.05 / 3.

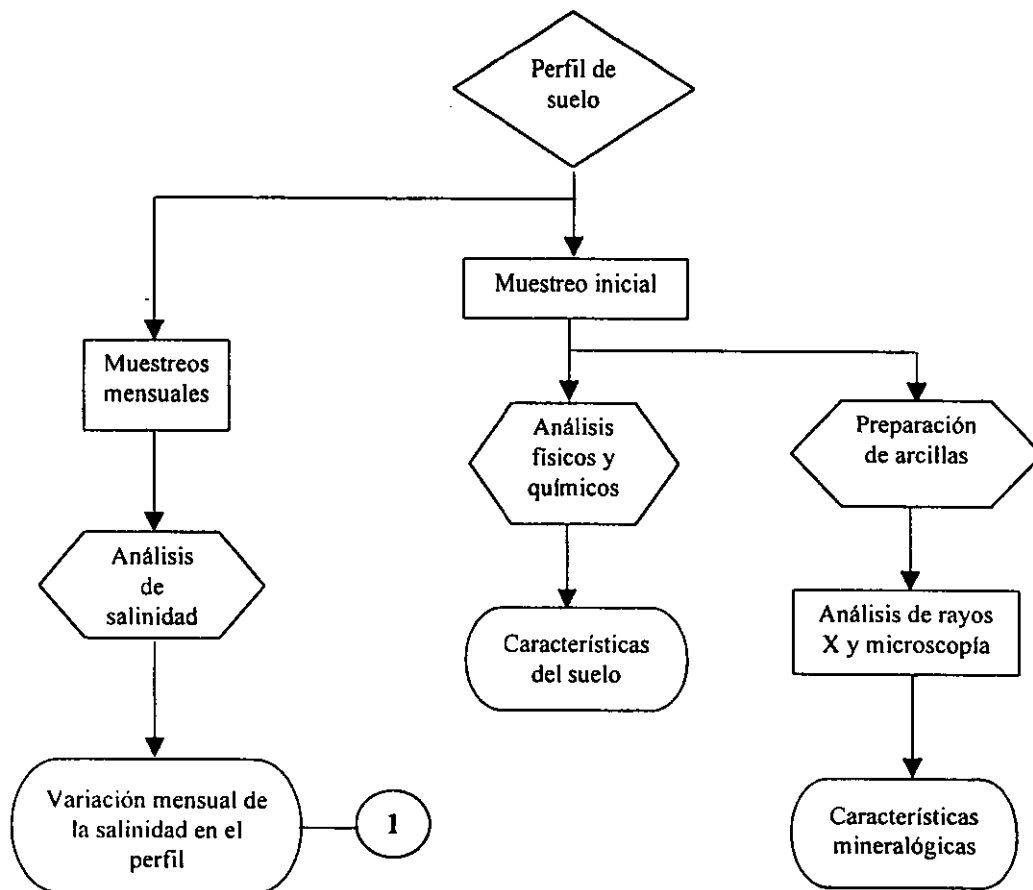
El equipo utilizado fue un difractómetro Siemens D-500 perteneciente a la Universidad de Valencia, España. Los 5 difractogramas que se obtuvieron para cada muestra fueron impresos e interpretados en el Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM.

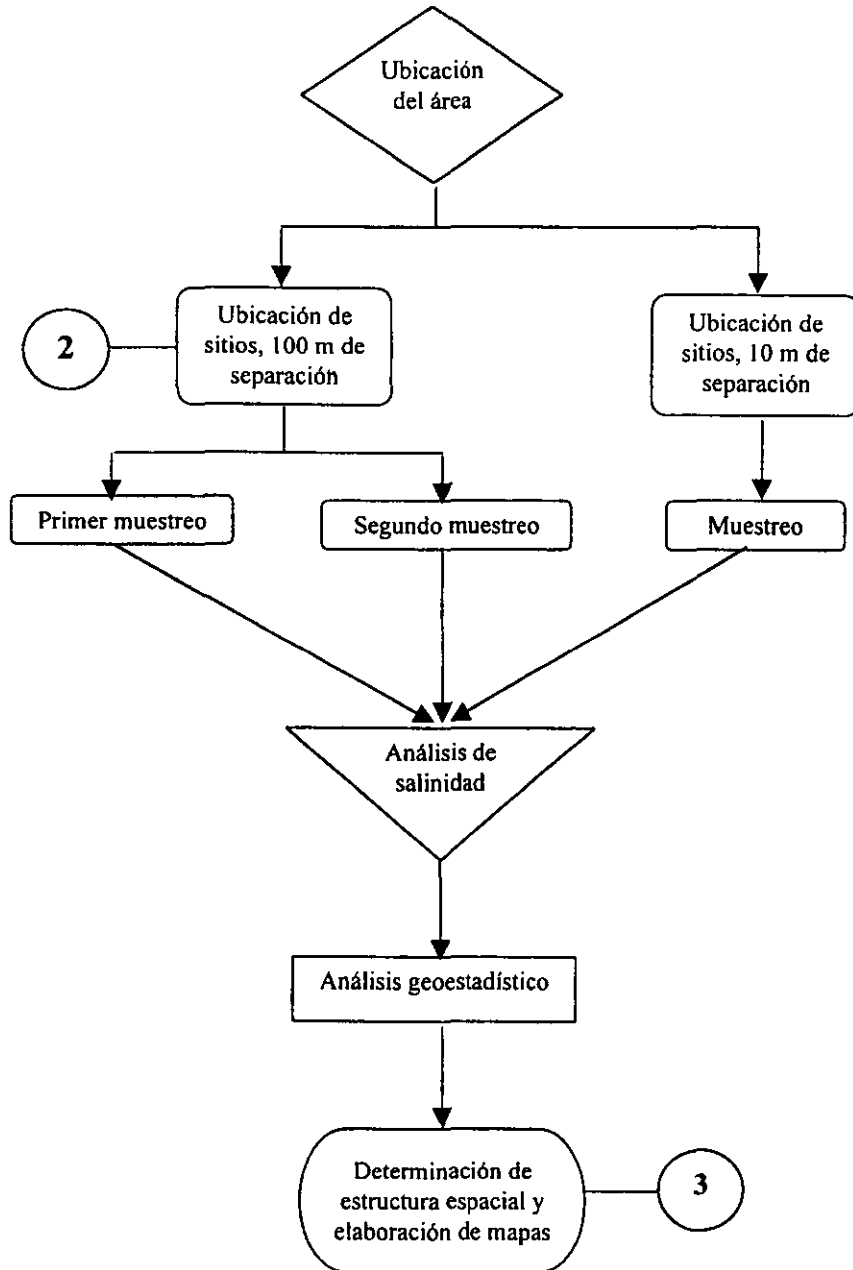
3.2.7. Microscopía electrónica

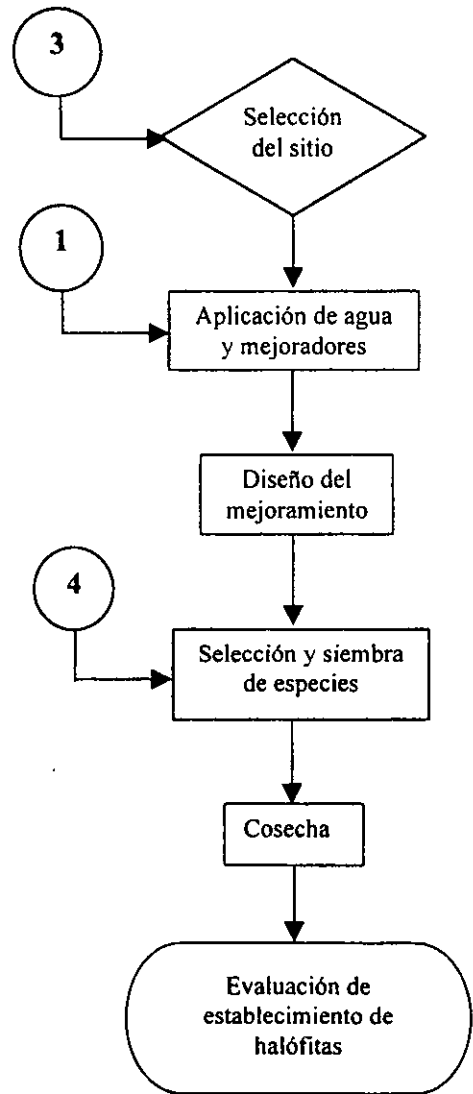
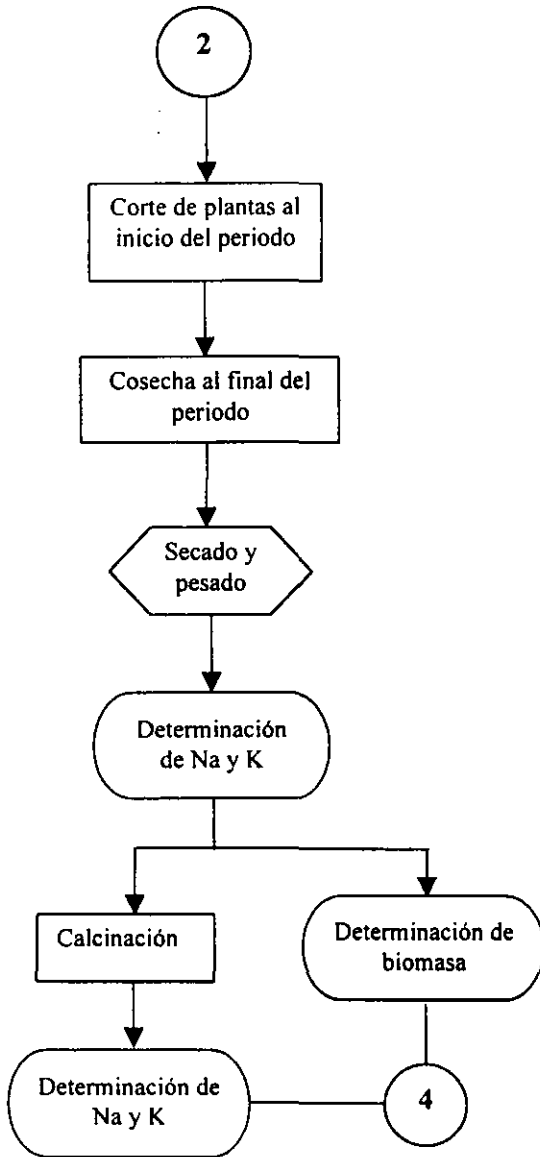
Con el fin de observar las características de las arcillas presentes y posibles cristales de sales a través de un microscopio electrónico, material inalterado y arcillas separadas de las mismas muestras utilizadas para el análisis de rayos X se preparó para ser visualizado a través de un microscopio electrónico de barrido Hitachi S-4100, perteneciente a la Universidad de Valencia, España. Varias imágenes fueron obtenidas con este microscopio.

3.2.8. Resumen

Los siguientes diagramas de flujo presentan las fases que componen el trabajo realizado:







4. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1. CARACTERISTICAS DEL SUELO Y VARIACION MENSUAL DE LA SALINIDAD EN UN PERFIL

4.1.1. Análisis físico y químico del perfil

Se presentan los resultados de los análisis practicados en las muestras correspondientes a un perfil de la zona de estudio durante el mes de septiembre. La textura (cuadro 4.1.1.) es predominantemente arcillosa a lo largo del perfil, con porcentajes de arcilla que en general oscilan entre 40 y más de 50%, aunque con acumulación de arenas en algunos sitios del perfil, particularmente a partir de 150 cm., donde el suelo adquiere textura franca arcillosa y aún franca arenosa, alcanzando porcentajes de arena de 65% en la profundidad de 170 cm. El porcentaje de limo varía de alrededor de 10 a 40% en la mayor parte de la profundidad, a excepción de la superficie, donde alcanza hasta 47%, correspondiendo la textura a limo arcilloso en esta porción del perfil.

La predominancia de la textura arcillosa encontrada en la mayor parte del perfil estudiado es característica de los suelos del ex-lago de Texcoco (Velázquez y Luna, 1981), siendo en gran medida responsable de las características poco favorables para el manejo de estos suelos, entre ellas una baja permeabilidad y una alta plasticidad. Estas arcillas, permanecen saturadas con humedad en un porcentaje muy elevado, (superior al 200%), y corresponden al material que ha sido denominado comúnmente "jaboncillo". Algunos autores reportan que el jaboncillo corresponde a materiales amorfos (Ramírez, 1985), aunque también está constituido, en gran parte, por montmorillonita, como se verá más adelante. La montmorillonita es muy importante en la manifestación de las características de estos suelos, ya que se trata de una arcilla expandible, pero además, al estar saturada con sodio, se expande en mayor proporción aún (Shainberg, 1975), lo que contribuye a la baja permeabilidad de estos suelos.

La capacidad de retención de agua de estos suelos es alta, con valores de capacidad de campo de alrededor de 90 a más de 120% y los contenidos de agua en el punto de marchitez permanente son de alrededor de 50 a más de 60%; esto puede explicarse por la naturaleza arcillosa de estos suelos así como por la presencia de amorfos (Huez *et al.* 1989). En las capas menos arcillosas la retención de agua es menor. Sin embargo, como señala Ramírez (1985), el jaboncillo presenta un secado irreversible, es decir, si el suelo saturado de

humedad se colecta, y después se seca y se vuelve a humedecer, ya no alcanza el mismo nivel de humedad que tenía en el campo. Puesto que para la determinación de los valores de CC y PMP por el método de olla y membrana de presión se utiliza suelo seco, es muy probable que los valores obtenidos sean menores a los que se presenten en condiciones naturales, en el terreno.

Cuadro 4.1.1. Análisis físicos del suelo

Prof. cm	Are-na %	Limo %	Arci-lla %	Textura	D.A. Mg m ⁻³	PMP %	CC %
0-10	10.2	44.5	45.3	Limo arcilloso	1.07	48.9	93.7
10-20	9.0	47.8	43.2	Limo arcilloso	1.06	55.4	104.8
20-30	18.1	39.0	42.8	Arcilloso	1.18	57.3	108.3
30-40	22.6	29.5	47.9	Arcilloso	1.16	58.5	116.5
40-50	15.5	34.4	50.1	Arcilloso	1.20	62.0	120.3
50-60	14.0	36.8	49.2	Arcilloso	1.16	59.5	118.6
60-70	21.8	27.2	51.0	Arcilloso	1.14	62.0	120.4
70-80	9.8	36.5	53.7	Arcilloso	1.18	62.7	120.6
80-90	49.1	11.6	39.3	Arcillo arenoso	1.13	56.9	105.3
90-100	38.3	13.2	48.5	Arcilloso	1.19	64.1	122.5
100-110	32.3	24.5	43.2	Arcilloso	1.16	59.2	116.3
110-120	29.8	22.7	47.5	Arcilloso	1.18	61.5	118.5
120-130	12.8	36.4	50.8	Arcilloso	1.17	63.3	120.2
130-140	30.3	24.3	45.4	Arcilloso	1.14	63.0	119.0
140-150	30.5	25.9	43.6	Arcilloso	1.09	59.9	109.4
150-160	52.6	19.6	27.8	Franco arcillo-arenoso	1.17	47.5	85.8
160-170	14.2	33.5	52.3	Arcilloso	1.17	63.4	116.6
170-180	65.4	19.3	15.3	Franco arenoso	1.13	26.2	48.1
180-190	27.4	36.4	36.2	Franco arcilloso	1.10	35.2	75.0
190-200	30.0	34.2	35.8	Franco arcilloso	1.11	42.3	87.5

De acuerdo con las cartas de color Munsell, el color del suelo en seco varía de gris claro a negro (cuadro 4.1.2.), dominando los tonos 2.5Y, mientras que en húmedo los colores se oscurecen, dominando los tonos 10YR y los colores oscuros o negros, con valores 2 o 3 e intensidades 1 o 2. Muy probablemente los colores negros corresponden a la presencia de

sulfuros en el suelo, ya que si el suelo húmedo se expone al aire, en algunas horas la coloración negra desaparece; además, la presencia de sulfuros ha sido reportada para suelos del área por Del Valle (1983). En este perfil es notable el cambio de coloración que se observa a partir de 180 cm, apreciándose tonalidades rojizas con un tono 7.5YR. También es notable la presencia de numerosos veteados en el perfil, que corresponden a grietas que se abren desde la superficie y que posteriormente se rellenan con materiales provenientes de ésta, y que en húmedo presentan tonalidades verdosas, que al igual que en el caso de los sulfuros, reflejan la presencia de condiciones de anaerobiosis en estos suelos, mismas que han sido reportadas para esta zona y otras similares, como la laguna del Carmen, Tlax. y el lago de Cuitzeo, Mich. donde favorecen la formación de carbonato de sodio y contribuyen a la alcalinidad del suelo (Santana *et al.*, 1989).

Cuadro 4.1.2. Color del suelo

Prof. cm	Color seco	Color húmedo
0-10	2.5Y 6/2 gris café claro	10YR 3/2 café grisáceo muy oscuro
10-20	2.5Y 5/2 café grisáceo	10YR 3/2 café grisáceo muy oscuro
20-30	10YR 5/2 café grisáceo	10YR 2/2 café muy oscuro
30-40	2.5Y 2.5/1 negro	10YR 2/1 negro
40-50	2.5Y 5/2 café grisáceo	10YR 3/2 café grisáceo muy oscuro
50-60	2.5Y 4/1 gris oscuro	2.5Y 2.5/1 negro
60-70	2.5Y 2.5/1 negro	10YR 2/1 negro
70-80	2.5Y 5/2 café grisáceo	10YR 3/1 gris muy oscuro
80-90	2.5Y 4/1 gris oscuro	2.5Y 2.5/1 negro
90-100	2.5Y 4/1 gris oscuro	2.5Y 2.5/1 negro
100-110	10YR 5/2 café grisáceo	10YR 3/2 café grisáceo muy oscuro
110-120	10YR 5/2 café grisáceo	10YR 3/1 gris muy oscuro
120-130	2.5Y 4/1 gris oscuro	2.5Y 2.5/1 negro
130-140	2.5Y 4/1 gris oscuro	2.5Y 2.5/1 negro
140-150	2.5Y 5/1 gris	2.5Y 3/1 gris muy oscuro
150-160	2.5Y 6/1 gris	2.5Y 3/2 café grisáceo muy oscuro
160-170	2.5Y 5/2 café grisáceo	10YR 3/2 café grisáceo muy oscuro
170-180	10YR 4/2 café grisáceo oscuro	10YR 2/2 café muy oscuro
180-190	7.5YR 3/2 café oscuro	7.5YR 2.5/1 negro
190-200	7.5YR 3/2 café oscuro	7.5YR 2.5/1 negro

Cuadro 4.1.2 (cont.) Color del suelo (vetas)

Prof. cm	Color seco	Color húmedo
50-100	2.5Y 6/2 gris café claro	2.5Y 3/2 café grisáceo muy oscuro
120-130	2.5Y 6/2 gris café claro	2.5Y 5/3 café olivo claro
170-180	2.5Y 6/2 gris café claro	2.5Y 4/2 café grisáceo oscuro
180-200	10YR 8/1 blanco	10YR 7/1 gris claro

Cuadro 4.1.3. Análisis físicos y químicos del suelo

Prof. cm	pH H ₂ O 1:2.5	MO %	Nt %	P ppm	CIC cmol+ kg ⁻¹	Fe ppm	Zn ppm	Cu ppm	Mn ppm
0-10	10.5	0.9	0.08	13.5	49.8	18.7	0.2	1.3	13.6
10-20	10.4	0.8	0.08	9.0	52.0	8.6	0.3	1.1	10.9
20-30	10.3	0.8	0.07	8.5	56.4	11.3	0.2	0.8	7.5
30-40	10.3	0.9	0.08	6.5	58.1	10.9	0.2	0.5	10.2
40-50	10.4	1.1	0.09	13.0	65.2	12.8	0.2	*	7.4
50-60	10.3	0.9	0.08	16.0	63.8	7.5	0.7	*	13.1
60-70	10.4	1.0	0.08	15.0	75.4	11.6	0.6	*	8.6
70-80	10.4	1.1	0.09	8.0	67.6	13.8	0.4	*	11.3
80-90	10.4	0.7	0.05	9.5	46.5	27.4	0.8	*	10.3
90-100	10.5	0.4	0.02	7.0	52.4	38.1	0.2	0.5	9.5
100-110	10.5	0.5	0.03	7.5	50.7	43.2	0.2	1.0	7.6
110-120	10.3	0.3	0.01	9.0	53.2	25.4	0.4	0.8	11.8
120-130	10.5	0.4	0.02	8.0	59.2	27.6	0.6	0.5	5.8
130-140	10.6	0.2	0.01	10.5	53.5	8.5	0.5	0.6	6.7
140-150	10.3	0.3	0.02	9.0	53.0	9.5	0.3	1.0	11.5
150-160	10.4	0.4	0.02	4.5	44.3	11.0	0.6	1.0	14.5
160-170	10.3	0.4	0.03	8.0	65.6	7.2	0.2	0.8	10.7
170-180	10.5	0.3	0.02	6.5	27.4	5.6	*	0.7	8.8
180-190	10.7	0.5	0.04	12.5	40.3	14.5	0.6	*	9.0
190-200	10.6	0.5	0.04	10.5	41.2	18.4	0.5	*	9.3

El cuadro 4.1.3. muestra algunos parámetros físicos y químicos del suelo. Particularmente notables son los altos valores de pH medido en agua que se presentan, siendo superiores a 10.3 y alcanzando en ocasiones 10.7, lo cual es un reflejo del alto grado de sodicidad presente en estos suelos, y que supera a los valores de pH encontrados en otros

suelos salinos. Por ejemplo, los suelos salinos de la zonas de Tláhuac y Xochimilco, D.F., dentro de la misma Cuenca de México, son moderadamente alcalinos, con pH medido en agua en relación 1:5 generalmente de 8 a 9, a pesar de presentar también altos valores de salinidad (Lugo, 1984; Vela y Flores, 1995); Pero a diferencia de estos suelos, que tienen altos niveles de materia orgánica (superior a 10%), en el ex-lago de Texcoco los contenidos de materia orgánica son bajos en general, ya que a pesar de que este suelo soporta una vegetación a base de *Suaeda torreyana* y *Distichlis spicata*, el nivel de desarrollo de ésta es muy escaso, de modo que el aporte de materia orgánica también lo es. Igualmente bajos son los niveles de nitrógeno total (menores de 0.1%) y de fósforo asimilable (menores de 16 ppm). Los niveles de fierro y manganeso pueden considerarse elevados, mientras que los de zinc y cobre son muy bajos aunque debe recordarse que se trata de micronutrientes, que son requeridos por las plantas en cantidades muy bajas. La capacidad de intercambio catiónico oscila entre menos de 30 y más de 75 cmol(+) kg⁻¹.

Los análisis de parámetros relacionados con salinidad y sodicidad se presentan en el cuadro 4.1.4. (de muestras tomadas en el perfil durante el mes de septiembre), y corresponden a análisis practicados en el extracto de pasta de saturación. El pH determinado en el extracto oscila entre 9.6 y 9.8, siendo menor que el valor determinado en agua, pero sigue siendo muy elevado; en comparación, en los suelos salinos de la zona costera del Pacífico, el pH oscila entre 4.9 y 8.9 (Ortiz, 1994a; Jiménez *et al.*, 1995), mientras que en otra cuenca cerrada similar, la de la laguna del Carmen, Tlax., el pH es similar al de Texcoco, con valores de 9 a 10 (Ramos, 1979). Los valores de conductividad eléctrica, medidos en el mismo extracto son muy elevados, con un rango que va desde más de 25 hasta más de 80 dS m⁻¹ (para comparación, el agua de mar posee una conductividad eléctrica que oscila entre 30 y 40 dS m⁻¹). Estos altos valores de conductividad eléctrica se reflejan básicamente en las concentraciones de cuatro iones solubles: sodio (entre 400 y 2000 mmol L⁻¹); cloruro (300 a 1400 mmol L⁻¹); carbonato (42 a 145 mmol L⁻¹), y sulfato (20 a 140 mmol L⁻¹). Acumulaciones de sales tan elevadas pueden encontrarse en cuencas cerradas o en zonas extremadamente áridas, así como en lagunas costeras hipersalinas. Por ejemplo, los suelos de las marismas de Nayarit y Sinaloa comúnmente presentan valores de CE de 50 a 100 dS m⁻¹, pero es posible encontrar valores de hasta 150 o 200 dS m⁻¹ (Ortiz, 1994a; Jiménez *et al.*, 1995); en el área de la Laguna Madre, Tamaulipas, la CE supera

comúnmente los 60 dS m⁻¹ (Ortiz, 1994b). En depresiones con acumulación de sales de las zonas áridas de San Luis Potosí, pueden alcanzarse valores de CE de cerca de 90 (Ortiz, 1980).

En estos suelos el catión dominante es el sodio, ya que los contenidos de potasio representan entre 5 y 10% de los contenidos de sodio, y las concentraciones de calcio y magnesio son sumamente bajas debido a la alta concentración de la solución de estos suelos, lo que ha llevado a la precipitación de sales menos solubles como las de calcio y magnesio, en particular carbonato y sulfato de calcio. Estas características de los suelos del área han sido reportadas por varios autores (Becerra, 1983; Huez *et al.*, 1989), y llevan a incluir a estos suelos dentro de los más salinos de México.

De este modo, la sal más abundante en el sitio es el cloruro de sodio, seguida por el carbonato de sodio y en menor proporción, el sulfato de sodio. Esta composición difiere de otros suelos salinos; por ejemplo, en las regiones costeras la sal dominante es el cloruro de sodio, y en algunos casos el cloruro de magnesio (Ortiz, 1994a), con mucho menor proporción de carbonato y sulfato de sodio. Las concentraciones relativas de sodio, calcio y magnesio presentes conducen a valores sumamente elevados de la relación de adsorción de sodio (RAS), la cual llega a alcanzar valores de más de 2000. Consecuentemente, el porcentaje de sodio intercambiable (PSI), calculado a partir de la RAS, resulta también sumamente alto, con valores superiores al 90% en la mayor parte del perfil, y alcanzando 97% en la profundidad de 150 a 170 cm. Estos valores son típicos para la zona central del ex-lago de Texcoco, y los distinguen de otros suelos, donde el PSI es mucho menor; por ejemplo, en zonas costeras los valores máximos de PSI que se alcanzan son del orden de 50% (Ortiz 1994a, Jiménez *et al.*, 1995); en la Laguna del Carmen, Tlaxcala, son inferiores a 30% (Ramos, 1979); en el área de Xochimilco y Tláhuac, las concentraciones de sales de calcio son mucho mayores, disminuyendo considerablemente la RAS y con valores de PSI menores de 30 o 40%.

Hay que aclarar aquí que numerosos autores calculan el PSI a través de la relación entre los cationes intercambiables y la CIC. Como se ha señalado, este método conduce a serias sobreestimaciones del PSI; es así que se reportan valores de PSI muy elevados (60 a 80% o más) para el área de Xochimilco y Tláhuac (Lugo, 1984; Galicia, 1990), o incluso

superiores a 100, para el área de Texcoco (Becerra, 1983). El contenido de boro es muy bajo, al igual que reporta Huez *et al.* (1989).

Cuadro 4.1.4. Análisis de salinidad en el extracto de pasta de saturación

Prof. cm	CE dS m ⁻¹	pH	Na ⁺ mmol L ⁻¹	K ⁺ mmol L ⁻¹	Ca ²⁺ mmol L ⁻¹	Mg ²⁺ mmol L ⁻¹	RAS	PSI
0-10	46.4	9.8	1130.4	61.3	0.5	0.3	1263.8	94.9
10-20	50.0	9.7	1086.9	70.3	0.65	0.45	1036.3	93.8
20-30	36.3	9.6	804.3	54.9	0.75	0.25	804.3	92.2
30-40	28.5	9.6	434.7	42.1	0.6	0.35	445.9	86.7
40-50	26.2	9.7	543.4	38.3	0.45	0.3	627.4	90.2
50-60	27.2	9.6	565.2	33.2	0.65	0.45	538.8	88.8
60-70	33.9	9.7	782.6	35.8	0.6	0.5	746.1	91.6
70-80	40.8	9.7	565.2	61.3	0.7	0.4	538.8	88.8
80-90	39.9	9.6	739.1	61.3	0.35	0.45	826.3	92.4
90-100	38.2	9.8	913.0	57.5	0.4	0.25	962.3	93.4
100-110	48.4	9.8	1195.6	76.7	0.4	0.25	1482.9	95.6
110-120	50.3	9.7	1282.6	84.3	0.5	0.35	1391.1	95.3
120-130	51.3	9.8	1326.0	86.9	0.7	0.4	1264.2	94.9
130-140	56.5	9.8	1347.8	84.3	0.6	0.25	1461.8	95.5
140-150	58.7	9.7	1456.5	95.9	0.25	0.45	1740.8	96.2
150-160	67.0	9.7	1652.1	109.1	0.3	0.2	2336.4	97.1
160-170	82.2	9.7	2043.4	139.3	0.6	0.25	2216.3	97.0
170-180	58.2	9.8	1326.0	97.1	0.45	0.4	1438.2	95.4
180-190	58.8	9.9	1478.2	93.3	0.9	0.5	1249.3	94.8
190-200	54.5	9.8	1217.3	72.8	0.95	0.55	993.9	93.6

El perfil presenta un alto grado salinidad y sodicidad. De acuerdo con la clasificación propuesta por la SARH (1971), el suelo puede considerarse como extremadamente afectado, por su grado de salinidad, y excesivamente afectado, por sodicidad. La elevada conductividad eléctrica se manifiesta en forma de una costra de sales que se deposita en la superficie del suelo, al secarse ésta, y sobre todo en la estación seca del año. Por otro lado, los altos valores de PSI se reflejan en el alto grado de dispersión de las partículas coloidales de estos suelos, lo cual disminuye aún más la permeabilidad del suelo, creando condiciones de saturación de humedad, anaerobiosis y reducción.

Cuadro 4.1.4. (cont.) Análisis de salinidad en el extracto de saturación

Prof. cm	Cl ⁻ mmol L ⁻¹	CO ₃ ²⁻ mmol L ⁻¹	HCO ₃ ⁻ mmol L ⁻¹	SO ₄ ²⁻ mmol L ⁻¹	B ppm
0-10	794.5	116.1	13.2	42.0	0.3
10-20	710.8	92.5	15.1	37.8	0.4
20-30	530.6	97.1	23.3	32.0	0.1
30-40	287.8	42.5	24.3	19.6	*
40-50	350.5	57.5	22.4	27.4	*
50-60	347.6	69.1	27.3	23.8	*
60-70	507.2	95.5	18.7	31.5	0.1
70-80	384.5	48.1	14.9	26.5	*
80-90	460.0	80.1	19.0	33.6	*
90-100	628.3	85.2	13.2	42.5	0.3
100-110	828.1	102.2	25.7	51.3	*
110-120	884.7	111.5	24.5	54.5	*
120-130	931.0	137.5	23.4	69.2	*
130-140	980.5	107.1	19.5	80.4	*
140-150	1027.2	136.5	17.3	86.2	*
150-160	1138.5	142.5	10.6	81.3	*
160-170	1460.9	145.2	18.2	143.5	*
170-180	922.1	124.4	14.1	69.6	*
180-190	970.6	132.5	13.1	74.0	*
190-200	864.0	104.5	10.0	112.5	*

* = no detectado

Puesto que al excavar el perfil se observó la presencia de un manto freático aproximadamente a 150 cm., se procedió también a tomar una muestra de agua, cuyo análisis se presenta en el cuadro 4.1.5. El agua presenta una elevada salinidad, con características en general muy similares a las del suelo, con una conductividad eléctrica sumamente elevada, así como una alta RAS; asimismo, los iones que se presentan en las más altas concentraciones son el sodio y los cloruros. Esto es típico del agua de los mantos freáticos del área fuertemente afectada por salinidad del ex-lago de Texcoco; en cambio, en zonas aledañas la composición del agua puede variar, llegando a dominar los sulfatos y el magnesio (Huez *et al.*, 1989).

Cuadro 4.1.5. Análisis de agua del manto freático.

CE dS m ⁻¹	pH	Na ⁺ mmol L ⁻¹	K ⁺ mmol L ⁻¹	Ca ²⁺ mmol L ⁻¹	Mg ²⁺ mmol L ⁻¹	RAS	Cl ⁻ mmol L ⁻¹	CO ₃ ²⁻ mmol L ⁻¹	HCO ₃ ⁻ mmol L ⁻¹	SO ₄ ²⁻ mmol L ⁻¹
58.1	9.6	1339	84	0.25	0.4	1661	897	93	11.4	63

4.1.2. Variación mensual de la salinidad

Como se indicó anteriormente, en este perfil se realizó un muestreo mensual durante un año, y las muestras fueron sometidas exclusivamente a análisis de salinidad, en el extracto de pasta de saturación. El total de resultados se presentan en el apéndice A (cuadros A1 a A12). Por otro lado, estos resultados se sometieron a la determinación de una serie de parámetros estadísticos, los cuales, con excepción del pH, se presentan en los cuadros 4.1.6 a 4.1.16. La discusión siguiente se basa en los datos presentados en esos cuadros.

4.1.2.1. CONDUCTIVIDAD ELECTRICA Y pH

La variación mensual de la conductividad eléctrica se presenta en la figura 4.1.1., y algunos parámetros estadísticos en el cuadro 4.1.6. Se observa en general un patrón en la distribución de la conductividad eléctrica a lo largo del perfil, consistente en altos valores cerca de la superficie, los cuales disminuyen marcadamente a la profundidad de 30-70 cm., para posteriormente elevarse gradualmente hasta alcanzar un máximo que puede ser incluso superior al valor de la superficie, a la profundidad de 160-170 cm. En la superficie; los valores más altos son alcanzados durante el período de febrero a julio, abatiéndose estos valores durante el período de agosto a enero. Así, la conductividad eléctrica presenta a lo largo del año la mayor variación en la capa superficial de 0 a 20 cm., con coeficientes de variación de 15 a 26%; se mantiene relativamente constante en las profundidades de 30-60 y 100-140cm. durante todo el año, con coeficientes de variación reducidos, de 2 a 8 %, mientras que en la capas 60-100 y 150-180cm. presenta un incremento durante los meses de septiembre a enero, con coeficientes de variación de 7 a 10%. El incremento que se observa durante todo el año en la capa de 150-180 cm. probablemente se debe a la presencia del manto freático en esta zona del perfil, asimismo coincide con las capas menos arcillosas y más arenosas de la parte baja del perfil. Es probable que este cambio en la textura, de la parte baja más permeable a la parte alta menos permeable sea una barrera al ascenso de las

soluciones de sales más concentradas de la parte inferior del perfil. Por otro lado, los más altos coeficientes de variación encontrados en las capas superiores muestran que es en estas capas donde se da la mayoría de los cambios en la salinidad del suelo atribuibles a la estacionalidad, ya que en la temporada de lluvias los valores se abaten, mientras que en la estación seca se da un aumento notable en la salinidad; los menores coeficientes de variación de capas inferiores muestran una mayor constancia en la salinidad.

Cuadro 4.1.6. Características de la conductividad eléctrica (dS m⁻¹)

Prof. (cm)	Media	Mínimo	Máximo	Varianza	Desv. Est.	Coef. Var.
0-10	66.9	46.4	92.8	301.1	17.3	25.9
10-20	50.9	46.4	71.1	62.6	7.9	15.5
20-30	38.1	41.9	43.7	9.7	3.1	8.1
30-40	29.8	34.2	31.0	0.5	0.7	2.3
40-50	27.9	26.0	29.8	1.3	1.1	4.1
50-60	30.1	27.2	31.7	1.8	1.3	4.5
60-70	33.0	28.5	37.6	8.2	2.8	8.6
70-80	36.8	32.7	42.8	15.1	3.8	10.5
80-90	36.5	31.3	42.1	14.5	3.8	10.4
90-100	37.6	34.0	43.0	7.7	2.7	7.4
100-110	45.0	41.3	48.4	5.7	2.3	5.3
110-120	49.4	47.2	51.5	1.4	1.2	2.4
120-130	51.4	49.1	53.6	1.6	1.2	2.4
130-140	54.5	52.1	58.0	3.9	1.9	3.6
140-150	57.1	52.5	60.1	4.4	2.1	3.6
150-160	62.2	55.6	69.1	21.5	4.6	7.4
160-170	73.7	63.2	82.2	29.1	5.4	7.3
170-180	63.7	58.2	71.2	17.7	4.2	6.6
180-190	59.1	56.5	62.0	2.1	1.5	2.6
190-200	57.1	53.6	59.4	3.2	1.8	3.1

Resultados similares han sido reportados por otros autores para distintos suelos. Ramos (1979) menciona para los suelos de la Laguna del Carmen, Tlaxcala, un aumento en la salinidad de las capas superficiales durante los meses secos del año que lleva a clasificar los suelos como salino-sódicos, y una disminución durante la época de lluvias que provoca que pasen a ser clasificados como sódicos (como se verá más adelante, esta situación también se presenta en el ex-lago de Texcoco, en suelos de baja salinidad). Ortiz (1995b) reporta una disminución de más de 51 a 26 dS m⁻¹ en un suelo de la zona costera de Nayarit con *Salicornia bigelovii*, y el mismo autor (Ortiz, 1988b) señala que un suelo salino de la zona

árida de San Luis Potosí con *Allenrolfea occidentalis* presenta una disminución estacional de la CE de más de 80 a menos de 30 dS m⁻¹. En todos estos casos, la disminución de la CE abarca sólo las capas superficiales del suelo, con las capas más profundas manteniendo una mayor estabilidad en la salinidad a lo largo del año. El aumento en la salinidad durante la estación seca es sin duda producido por la evaporación del agua en la superficie del suelo, ya que Ramos (1979) reporta que no se presentan cambios estacionales en sitios con condiciones de inundación permanente, y en un caso extremo, Dagar *et al.* (1993) encontró que en suelos de manglares, durante la época de lluvias, las áreas que se inundan diariamente disminuyen su salinidad de 290 a 150 dS m⁻¹, mientras que sitios que están continuamente expuestos, y sujetos a evaporación, la reducen sólo a 280 dS m⁻¹.

La figura 4.1.2. muestra la variación del pH. En este caso, los valores son muy similares durante todo el año, variando sólo en unas cuantas décimas de pH, con valores mínimos observados de 9.6 y máximos de 9.9. Hay que hacer notar que los valores de 9.6 se encontraron sólo en las capas de 20 a 90 cm., y en los meses de septiembre a enero, mientras que los valores de 9.9 se presentaron en capas inferiores a 130 cm. Aparte de estos datos, el pH no presentó cambios marcados a lo largo del año, situación también observada por Ramos (1979) en la Laguna del Carmen.

4.1.2.2. CATIONES SOLUBLES

Los cuadros 4.1.7. a 4.1.10. muestran valores de parámetros estadísticos de los cationes solubles del suelo.

En el caso del sodio, su distribución se muestra en la figura 4.1.3. En la capa superficial se observan los mayores cambios, llegándose a alcanzar concentraciones de más de 2000 mmol L⁻¹ durante el periodo de marzo a junio; la concentración disminuye en las profundidades de 30 a 70 cm., volviendo a aumentar con la profundidad y alcanzando un máximo en la capa de 160-170 cm. En las capas inferiores del suelo (110-200 cm.) se presentaron los coeficientes de variación más bajos, de 2 a 8%, mientras que por encima de estas capas los coeficientes de variación fueron más altos, alcanzando más de 10% en la mayoría de los casos y más de 22% en la capa superficial.

En general, se observa una tendencia similar a la observada con la conductividad eléctrica, lo cual es lógico pues en estos suelos la mayor parte de las sales son de sodio; resultados similares presentan Ramos (1979) y Ortiz (1988b).

Cuadro 4.1.7. Características del sodio (mmol L^{-1})

Prof. (cm)	Media	Mínimo	Máximo	Varianza	Desv. Est.	Coef. Var.
0-10	1561	1130	2125	125573	351.3	22.6
10-20	1151	976	1466	17854	133.6	11.5
20-30	778	680	1086	13322	115.4	14.8
30-40	554	434	670	1165	66.8	12.0
40-50	526	480	563	659	25.6	4.8
50-60	587	531	632	1134	33.6	5.7
60-70	674	538	806	8062	89.7	13.3
70-80	704	565	858	8569	92.5	13.1
80-90	710	627	821	3427	58.5	8.2
90-100	860	695	989	8047	89.7	10.4
100-110	968	825	1201	18385	135	13.9
110-120	1193	1033	1282	5369	73.2	6.1
120-130	1266	1180	1341	2115	49.5	3.9
130-140	1339	1287	1415	1266	35.5	2.6
140-150	1412	1320	1475	1711	41.3	2.9
150-160	1546	1410	1676	7263	58.2	5.5
160-170	1790	1606	2043	14636	120.9	6.7
170-180	1522	1326	1768	15004	122.4	8.0
180-190	1381	1285	1478	3883	62.3	4.5
190-200	1329	1217	1417	2879	53.6	4.0

La variación del potasio se muestra en la figura 4.1.4., y algunos parámetros estadísticos en el cuadro 4.1.8. Si bien los contenidos de potasio fueron mucho más bajos que los de sodio, sus patrones de distribución son muy similares, con los valores más altos en las capas superficiales y durante el periodo de marzo a junio, disminuyendo hasta un mínimo en la profundidad de 60 a 70 cm. y aumentando nuevamente hasta el máximo a 160-170 cm. para después disminuir nuevamente. Los coeficientes de variación a lo largo del año para las diversas profundidades son, sin embargo, más altos en la superficie (45%) y en las capas subsuperficiales (de 10 a 22%), aunque disminuyen a menos de 10 % a partir de 90 cm.

Cuadro 4.1.8. Características del potasio (mmol L⁻¹)

Prof. (cm)	Media	Mínimo	Máximo	Varianza	Desv. Est.	Coef. Var.
0-10	95	61	194	1916	43.7	45.8
10-20	79	56	106	181	13.4	16.8
20-30	68	52	92	233	15.2	22.3
30-40	49	40	59	40	6.3	12.7
40-50	38	32	44	12	3.5	8.9
50-60	36	30	42	11	3.3	9.2
60-70	33	29	39	9	3.0	9.0
70-80	54	42	62	39	6.2	11.3
80-90	61	58	68	10	3.2	5.3
90-100	67	57	78	37	6.1	8.9
100-110	73	69	77	7.4	2.7	3.7
110-120	76	69	84	17	4.1	5.4
120-130	83	79	86	6	2.5	3.0
130-140	83	79	89	11	3.3	4.0
140-150	91	87	95	6	2.5	2.8
150-160	120	109	129	29	5.4	4.5
160-170	130	125	139	16	4.0	3.1
170-180	108	93	122	78	8.8	8.2
180-190	93	86	106	30	5.5	5.9
190-200	80	72	89	20	4.1	5.5

Los contenidos de calcio y magnesio fueron muy bajos en comparación con el sodio y el potasio, con valores menores de 0.8 mmol L⁻¹. Como se muestra en las figuras 4.1.5. y 4.1.6. y en los cuadros 4.1.9. y 4.1.10, a lo largo del año, su distribución fue muy irregular y no se observan tendencias claras de incremento o disminución; sólo con la profundidad se observa un claro incremento en las capas inferiores de 180 a 200 cm. en comparación con las superiores, aunque este cambio no es estacional. Los coeficientes de variación fueron muy elevados, con valores que van de 9 a 31% para el calcio, y de 12 a 33% para el magnesio, con excepción de la señalada profundidad 180-200 cm., donde es de sólo 4-5 % y 6-8%, respectivamente. Aún cuando la variación de las concentraciones de calcio y magnesio es relativamente alta, debe considerarse que sus concentraciones son sumamente bajas. En comparación, en suelos menos salinos del área de Montecillos, en los alrededores del ex-lago de Texcoco, los contenidos de calcio y magnesio son más altos, y en la época de lluvias se da un incremento en su concentración en la fase soluble, mientras que en la época seca se precipitan (Del Valle, 1983).

Cuadro 4.1.9. Características del calcio (mmol L⁻¹)

Prof. (cm)	Media	Mínimo	Máximo	Varianza	Desv. Est.	Coef. Var.
0-10	0.41	0.35	0.50	0.001	0.03	9.3
10-20	0.50	0.40	0.65	0.004	0.06	13.1
20-30	0.61	0.45	0.75	0.006	0.08	13.5
30-40	0.58	0.45	0.80	0.013	0.11	19.9
40-50	0.47	0.40	0.55	0.002	0.05	11.3
50-60	0.45	0.05	0.65	0.021	0.14	31.8
60-70	0.48	0.35	0.60	0.007	0.08	17.8
70-80	0.55	0.35	0.70	0.010	0.10	18.5
80-90	0.49	0.35	0.60	0.004	0.07	14.2
90-100	0.54	0.40	0.65	0.006	0.07	14.3
100-110	0.48	0.40	0.55	0.004	0.06	13.9
110-120	0.53	0.40	0.65	0.005	0.07	14.0
120-130	0.53	0.40	0.70	0.009	0.09	18.4
130-140	0.54	0.45	0.65	0.004	0.06	12.3
140-150	0.40	0.25	0.50	0.005	0.07	17.9
150-160	0.42	0.15	0.60	0.017	0.13	31.1
160-170	0.52	0.25	0.70	0.011	0.10	19.9
170-180	0.50	0.40	0.80	0.011	0.10	21.3
180-190	0.82	0.75	0.90	0.002	0.04	5.4
190-200	0.86	0.80	0.95	0.001	0.03	4.4

Cuadro 4.1.10. Características del magnesio (mmol L⁻¹)

Prof. (cm)	Media	Mínimo	Máximo	Varianza	Desv. Est.	Coef. Var.
0-10	0.31	0.25	0.40	0.002	0.04	14.4
10-20	0.28	0.20	0.45	0.005	0.07	26.6
20-30	0.30	0.25	0.40	0.003	0.05	18.2
30-40	0.36	0.30	0.50	0.002	0.05	13.9
40-50	0.37	0.20	0.50	0.006	0.07	20.8
50-60	0.38	0.30	0.45	0.002	0.05	13.4
60-70	0.33	0.20	0.50	0.012	0.11	33.8
70-80	0.35	0.20	0.55	0.01	0.10	28.5
80-90	0.30	0.20	0.45	0.005	0.07	24.7
90-100	0.37	0.25	0.50	0.007	0.08	23.2
100-110	0.28	0.15	0.35	0.005	0.07	25.4
110-120	0.36	0.25	0.40	0.002	0.04	12.4
120-130	0.35	0.20	0.45	0.005	0.07	20.3
130-140	0.39	0.25	0.50	0.005	0.07	18.8
140-150	0.35	0.20	0.45	0.006	0.07	22.1
150-160	0.33	0.20	0.45	0.009	0.09	29.0
160-170	0.34	0.25	0.50	0.006	0.08	24.3
170-180	0.34	0.25	0.45	0.005	0.07	20.9
180-190	0.52	0.45	0.55	0.001	0.03	6.5
190-200	0.51	0.45	0.55	0.002	0.04	8.8

4.1.2.3. RAS Y PSI

Las figuras 4.1.7. y 4.1.8. y los cuadros 4.1.11. y 4.1.12. muestran las características de la distribución espacial y temporal de la RAS y el PSI. Siendo una relación entre los cationes solubles Na^+ , Ca^{+2} y Mg^{+2} , y considerando la dominancia del primero de ellos, la relación de adsorción de sodio sigue un patrón muy similar al del sodio, con altos valores (más de 2000) en las capas superficiales durante los meses de marzo a junio, disminuyendo en la capa 30-60 cm. y con un máximo en la capa 150-170 cm, aunque la disminución que se da a continuación en la capa de 180 a 200 cm. es más marcada que para el sodio solo, debido al incremento en concentración de calcio y magnesio en esta capa. Los coeficientes de variación tienen un amplio rango, entre 4 y 20%. El porcentaje de sodio intercambiable, derivado de la RAS, tiene la misma tendencia de ésta, aunque los coeficientes de variación resultan ser muy reducidos en todos los casos, con un máximo de 1.5%, debido esto a que la elevada RAS produce en todos los casos valores de PSI muy similares, que oscilan en un rango muy estrecho, de 86 a 96%.

Cuadro 4.1.11. Características de la RAS

Prof. (cm)	Media	Mínimo	Máximo	Varianza	Desv. Est.	Coef. Var.
0-10	1831	1263	2453	146615	382	20.9
10-20	1311	1035	1752	43141	207	15.8
20-30	816	687	1144	14445	120	14.7
30-40	573	433	706	8824	93	16.3
40-50	572	505	650	1986	44	7.7
50-60	658	538	991	13804	117	17.8
60-70	747	601	901	9373	96	12.9
70-80	747	538	953	15459	124	16.6
80-90	797	689	890	2915	53	6.7
90-100	898	695	1072	12889	113	12.6
100-110	1118	913	1519	51547	227	20.2
110-120	1270	1033	1459	16600	128	10.1
120-130	1353	1168	1602	12946	113	8.4
130-140	1397	1246	1498	4170	64	4.6
140-150	1634	1442	1816	12950	113	6.9
150-160	1834	1528	2685	120362	346	18.9
160-170	1949	1745	2426	44908	211	10.8
170-180	1672	1283	1917	32990	181	10.8
180-190	1191	1105	1294	3171	56	4.7
190-200	1133	993	1221	3903	62	5.5

Una disminución de la RAS puede deberse a una disminución de la concentración de sodio o a un aumento del calcio o el magnesio. Sin embargo, en este caso los niveles de sodio son tan elevados aún en época de lluvias que la RAS y el PSI permanecen elevados todo el año. En condiciones de menor salinidad, la sodicidad sí puede variar; Ramos (1979) observó en el área de la Laguna del Carmen cambios a lo largo del año en el PSI que llevaban a clasificar a los suelos como sódicos en la estación seca del año (con PSI >15), y como no sódicos en la estación húmeda (disminuyendo el PSI a menos de 15), cambios debidos fundamentalmente a la disminución estacional de la concentración de sodio.

Cuadro 4.1.12. Características del PSI

Prof. (cm)	Media	Mínimo	Máximo	Varianza	Desv. Est.	Coef. Var.
0-10	96	94	97	0.5	0.7	0.7
10-20	94	93	96	0.5	0.7	0.7
20-30	92	91	94	0.7	0.8	0.9
30-40	89	86	91	2.7	1.6	1.8
40-50	89	88	90	0.5	0.7	0.8
50-60	90	88	93	1.5	1.2	1.3
60-70	91	89	92	1.0	1.0	1.1
70-80	91	88	93	1.8	1.3	1.5
80-90	92	91	92	0.2	0.5	0.5
90-100	92	91	94	0.7	0.8	0.9
100-110	94	93	95	0.9	0.9	1.0
110-120	94	93	95	0.2	0.5	0.5
120-130	95	94	95	0.1	0.3	0.3
130-140	95	94	95	0.0	0.2	0.2
140-150	95	95	96	0.0	0.2	0.2
150-160	96	95	97	0.2	0.5	0.5
160-170	96	96	97	0.1	0.3	0.3
170-180	96	94	96	0.2	0.4	0.4
180-190	94	94	95	0.0	0.2	0.2
190-200	94	93	94	0.0	0.3	0.3

4.1.2.4. ANIONES SOLUBLES

En los cuadros 4.1.13 a 4.1.16. se presentan algunos parámetros estadísticos correspondientes a los aniones. En el caso de los cloruros, que son los aniones más abundantes, su distribución es muy similar a la del sodio, con el cual forman cloruro de sodio. Al igual que éste, su mayor concentración, por encima de 1000 mmol L⁻¹ se presenta en la capa superficial durante los meses de marzo a junio (figura 4.1.9.), los cuales

corresponden al final de la época seca del año, donde se da un ascenso de sales y acumulación en las capas superficiales, con el más alto coeficiente de variación (29%). La concentración de cloruros disminuye a un mínimo en la capa 30-60 cm. y aumenta nuevamente hasta un máximo a 160-170 cm. para de ahí hacia abajo volver a disminuir, con coeficientes de variación menores de 10 en la mayoría de los casos, lo cual muestra una constancia en la acumulación subsuperficial de sales. Rajpurohit y Sen (1979) encontraron un patrón similar de variación estacional en los cloruros de suelos de una zona árida de la India; en la capa superficial de 0-20 cm, los contenidos más bajos de cloruros, 0.03%, se presentaron en la época de lluvias, comparados con 1.23% en la estación seca; sin embargo, a partir de los 20 cm los cambios estacionales prácticamente desaparecieron.

Cuadro 4.1.13. Características de los cloruros (mmol L⁻¹)

Prof. (cm)	Media	Mínimo	Máximo	Varianza	Desv. Est.	Coef. Var.
0-10	1135	794	1629	112052	334	29.4
10-20	825	710	1016	7584	87	10.5
20-30	506	426	626	3101	55	11.0
30-40	364	287	408	1415	37	10.3
40-50	355	316	399	557	23	6.6
50-60	409	347	464	964	31	7.5
60-70	464	385	566	2674	51	11.1
70-80	453	384	521	1610	40	8.8
80-90	457	408	555	1451	38	8.3
90-100	566	495	620	1703	41	7.2
100-110	653	496	837	13836	117	17.9
110-120	828	725	884	2069	45	5.4
120-130	859	750	956	4324	65	7.6
130-140	941	826	1030	3486	59	6.2
140-150	1050	936	1189	5766	75	7.2
150-160	1108	968	1196	4582	67	6.1
160-170	1334	1139	1460	8453	91	6.8
170-180	1108	922	1318	13496	116	10.4
180-190	1022	936	1110	3246	59	5.5
190-200	962	864	1076	4296	65	6.8

Los carbonatos, ocupando el segundo lugar en concentración dentro de los aniones, presentan un patrón de distribución que difiere del de los cloruros, ya que como se observa en la figura 4.1.10 y en el cuadro 4.1.14, presenta una variabilidad mucho mayor en lo que a cambios temporales se refiere. Al igual que los cloruros, se presenta la mayor

concentración en la capa superficial, pero dentro de los meses de enero a marzo, lo cual puede ser debido a que, debido a su menor movilidad con respecto a los cloruros, el ascenso de los carbonatos es más lento. Su coeficiente de variación, sin embargo, fue mucho más elevado, notándose una considerable variación prácticamente a todas las profundidades, con valores mayores de 20% en la mayoría de los casos, y alcanzando más de 40%.

Cuadro 4.1.14. Características de los carbonatos (mmol L⁻¹)

Prof. (cm)	Media	Mínimo	Máximo	Varianza	Desv. Est.	Coef. Var.
0-10	173	116	261	2128	46.1	26.6
10-20	122	61	171	984	31.3	25.6
20-30	98	48	129	654	25.5	26.0
30-40	74	36	120	850	29.3	39.5
40-50	60	36	98	291	17.0	28.4
50-60	60	34	76	200	14.1	23.4
60-70	73	51	95	270	16.4	22.3
70-80	94	48	139	1172	34.2	36.3
80-90	84	39	125	796	28.2	33.2
90-100	88	27	132	1069	32.7	37.0
100-110	100	46	163	1807	42.5	42.5
110-120	120	54	162	1007	31.7	26.2
120-130	123	68	174	720	26.8	21.7
130-140	131	72	168	821	28.6	21.7
140-150	116	91	143	280	16.7	14.3
150-160	138	73	191	888	29.8	21.5
160-170	140	110	170	422	20.5	14.6
170-180	139	92	183	515	22.7	16.2
180-190	111	69	147	609	24.6	22.1
190-200	122	61	171	984	31.3	22.7

Los bicarbonatos son los únicos aniones que no presentan una mayor concentración en las capas superficiales (ver figura 4.1.11.), aunque su distribución es más constante en el perfil, sin tendencias a aumentar o disminuir, y con coeficientes de variación medios, de 5 a 19% (cuadro 4.1.15); sólo se observa disminución de estos coeficientes en la parte más baja del perfil. Es probable que la menor solubilidad de estas sales lleve a su precipitación en algunas épocas del año, y que este patrón de precipitación/disolución haya conducido a la distribución irregular que presentan en el perfil, influyendo en el desarrollo del mismo (Del Valle, 1983); en cambio, los cloruros, más solubles, permanecen en solución en su mayor

parte todo el año (excepto en la costra) y de esta manera pueden redistribuirse más rápidamente en el perfil y presentar cambios menos abruptos con la profundidad.

Cuadro 4.1.15. Características de los bicarbonatos (mmol L⁻¹)

Prof. (cm)	Media	Mínimo	Máximo	Varianza	Desv. Est.	Coef. Var.
0-10	16.1	12.9	22.1	9.2	3.0	18.8
10-20	16.7	15.1	18.4	1.1	1.0	6.5
20-30	19.5	16.8	23.7	5.5	2.3	12.0
30-40	19.5	12.5	24.5	13.0	3.6	18.4
40-50	18.9	13.7	23.5	9.0	3.0	15.8
50-60	18.1	14.5	27.3	12.7	3.5	19.7
60-70	18.6	15.4	22.2	2.7	1.6	8.8
70-80	18.3	14.9	21.0	2.8	1.6	9.2
80-90	18.6	15.6	22.0	2.5	1.5	8.5
90-100	17.2	13.2	23.8	8.4	2.9	16.8
100-110	18.5	13.0	25.7	10.9	3.3	17.8
110-120	20.2	14.2	24.5	7.6	2.7	13.6
120-130	19.6	16.1	23.1	3.8	1.9	10.0
130-140	18.2	15.7	20.4	1.8	1.3	7.4
140-150	18.1	13.5	21.3	3.5	1.8	10.4
150-160	16.8	10.6	18.9	4.8	2.2	13.1
160-170	17.3	15.4	18.7	0.8	0.9	5.4
170-180	13.6	12.2	15.2	0.6	0.7	5.8
180-190	12.9	11.9	14.2	0.4	0.6	5.2
190-200	11.7	10.0	13.1	0.7	0.8	7.4

Por último, como se aprecia en la figura 4.1.12 y en el cuadro 4.1.16, los sulfatos presentan un patrón similar al de los cloruros aunque los niveles máximos de concentración que alcanzan en la capa superficial de febrero a junio (60-78 mmol L⁻¹) son más bajos en comparación con los de capas más profundas (donde se alcanzan valores de más de 140 mmol L⁻¹). La transición de la capa superficial (0-10 cm.) a las siguientes (19-60 cm.) es menos abrupta que con los cloruros, manteniéndose coeficientes de variación medios (de 15 a 20%). En el resto del perfil, los coeficientes disminuyen, a excepción de la capa 160-170 donde se observa la máxima acumulación de sulfatos en el perfil en los meses de agosto a octubre. La menor acumulación relativa de sulfatos en las partes altas del perfil en comparación con los cloruros probablemente se debe a su menor solubilidad, ya que tardan más en ascender a las capas superficiales durante la estación seca, lo que ha sido observado también en suelos de marismas por Ortiz (1988c). Por otra parte, las concentraciones

durante el periodo de septiembre a noviembre se mantienen bajas en todo el perfil por encima de 160 cm, a excepción de la citada capa 160-170, donde aumentan, lo cual mostraría el movimiento descendente de estos sulfatos en la estación de lluvias.

Cuadro 4.1.16. Características de los sulfatos (mmol L⁻¹)

Prof. (cm)	Media	Mínimo	Máximo	Varianza	Desv. Est.	Coef. Var.
0-10	57	37	78	227	15.0	26.0
10-20	48	36	60	84	9.1	18.7
20-30	41	32	51	41	6.4	15.7
30-40	32	19	41	47	6.8	21.2
40-50	31	22	37	23	4.8	15.4
50-60	32	21	38	34	5.8	18.0
60-70	33	28	40	18	4.3	13.0
70-80	37	26	57	80	8.9	23.7
80-90	43	31	62	85	9.2	21.1
90-100	52	39	60	53	7.3	13.9
100-110	57	49	67	32	5.6	9.8
110-120	61	51	66	51	4.6	7.5
120-130	71	63	77	14	3.7	5.2
130-140	73	67	80	12	3.5	4.8
140-150	74	65	86	48	6.9	9.2
150-160	90	72	97	37	6.1	6.7
160-170	107	92	143	231	15.2	14.1
170-180	77	67	89	44	6.6	8.5
180-190	65	60	74	16	4.0	6.2
190-200	70	62	78	14	3.8	5.4

La variación estacional en la salinidad es muy importante para el establecimiento y desarrollo vegetal. En la época de lluvias, al disminuir la salinidad de las capas superficiales, numerosas plantas no halófilas pueden germinar y desarrollarse; sin embargo, al iniciar la temporada de sequía, la salinidad superficial aumenta y el potencial osmótico del suelo se hace muy negativo, de modo que sólo plantas tolerantes a la salinidad pueden continuar su desarrollo, lo que contribuye al establecimiento de una flora particular para estos sitios. Por ejemplo, en los desiertos de la India se observa un cambio en el potencial osmótico de -1.5 bares en la época húmeda, a -200 bares en la época seca (Rajpurohit y Sen, 1980), y en Australia se han observado cambios de -1 bar a -800 bares en la capa superficial de suelos con comunidades de *Atriplex* (Sharma, 1982). Es de esperar que en los suelos del ex-lago de Texcoco se presente una situación similar.

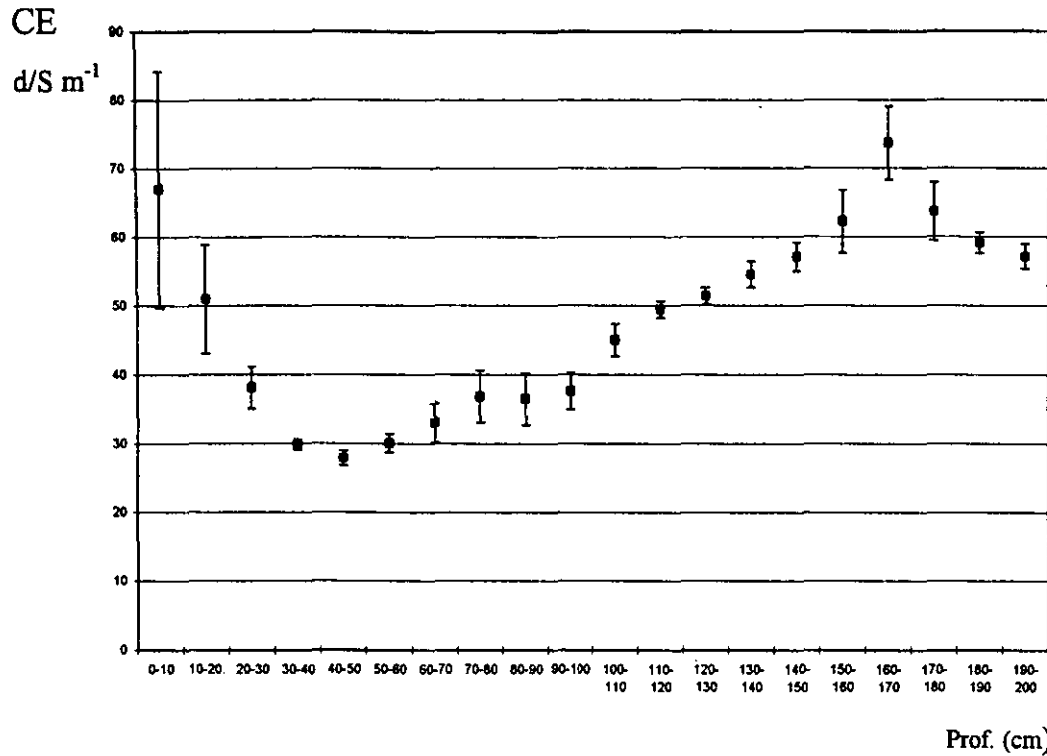


Figura 4.1.1. Variación mensual en el perfil de la conductividad eléctrica (media \pm desv. est.).

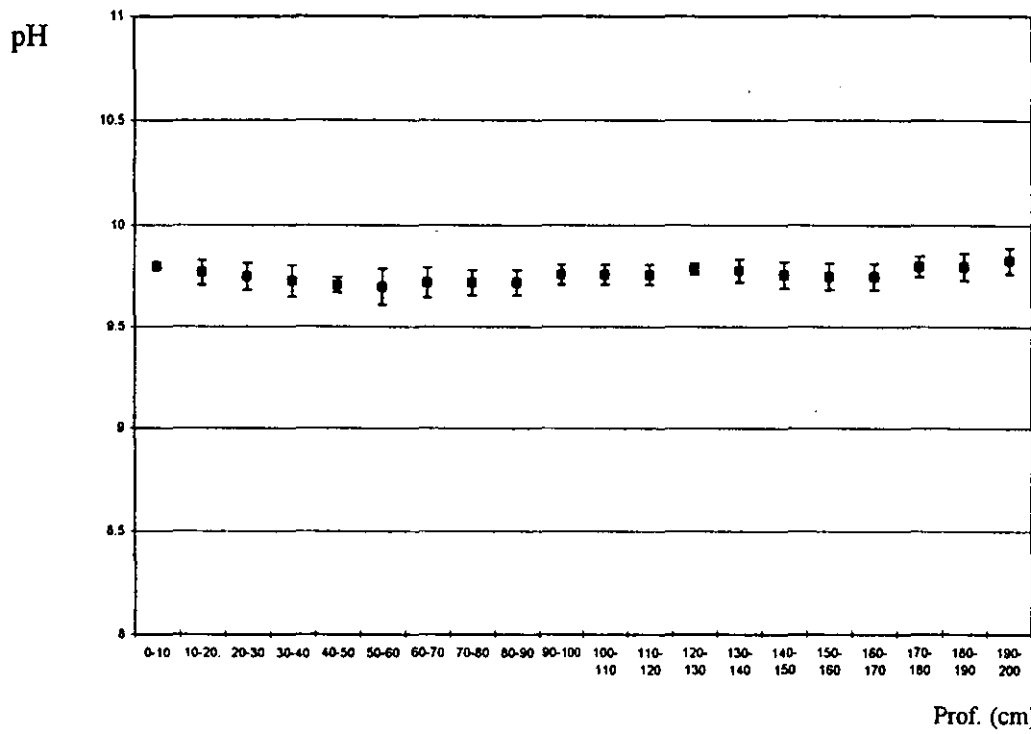


Figura 4.1.2. Variación mensual en el perfil del pH (media \pm desv. est.).

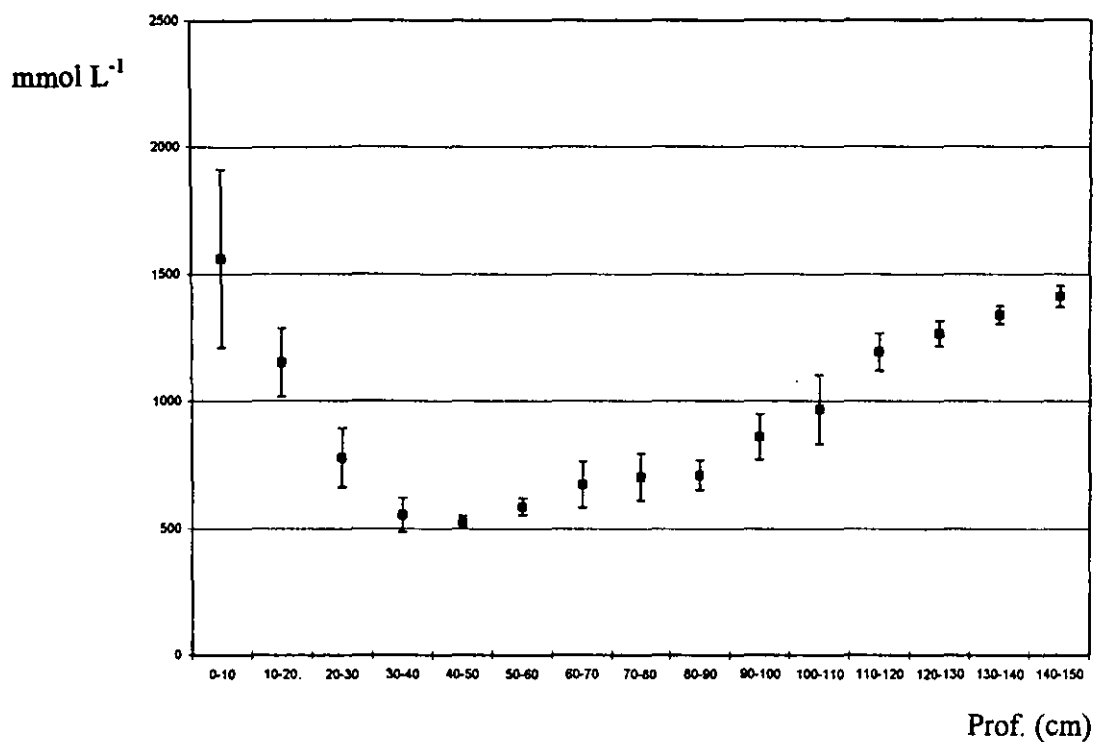


Figura 4.1.3. Variación mensual del sodio en el perfil (media \pm desv.est.).

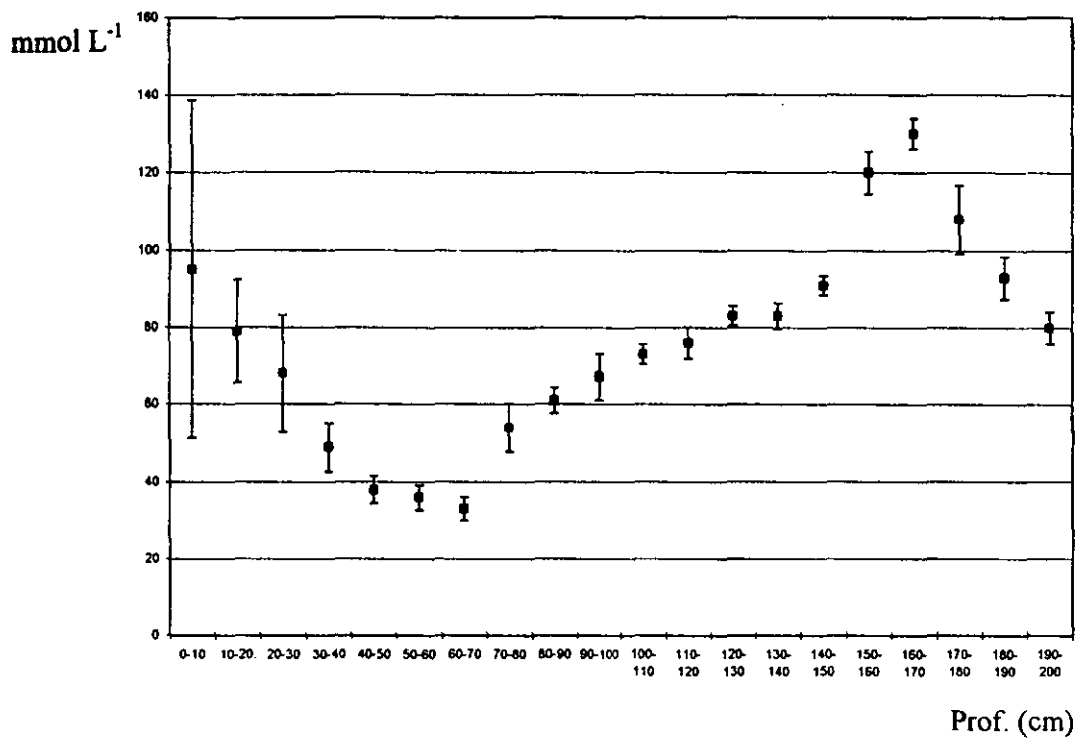


Figura 4.1.4. Variación mensual del potasio en el perfil (media \pm desv.est.).

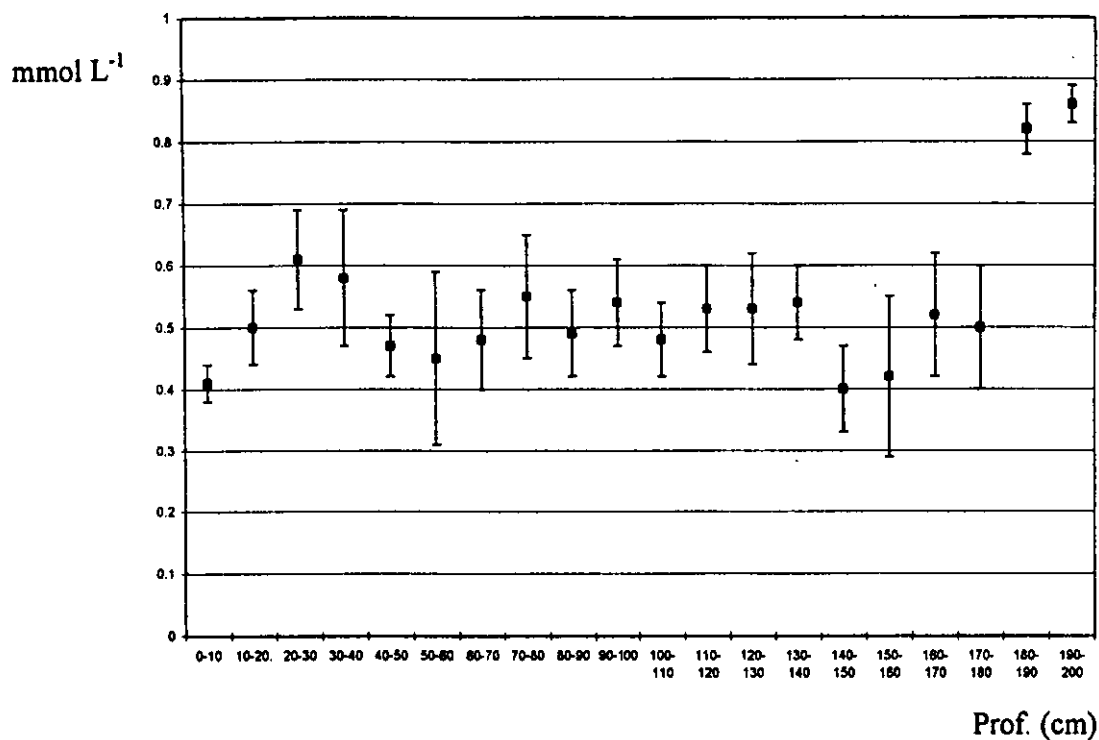


Figura 4.1.5. Variación mensual del calcio en el perfil (media \pm desv.est.).

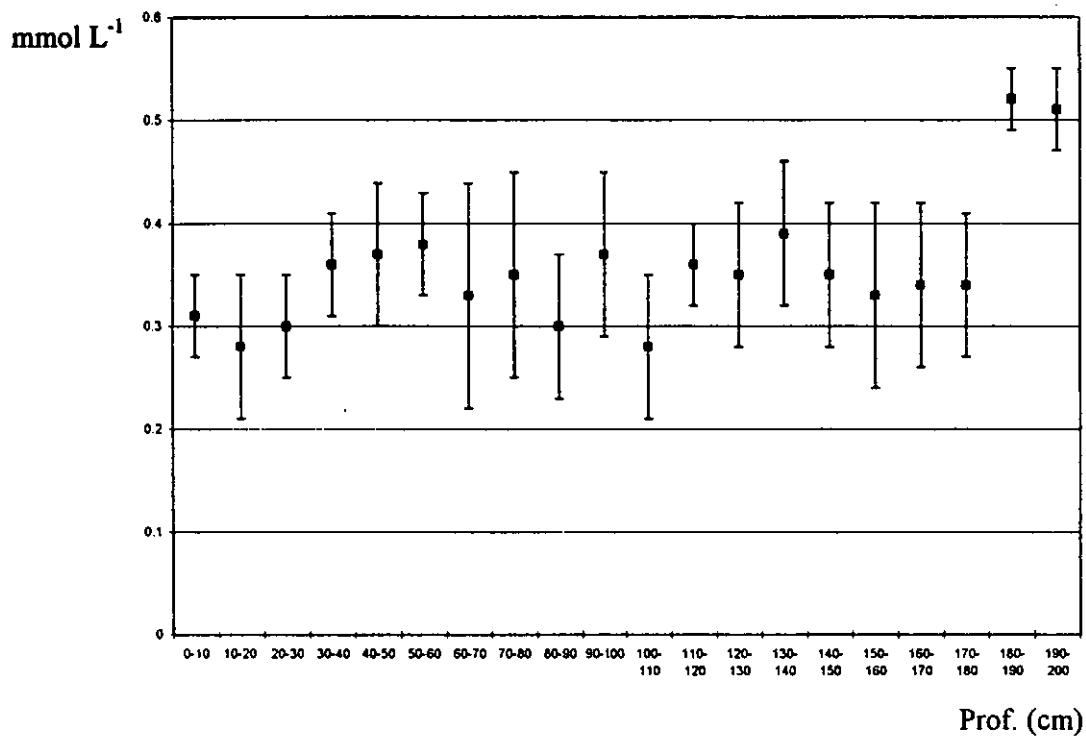


Figura 4.1.6. Variación mensual del magnesio en el perfil (media \pm desv.est.).

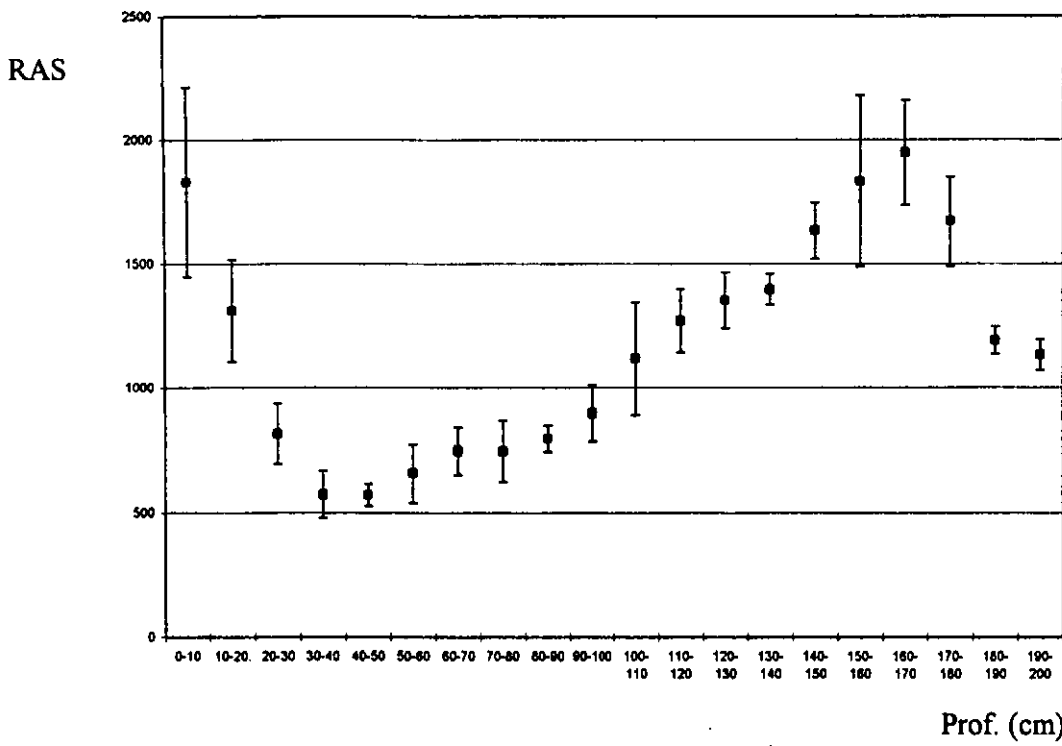


Figura 4.1.7. Variación mensual de la RAS en el perfil (media ± desv. est.).

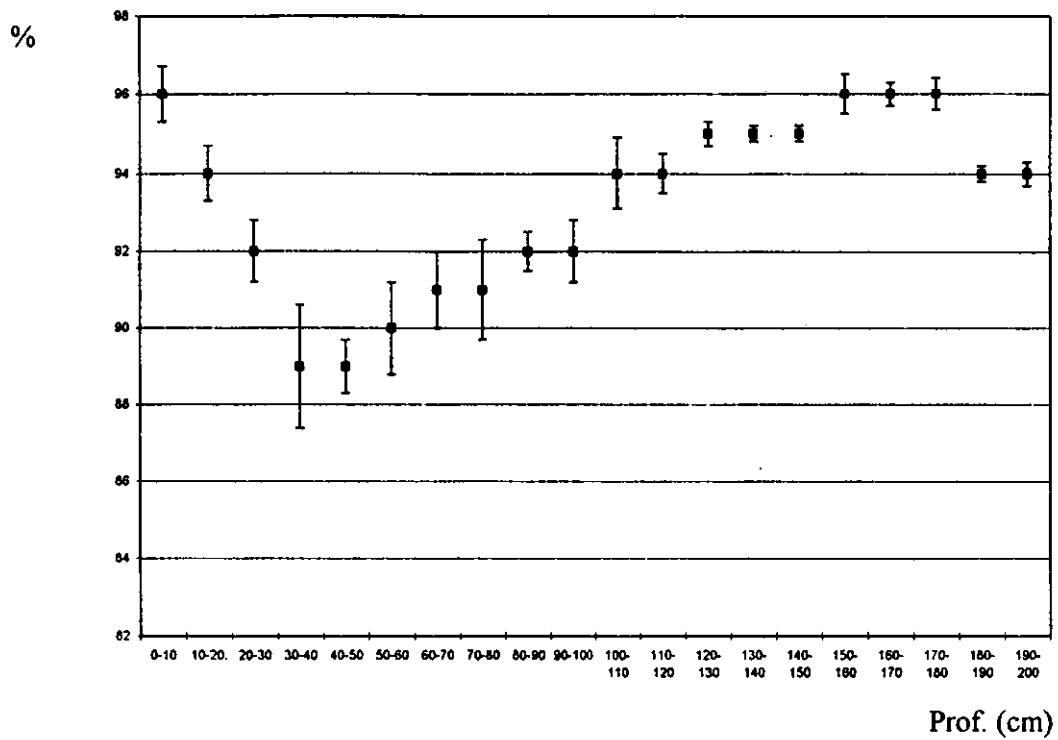


Figura. 4.1.8. Variación mensual del PSI en el perfil (media ± desv. est.).

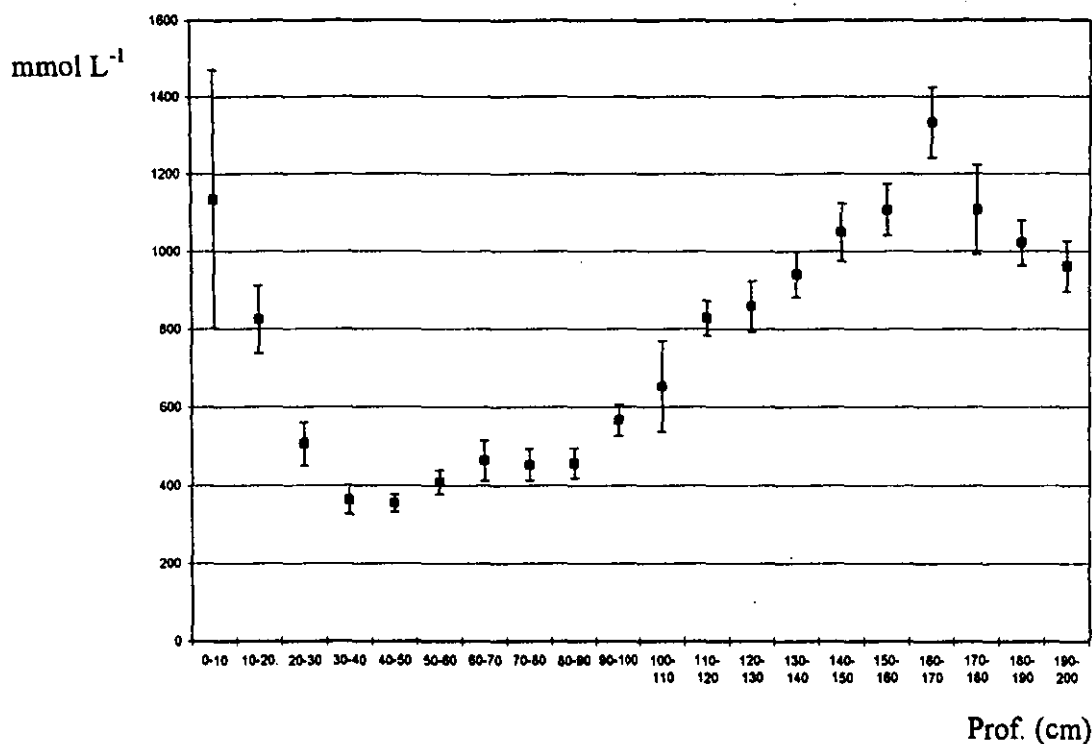


Figura 4.1.9. Variación mensual de los cloruros en el perfil (media ± desv. est.).

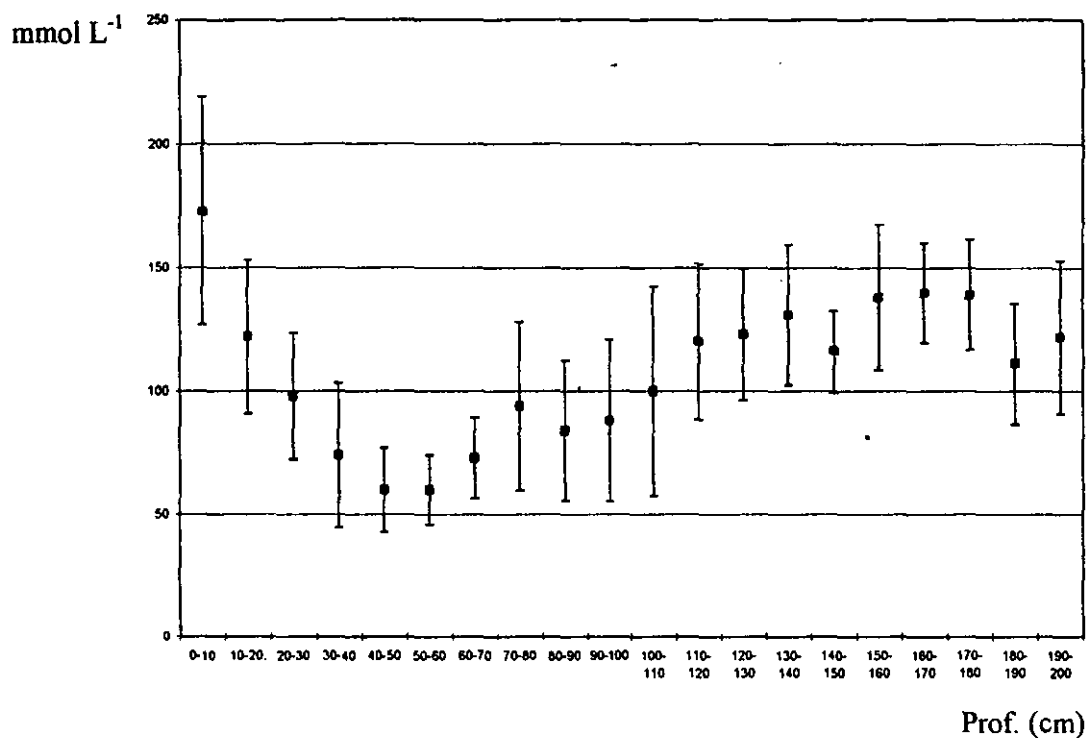


Figura. 4.1.10. Variación mensual de los carbonatos en el perfil (media ± desv. est.).

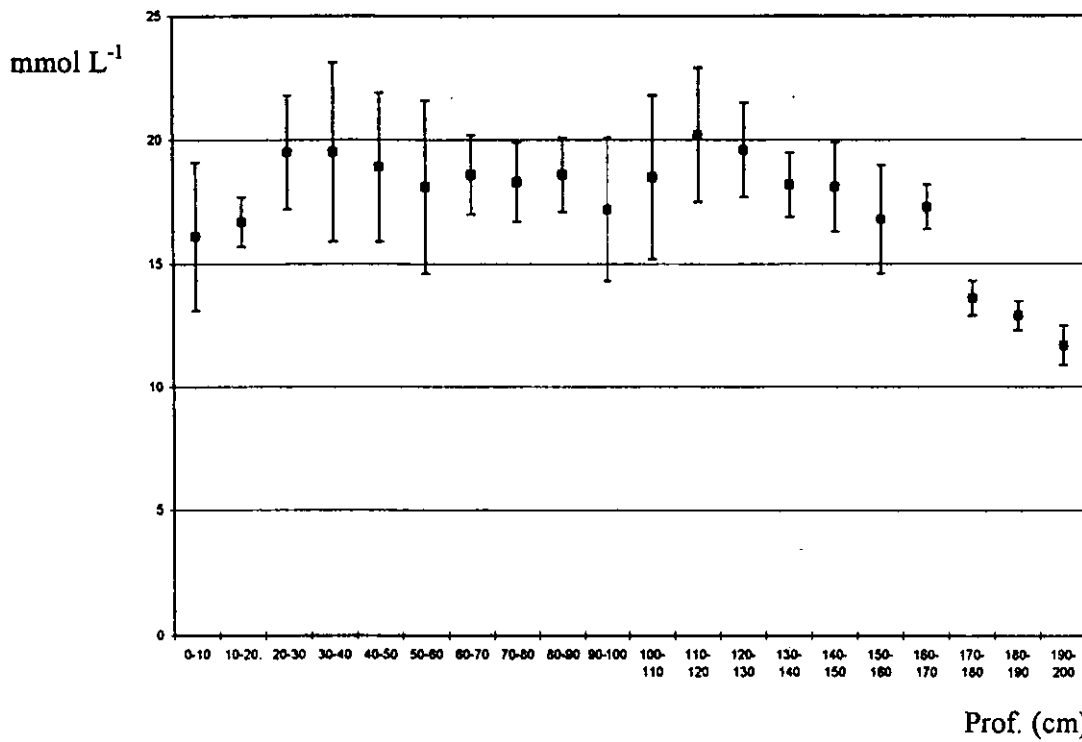


Figura 4.1.11. Variación mensual de los bicarbonatos en el perfil (media \pm desv. est.).

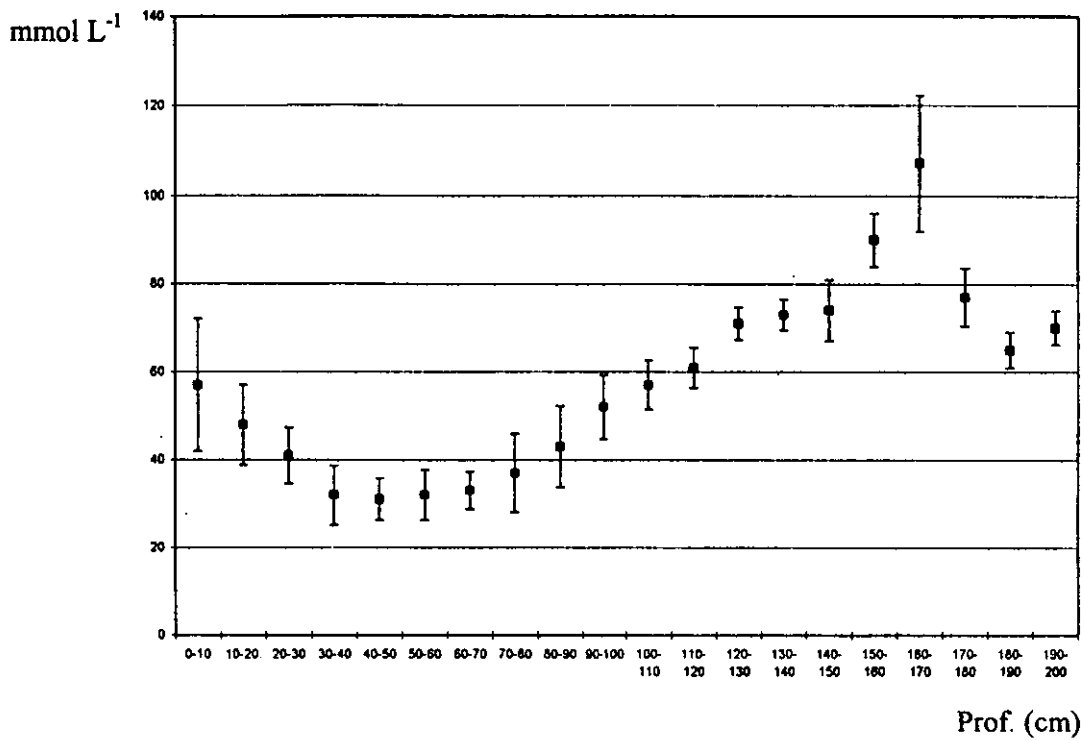


Figura 4.1.12. Variación mensual de los sulfatos en el perfil (media \pm desv. est.).

4.2. ANALISIS GEOESTADISTICO DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA SALINIDAD SUPERFICIAL

4.2.1. Semivariogramas

Los resultados de los análisis de salinidad y sodicidad de las muestras superficiales de suelo procedentes de la "zona ecológica" y correspondientes a las dos épocas de muestreo con separación de 100 m entre sitios se presentan en los cuadros B1 a B12 del apéndice B.

Los resultados del mes de enero, en la época seca del año (cuadro 4.2.1) muestran gran variabilidad en los niveles de salinidad del suelo, encontrándose suelos con conductividades eléctricas bajas, de 2 dS m^{-1} hasta 157.8 dS m^{-1} , variación que se refleja en los contenidos de los iones individuales, aunque en estos suelos la alta salinidad se debe a la presencia de cloruros, carbonatos y sulfatos de sodio, en altas cantidades y en ese orden. En cambio, los contenidos de calcio y magnesio son muy bajos, lo cual provoca que se tengan valores sumamente elevados de la relación de adsorción de sodio. Los suelos son también muy alcalinos; el pH osciló entre 8 y 10, y el porcentaje de sodio intercambiable, calculado a partir de la RAS, fue en general muy elevado con una media de 87 y llegando a alcanzar valores de más de 99.

Un aspecto que destaca de estos resultados es la ausencia de normalidad, detectada a través de la realización de la prueba de Kolmogorov-Smirnov, misma que persistió aun después de transformar logarítmicamente los datos. Sin embargo, como se ha señalado, si bien es recomendable que los datos se distribuyan normalmente, los métodos geoestadísticos pueden aplicarse sin este requisito, y aun así representan la mejor estimación (Yates y Yates, 1990). La falta de normalidad para las variables edáficas ha sido reportada por otros autores como Chien *et al.*, (1997), quienes no pudieron explicarla; sin embargo, es posible que en el caso del presente trabajo se deba a una marcada diferencia entre los suelos que se encuentran cubiertos de vegetación y los que carecen de ella, lo cual se observa en la comparación de medias entre ambos casos (apartado 4.2.3.); esto asemeja una situación de dos poblaciones diferentes mezcladas, en lugar de una población homogénea.

Cuadro 4.2.1. Características de las variables analizadas, 100 m de separación, primer muestreo.

Variable	Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar	C.V. %
CE	68.5	2.0	157.8	44.37	64.7
pH	9.5	8.0	10.0	0.35	3.6
Ca ²⁺	0.27	0.05	1.6	0.25	93.2
Mg ²⁺	0.26	0.05	0.8	0.16	60.1
Na ⁺	1504.0	17.3	6089.3	1284.50	85.4
K ⁺	96.7	2.5	380.5	79.12	81.8
RAS	2898.5	23.2	15722.5	3009.14	103.8
PSI	87.2	24.8	99.5	18.54	21.2
CO ₃ ²⁻	191.3	0.0	780.0	157.8	82.4
HCO ₃ ⁻	69.4	2.0	280.0	53.74	77.4
Cl ⁻	826.6	2.0	3850.0	754.03	91.2
SO ₄ ²⁻	159.6	0.0	621.0	147.60	92.5

Por medio del uso del paquete de cómputo GS+, los datos fueron sometidos a un análisis de tipo geoestadístico. En principio, al realizar los semivariogramas, se observó que éstos no mostraron anisotropía en ninguna de las variables, por lo que se elaboraron solamente los semivariogramas isotrópicos, los cuales fueron ajustados al modelo esférico, con fines de interpretación, aunque en varios casos el modelo lineal presentó un mejor ajuste. En el cuadro 4.2.2. se presentan los valores del *nugget* (Co), de la meseta (C + Co), del porcentaje del *nugget* con respecto a la meseta, del rango y del valor r^2 correspondientes al modelo esférico para las variables estudiadas. También se presenta el valor de la dependencia espacial, expresada en porcentaje, la cual se define como $100 (C / [C + Co])$, y el valor r^2 para el modelo lineal en las variables que se ajustaron mejor a éste.

En todos los casos, el efecto *nugget* Co está presente, lo cual puede deberse a la distancia mínima de separación entre las muestras, de 100 m, que en este caso resulta muy grande, y en la mayoría de los casos se observa que este valor Co representa un alto porcentaje de la meseta, superior al 50%; asimismo, la dependencia espacial es menor del 50% en la mayoría de los casos, lo que lleva a pensar en una débil existencia o incluso la no existencia de estructura espacial de las variables para la distancia considerada de 100 metros de separación entre muestras.

Cuadro 4.2.2. Parámetros para el modelo esférico de los semivariogramas, 100 m de separación, primer muestreo.

Variable	Co	C + Co	Co. % de la meseta	Dependencia espacial %	Rango (km)	r ²
CE	1610	2162	74.4	25.5	2.39	0.958 0.959*
pH	0.089	0.152	58.5	41.4	1.97	0.837 0.859*
Ca ²⁺	0.036	0.086	41.8	58.1	1.82	0.888 0.900*
Mg ²⁺	0.013	0.035	37.1	62.8	2.01	0.952 0.960*
Na ⁺	1330000	1730000	76.8	23.1	0.54	0.979
K ⁺	5500.0	7610	72.2	27.7	2.98	0.886 0.894*
RAS	7070000	9670000	73.1	26.8	0.52	0.925
PSI	240.0	430.2	55.7	44.2	2.39	0.834 0.849*
CO ₃ ²⁻	21440	30720	69.7	30.2	3.01	0.633 0.641*
HCO ₃ ⁻	2404	3052	78.7	21.2	0.84	0.960
Cl ⁻	475000	6080005	78.1	21.8	0.50	0.776
SO ₄ ²⁻	16280	23260	69.9	30.0	0.78	0.916

* Valor de r² del modelo lineal

Las variables que se ajustaron mejor a un modelo de tipo esférico fueron Na⁺, Cl⁻, HCO₃⁻, SO₄²⁻ y RAS. Son estas variables las que presentan un rango menor a la distancia máxima de muestreo, y para las cuales puede considerarse que existe una correlación; es también notable que justamente en estas variables se incluyen a los iones de mayor movilidad y que constituyen la mayor parte de las sales de la zona (con la excepción del CO₃²⁻, que tiene menor movilidad), lo cual explica en parte su baja dependencia espacial, ya que son muy móviles. Por otro lado, la CE, el pH, el PSI y los iones Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ y CO₃²⁻ tuvieron un mejor ajuste al modelo lineal. En estos casos, el semivariograma puede corresponder a la fase de transición hacia la meseta, ya que el alcance resulta ser mayor que la mayor distancia. En estos casos, los valores se encuentran correlacionados a todas las distancias aunque esta correlación sea muy débil.

El segundo muestreo fue realizado durante el mes de septiembre, en plena época de lluvias (cuadro 4.2.3).

Cuadro 4.2.3. Características de las variables analizadas, 100 m de separación, segundo muestreo.

Variable	Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar	C.V. %
CE	69.0	1.0	169.2	56.88	82.4
pH	10.3	9.2	10.9	0.45	4.4
Ca ²⁺	0.66	0.15	1.5	0.32	47.9
Mg ²⁺	0.46	0.10	1.25	0.23	51.5
Na ⁺	1845.1	4.3	7220.5	1851.93	100.2
K ⁺	108.7	0.3	347.8	99.29	91.2
RAS	2071.1	2.7	8950.2	2221.58	107.2
PSI	74.3	2.7	99.2	30.59	41.1
CO ₃ ²⁻	243.9	1.0	890.0	232.10	95.1
HCO ₃ ⁻	80.2	0.0	385.0	89.96	112.1
Cl ⁻	1040.5	7.0	4250.0	1070.57	102.8
SO ₄ ²⁻	188.3	0.0	856.8	198.7	105.5

Al analizar los datos del cuadro 4.2.3., se observa de inmediato un incremento en la variabilidad de la mayoría de las variables analizadas en comparación con el primer muestreo. Por ejemplo, la conductividad eléctrica mínima observada se reduce a 1 dS m⁻¹, pero la máxima aumenta, a 169.2. Esto ocasiona que el coeficiente de variabilidad aumente de 64.7 en el primer muestreo, a 82.4 en el segundo. Lo mismo sucede con la mayoría de los iones. Las únicas variables para las que el coeficiente de variabilidad disminuye en el segundo muestreo, son el calcio y el magnesio, los cuales son los iones menos móviles.

Los resultados obtenidos del análisis geoestadístico para el segundo muestreo con separación de 100 m se muestran en el cuadro 4.2.4.

Al comparar los resultados del cuadro 4.2.4. con los del cuadro 4.2.2. correspondiente al primer muestreo, se nota un cambio en la dependencia espacial para algunas variables. En el caso de la CE, el pH, los iones Na⁺, HCO₃⁻ y SO₄²⁻, la RAS y el PSI, se incrementa notablemente, mientras que para Ca²⁺ y Mg²⁺ se reduce marcadamente; igualmente se ven alterados los valores del rango, y algunas variables que eran mejor descritas por el modelo lineal, ahora lo son por el esférico, como Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ y CO₃²⁻. Esto revela la influencia que la estacionalidad tiene en la distribución y estructura espacial de la salinidad y sodicidad de los suelos, y por tanto su importancia en la realización de muestreos en suelos afectados por sales.

Cuadro 4.2.4. Parámetros para el modelo esférico de los semivariogramas, 100 m de separación, segundo muestreo.

Variable	Co	C + Co	Co % de la meseta	Dependencia espacial	Rango (km)	r ²
CE	2320	4018	57.7	42.2	1.74	0.964 0.970*
pH	0.130	0.258	50.3	49.6	1.56	0.982 0.992*
Ca ²⁺	0.050	0.095	52.6	47.3	0.42	0.835
Mg ²⁺	0.041	0.056	73.2	26.7	0.99	0.788
Na ⁺	2540000	3650000	69.5	30.4	0.56	0.861
K ⁺	7640	10700	71.4	28.5	1.13	0.920
RAS	3320000	4940000	67.2	32.7	0.41	0.836
PSI	614	1328	46.2	53.7	2.24	0.953 0.962*
CO ₃ ²⁻	37700	55830	67.5	32.4	0.68	0.883
HCO ₃ ⁻	5340	8225	64.9	35.0	0.36	0.922
Cl ⁻	960000	1210000	79.3	20.6	0.97	0.833
SO ₄ ²⁻	19900	41050	48.4	51.5	0.32	0.967

* Valor de r² del modelo lineal.

En la mayoría de los casos de los muestreos realizados con una distancia de separación de 100 m, los semivariogramas presentaron valores Co muy elevados, con altos porcentajes con respecto a la meseta y baja dependencia espacial; incluso, en muchos casos el modelo lineal describe mejor al semivariograma. Estos resultados difieren en muchos casos de los obtenidos con el muestreo realizado con una distancia de separación de 10 m en una hectárea completa, sólo durante la época húmeda del año.

Los resultados de los análisis de salinidad y sodicidad correspondientes al muestreo con distancia de separación de 10 m se presentan en los cuadros B13 a B18 del apéndice B. El cuadro 4.2.5. muestra algunos parámetros estadísticos de las variables analizadas.

Los valores presentados del cuadro 4.2.5. son en general similares a los del cuadro 4.2.3., correspondiente a la separación de 100 m, aunque se detectaron sitios con valores de conductividad eléctrica y concentraciones de iones más elevados, lo que aumenta en algunos casos el valor del coeficiente de variación, notándose aún a esta escala grandes diferencias en la salinidad y sodicidad, incluso a pequeñas distancias.

Cuadro 4.2.5. Características de las variables analizadas, 10 m de separación.

Variable	Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar	C.V. %
CE	87.27	1.0	181.9	52.88	60.5
pH	9.92	8.6	10.6	0.43	4.3
Ca ²⁺	0.31	0.0	0.82	0.16	50.7
Mg ²⁺	0.37	0.03	0.85	0.16	41.3
Na ⁺	2244.20	8.0	7227.0	1901.94	84.7
K ⁺	149.86	1.0	410.0	103.69	69.1
RAS	2892.88	11.6	11575.2	2545.99	88.0
PSI	88.2	13.6	99.4	19.26	21.8
CO ₃ ²⁻	148.8	0.5	367.0	107.79	72.4
HCO ₃ ⁻	115.19	0.0	470.0	93.65	81.3
Cl ⁻	1302.64	10.0	3675.0	1129.64	86.7
SO ₄ ²⁻	104.6	0.0	428.2	108.23	113.4

El cuadro 4.2.6. muestra las características de los semivariogramas obtenidos:

Cuadro 4.2.6. Parámetros para el modelo esférico de los semivariogramas, 10 m de separación.

Variable	Co	C + Co	Co % de la meseta	Dependencia espacial %	Rango (m)	r ²
CE	571	2893	19.7	80.2	31.5	0.956
pH	0.178	0.195	91.2	0.08	164.7	0.102 0.105 ⁺
Na ⁺	1270000	3672000	34.5	65.4	39.3	0.933
K ⁺	2180	1.1040	19.7	88.2	33.2	0.933 0.964 ⁺
Ca ²⁺	0.021	0.028	74.9	25.0	115.7	0.857 0.883 ⁺
Mg ²⁺	0.026	0.027	93.4	6.5	206.6	0.048 0.052*
RAS	1690000	6579000	25.6	74.3	31.2	0.935
PSI	221	388	56.9	43.0	25.1	0.524
CO ₃ ²⁻	5210	12160	42.8	57.1	41.9	0.904 0.938 ⁺
HCO ₃ ⁻	1910	8809	21.6	78.3	31.2	0.872 0.918 ⁺
Cl ⁻	155000	1307000	11.8	88.1	29.8	0.973
SO ₄ ²⁻	4780	11940	40.0	59.9	48.2	0.925 0.966 ⁺

* Valor de r² del modelo lineal

+ Valor de r² del modelo exponencial

4.2.2. Kriging

Una vez obtenidos los semivariogramas, se procedió a la elaboración de mapas que muestran la distribución espacial de las variables estudiadas, mediante el procedimiento de "kriging" en bloques (ya que se trató de muestras compuestas), con el mismo paquete de cómputo GS+. Puesto que el kriging provee una medida del error de las estimaciones que realiza, se obtuvieron también los mapas de error correspondientes, los cuales son mapas de la desviación estándar; mientras más baja sea la desviación estándar para un sitio, más confiables son los valores estimados por el kriging para ese sitio.

4.2.2.1. CONDUCTIVIDAD ELECTRICA.

En el caso de la conductividad eléctrica (CE) para 100 m de separación entre sitios, el semivariograma correspondiente al primer muestreo (figura 4.2.1) tiene un valor C_0 (nugget) muy alto, lo cual quiere decir que los cambios de la CE con la distancia se dan a distancias muy cortas, de manera abrupta, de modo que la continuidad es muy reducida. El C_0 representa un alto porcentaje de la meseta (74%); si se considera el ajuste al modelo esférico, esto puede señalar que el semivariograma está en la fase de transición hacia la meseta, puesto que el rango (2.39 km) es mayor que la mayor distancia muestreada (1.4 km); sin embargo, la CE mostró un ligero mejor ajuste al modelo lineal, lo cual indicaría la ausencia de rango y una correlación para todas las distancias, aunque débil. La baja dependencia espacial observada (<50%) denota la falta de estructura espacial para esta variable. El semivariograma correspondiente al segundo muestreo (figura 4.2.2) es muy similar, aunque el % del valor C_0 con respecto a la meseta disminuye, y la pendiente es más pronunciada, lo cual indica un mayor decremento en la continuidad, o sea que aumentan las diferencias a distancias cortas. Sin embargo, la dependencia espacial aumenta, aunque sigue estando por debajo de 50%. Estos cambios podrían ser explicados por la llegada de la estación de lluvias, que al disolver y acarrear las sales de las capas superficiales, favorece su lavado en algunos sitios y su acumulación en otros, con lo que los cambios de un sitio a otro son más abruptos; y por lo mismo, aumenta la dependencia espacial, ya que se tiene menor acumulación de sales en sitios cubiertos por vegetación y mayor acumulación en sitios desnudos. Esto se presenta más adelante.

Los mapas elaborados mediante kriging (figuras 4.2.1. y 4.2.2.) muestran un patrón similar de distribución de la CE en el área de estudio; se pueden observar zonas de mayor concentración en la porción media inferior, y una zona de baja salinidad hacia la derecha (sur) de los mapas; en esta zona abundan las grietas y hay un dren cercano, lo que podría estar influyendo en los bajos contenidos de sales de esta zona. Por su parte, los mapas de error muestran que la mayor parte del área posee valores de desviación estándar relativamente bajos (<15 y <19), comparados con los valores correspondientes para todos los datos de CE (44 y 57 dS m^{-1} respectivamente, cuadros 4.2.1. y 4.2.3), lo cual señala que se puede tener una buena confiabilidad en los mapas elaborados, aunque tomando en cuenta, desde luego, que la CE muestra en sí alta variabilidad. El incremento en la desviación estándar en las orillas y esquinas del área de muestreo se debe a la ausencia de sitios de muestreo por fuera del área estudiada, lo que reduce la confiabilidad del análisis para esos sitios.

El semivariograma correspondiente a la distancia de 10 m de separación presenta una forma más típica que los obtenidos para la distancia de 100 m . A diferencia de aquéllos, este semivariograma presenta un buen ajuste al modelo esférico, con un valor C_0 muy bajo con respecto a la meseta (19%), y una alta dependencia espacial (80%). Esto señala que, para esta distancia de separación, los cambios de la CE con la distancia se dan de manera mucho más gradual, con una alta continuidad. La alta dependencia espacial muestra una clara presencia de estructura espacial para esta variable, a esta distancia, y el rango está muy bien definido, siendo de 31.5 m , la cual sería la distancia de muestreo donde la conductividad eléctrica cambia. El mapa de error muestra valores de desviación estándar elevados para la mayoría del área, lo cual en parte se debe al amplio rango de conductividad eléctrica (de 1 a 181 dS m^{-1}) que se encuentra en esta superficie de tan sólo una hectárea. Este mismo patrón en los mapas de error se repite para las concentraciones de aquéllos iones que se encuentran en mayor concentración y que establecen los altos valores de conductividad eléctrica (figura 4.2.3.).

La baja dependencia espacial y alto valor nugget encontrada a la separación de 100 m fue observada también por Palacio *et al.* (1994), quien para distancias de separación mayores de 450 m encuentra un rango de más de 30 km en el Valle del Mezquital, y por Pepiol (1997), quien con distancias de 300 m encuentra rangos de 2.6 km en la Laguna de

salinas, España. Estos resultados son atribuibles a la gran separación entre sitios, donde el elevado valor del nugget señala la necesidad de muestreos a menores distancias. Bajo estas condiciones, Warrick *et al.* (1986) reporta un rango para la CE de 90 m para un suelo de Arizona; Hajrasuliha *et al.* (1980) reporta un rango de 80 m para un suelo de Irán (pero que se eleva a 1.2 km con distancias mayores de muestreo), y Utset (1993) encuentra un rango de 400 m para muestras superficiales y de 150m para muestras subsuperficiales. Aunque estos valores son superiores al de 31 m hallado en este trabajo, deben considerarse las características particulares de variabilidad de cada sitio. En general, todos los autores encontraron altos coeficientes de variación de la conductividad eléctrica al igual que en este trabajo, lo cual explica la necesidad de realizar muestreos a distancias cortas para caracterizar adecuadamente a estos suelos. Asimismo, en todos los trabajos mencionados el modelo esférico es el que presenta el mejor ajuste para distancias cortas, ya que distancias grandes provocan que el ajuste tienda hacia el modelo lineal o exponencial, representando más bien a la meseta o la transición hacia la misma.

4.2.2.2. pH.

Los semivariogramas de pH para 100 m de separación tienen un comportamiento similar a los de la CE (figuras 4.2.4. y 4.2.5.). Para los dos muestreos, los valores de C_0 son altos con respecto a la meseta, de la que representan arriba de 50%, el rango es mayor que la mayor distancia (> 1.5 km); si se considera al modelo esférico, podría representar la fase de transición hacia la meseta, aunque el modelo de tipo lineal tiene un ligero mejor ajuste. Todo esto, en conjunto denota una baja continuidad para el pH dentro de las distancias muestreadas, así como una baja dependencia espacial, menor a 50% en los dos muestreos; sin embargo, al igual que con la conductividad eléctrica, la dependencia espacial aumenta y la continuidad decrece en el segundo muestreo, correspondiente a la época de lluvias.

Los mapas obtenidos mediante kriging muestran cierta similitud con los de la CE, sobre todo el del segundo muestreo, donde se observa mayor pH en la porción media del área y menor pH hacia el lado derecho (sur), aunque hay que notar el incremento en pH del segundo muestreo. Los mapas de error muestran valores bajos de desviación estándar (<0.12 y <0.16) para las áreas centrales, en comparación con las desviaciones muestrales de

0.35 y 0.45, respectivamente, lo que les da una buena confiabilidad, aún en las orillas y esquinas.

Al reducir la distancia de muestreo a 10 m, el valor C_0 aumentó, y su valor con respecto a la meseta (>91%) lleva a considerar que prácticamente no existe estructura espacial a esta distancia, ya que prácticamente coinciden la meseta y el efecto nugget. Esto se debe en parte al muy bajo coeficiente de variación (<5%), resultando los valores muy similares en todos los sitios de muestreo. La dependencia espacial prácticamente es inexistente, y de acuerdo al ajuste al modelo esférico, presenta un rango (164 m) mayor que la mayor distancia de muestreo, aunque el ajuste tanto a este modelo como al linear es muy malo. El mapa de error, sin embargo, presenta una alta confiabilidad, debido a la poca variación en los valores de pH (figura 4.2.6.).

Palacio *et al.* (1994) también encontró valores de nugget para el pH muy altos con respecto a la meseta para una distancia de 450 m, con rango mayor a 13 km, lo que hace suponer que sus semivariogramas representan la meseta. Un resultado similar encontró Yost *et al.* (1982), quien reporta rangos de 14 a 32 km para el pH, mientras que Gajem *et al.* encontró rangos de 1.5 m y de 260 m con separaciones de 2 y 20 m respectivamente, y Gonzalez y Zak (1994) reportan un rango de 57 m con separación de 4 m (aunque estos últimos casos corresponden a suelos no salinos).

4.2.2.3. SODIO

A diferencia de los casos anteriores, los semivariogramas del sodio correspondientes a los dos muestreos con 100 m de separación, presentaron un mejor ajuste al modelo esférico (figuras 4.2.7. y 4.2.8.). Ambos semivariogramas son muy similares; el C_0 es muy elevado y representa un alto porcentaje de la meseta (76 y 69%), y la dependencia espacial es muy baja (23 y 30%), pero el rango (0.5 km) está bien definido y es menor que la distancia máxima de muestreo, lo cual indica que a distancias menores que 0.5 km existe correlación y que ésta se pierde a partir de dicha distancia. Igualmente, para fines de evaluación de este parámetro, no sería necesario tomar muestras a distancias menores del rango. En parte, esto puede ser debido a las altas concentraciones en que se encuentra el sodio en la zona, y a que es el principal catión (casi pudiera decirse el único) que constituye a las diversas sales de la zona, por lo que aún cuando diversas sales pudieran tener distintos patrones de distribución

espacial, el sodio no seguiría esa distribución porque estaría formando parte de todas esas sales; por otro lado, tratándose de un ión muy móvil, su estructura espacial es muy baja.

Los mapas correspondientes a la distribución de sodio son muy similares a los de la conductividad eléctrica, lo que cabría de esperar considerando que este sodio va a ser su principal componente. En ambos muestreos, se observan las zonas de alta concentración en la parte media baja, y la zona de baja concentración de la porción sur.

Los mapas de error muestran una menor confiabilidad que en los casos anteriores, ya que se observan altas desviaciones estándar en comparación con las desviaciones muestrales (≈ 500 y 700 contra 1200 y 1800 , cerca del 40%), debido esto en gran medida a la alta variabilidad observada para el sodio, mayor en el segundo muestreo (coeficiente de variación de 100%).

A la distancia de separación de 10 m, el semivariograma del sodio es muy similar al de la CE; el valor C_0 es bajo con respecto a la meseta (34%), lo que señala una mayor continuidad para los cambios en esta variable a la distancia de 10 m, y presenta una dependencia espacial mayor (65%), la cual aumenta con respecto a los semivariogramas obtenidos para 100 m de separación, aunque el modelo exponencial presenta un ligero mejor ajuste. Presenta un valor de rango de 39 m (figura 4.2.9.), que es también similar al de la conductividad eléctrica.

En un suelo de Inglaterra, con distancias cortas, Burgess y Webster (1980a) encontraron un rango de 61 m, similar al de este trabajo, mientras que Pepiol (1997) reporta un rango de 2.7 a 3 km con distancias de 300 m. para un suelo salino de España.

4.2.2.4. POTASIO

El potasio fue uno de los parámetros que mostraron diferencias notables entre el primer y el segundo muestreo (figuras 4.2.10. y 4.2.11.); el valor nugget C_0 es alto y representa más de 70% de la meseta en ambos casos, aunque durante el primer muestreo el modelo lineal se ajusta mejor, con un rango (2.9 km) muy superior a la distancia máxima de muestreo, mientras que en el segundo el modelo esférico tiene mejor ajuste y el rango (1.1 km) resulta menor que dicha distancia, lo cual puede deberse a un efecto de lavado y acumulación en sitios específicos producido por la lluvia, como en el caso del sodio. En

ambos casos la dependencia espacial es reducida, lo que puede atribuirse a la movilidad del potasio, con valores menores al 30%.

Los mapas de distribución muestran un patrón muy similar al del sodio, con menor acumulación al sur de la zona; en cuanto a los mapas de error, la desviación estándar es medianamente elevada, de más de 30% con respecto a la desviación muestral, y es mayor en el segundo muestreo, debido en gran parte a la alta variabilidad de la concentración de esta variable (coeficientes de variación de más de 80 y 90%, respectivamente).

A diferencia de los semivariogramas obtenidos para 100 m de separación, donde el efecto nugget representa la mayor parte de la meseta y se asemeja a ésta, con una baja estructura espacial, a 10 m de separación el nugget C_0 disminuye a sólo 19% de la meseta, con lo que la dependencia espacial aumenta considerablemente, a 80%. El rango es de 33 m (figura 4.2.12.).

Pepirol (1997) reporta para distancias grandes un rango para el potasio de 3 km, similar al de este trabajo para la distancia de 100 m. En cambio, para un suelo no salino, Yost *et al.* (1982) reporta un rango de 10 a 32 km, lo que es una muestra del diferente comportamiento del potasio en distintos tipos de suelos.

4.2.2.5. CALCIO

Las figuras 4.2.13. y 4.2.14. muestran los semivariogramas y mapas correspondientes al calcio. Al igual que con el potasio, el semivariograma del primer muestreo se ajusta mejor a un modelo lineal, y posee un valor C_0 bajo, menor a 50% de la meseta, mientras que en el segundo el ajuste es de tipo esférico, con un C_0 más alto. Debido a esto, en el primer muestreo el rango es mayor que la distancia máxima, mientras que en el segundo muestreo el rango es de 0.42 km. Esto puede relacionarse a las mayores concentraciones de calcio que se observan en el segundo muestreo, que a su vez pueden deberse a una mayor solubilidad de las sales de calcio al disminuir la salinidad en muchos sitios por las lluvias, y su posterior redistribución en el área. En la época seca la dependencia espacial es cercana a 60%, lo que puede señalar justamente dependencia de la solubilidad del calcio de los sitios, por ejemplo, en sitios donde hay mayor evaporación aumenta la concentración de sales y el calcio se precipita, disminuyendo su concentración en la solución. En la época de lluvias, en cambio, aumenta su solubilidad y la dependencia espacial se reduce.

Los mapas de distribución del calcio muestran en cierto modo un patrón inverso al del sodio y potasio, con una menor concentración en la parte media baja del área, y mayor concentración en la parte sur, sobre todo en la época de lluvias, lo cual reforzaría la idea de que en el área sur hay un proceso de lavado, con una disminución de las sales más solubles de sodio que permite una mayor disolución de las sales de calcio. Los mapas de error muestran una buena confiabilidad, aunque ésta aumenta en el segundo muestreo, ligada a una reducción en el coeficiente de variación.

El semivariograma para calcio con distancias de separación de 100 m presentaba un buen ajuste al modelo esférico, con una dependencia espacial intermedia de 48%. Sin embargo, al disminuir la distancia a 10 m., el valor C_0 aumenta a 74% de la meseta, y la dependencia espacial disminuye, lo que muestra una baja continuidad para esta variable a esta distancia. El rango es muy grande, mayor que la distancia máxima de muestreo (115 m). En este caso, los valores de calcio presentan un rango muy estrecho para este cuadrante, lo cual puede influir en que no presenten estructura espacial en él; incluso, debido a esta similitud de los datos, el mapa de error es altamente confiable. De este modo, para esta variable la estructura espacial se presenta sólo en una escala mayor (figura 4.2.15.). De acuerdo con esto, Chien *et al.* (1997) reporta un rango de 1.3 km, y Yost *et al.* (1982) reporta un rango de 42 a 45 km, aunque ambos casos corresponden a suelos no salinos.

4.2.2.6. MAGNESIO

El magnesio, a diferencia del calcio, presentó un mejor ajuste de los semivariogramas al modelo lineal que al esférico en el primer muestreo, con un rango mayor a la distancia máxima y una dependencia espacial mayor de 50%. En el segundo, el esférico tuvo un mejor ajuste (figuras 4.2.16. y 4.2.17.); también es más alto el porcentaje del nugget C_0 con respecto a la meseta, donde el rango (0.99 km) es menor que la distancia máxima, existiendo correlación entre los sitios ubicados a distancias menores que ésta; la dependencia espacial es menor de 50%.

Los mapas muestran una distribución más uniforme para el magnesio en el primer muestreo, con un incremento gradual hacia la parte sur del área, y con un incremento general en la concentración durante el segundo muestreo, lo cual puede deberse a la disolución de sales precipitadas de magnesio durante la época de lluvias, al igual que con el

calcio. Los mapas de error muestran desviaciones estándar de alrededor de 30% de la desviación muestral.

A la separación de 10 m, el magnesio fue una de las variables para las que se obtuvo uno de los peores ajustes al modelo esférico, siendo mejor el linear, pero aun para éste el ajuste no es bueno. Se observa un aumento del valor C_0 con respecto a la meseta en referencia al muestreo con distancias de separación de 100 m, y la dependencia espacial es la más baja (6%). La distribución del magnesio en el área sigue un patrón muy similar al del calcio, con un rango elevado, de más de 200 m, pero se insiste en el mal ajuste del modelo esférico, lo que lleva a desconfiar de este valor. Es más probable que la tendencia sea similar al caso del calcio (figura 4.2.18.). Para fines de comparación, en suelos salinos Pepiol (1997) reporta un rango para el magnesio de 3.5 km con 300 m de separación, mientras que para suelos no salinos, Yost *et al.* reporta un rango de 39 km; Chien *et al.* (1997) encontró un rango de 1.2 km, y Jarvinen *et al.* (1993) para un suelo forestal reporta un rango de 18 m.

4.2.2.7. RAS

La relación de adsorción de sodio (RAS) es otro parámetro cuyos semivariogramas para ambos muestreos se ajustan mejor al modelo esférico (ver figuras 4.2.19. y 4.2.20.). El nugget C_0 sigue siendo muy alto con respecto a la meseta, aunque el rango es en ambos casos menor a la distancia máxima (0.5 y 0.4 km). El menor rango para el segundo muestreo señala una mayor tasa de disminución de la continuidad, o sea, se dan mayores cambios con la distancia. Como la RAS es una relación entre el Na^+ y los cationes Ca^{2+} y Mg^{2+} , y dada la mucho mayor concentración del primero de ellos, el comportamiento geoestadístico de la RAS muestra muy clara similitud con el sodio.

Los mapas de distribución de la RAS también son similares a los del sodio, con mayores valores en la parte media baja del área, y menores al sur, aunque con menores valores en el segundo muestreo, debido al incremento de los contenidos de calcio y magnesio, que disminuyen la RAS. Los mapas de error, sin embargo, son menos confiables, ya que la desviación estándar llega a ser del 50% con respecto a la desviación muestral, sobre todo en el segundo muestreo, debido a la alta variabilidad (coeficientes de variación mayores de 100%).

A la separación de 10 m, el modelo esférico se acentúa con un bajo valor de C_0 (25% de la meseta), y una alta dependencia espacial (74%), lo cual es en gran medida un reflejo del comportamiento del sodio, dadas sus altas concentraciones, y los relativos bajos valores de calcio y magnesio; el rango correspondiente es de 31 m (figura 4.2.21.). En suelos salinos de España, Pepiol (1997) encontró rangos mucho más altos para la RAS, de 3 km, pero con distancias de 300 m de separación; además, los suelos que estudió presentan valores de RAS mucho más bajos que los encontrados en el presente trabajo.

4.2.2.8. PSI

Como se ha señalado, los valores de la RAS son sumamente elevados, tanto por la enorme cantidad de sodio soluble presente, como por la muy baja cantidad de calcio y magnesio. Debido a que el porcentaje de sodio intercambiable se calcula a partir de la RAS, al ser muy elevados los valores de ésta, se arrojan valores de PSI también muy altos; sin embargo, el valor máximo posible de PSI es 100, por lo que los valores calculados de PSI quedan dentro de un rango muy estrecho (de 87 a 99 en el primer muestreo y de 74 a 99 para el segundo). Por este motivo, su coeficiente de variación es el más reducido de todas las variables estudiadas con la excepción del pH. Los semivariogramas muestran un mejor ajuste al modelo lineal (figuras 4.2.22. y 4.2.23.), y para el modelo esférico el nugget C_0 es de alrededor de 50% de la meseta, con valores de rango mayores a la distancia máxima de muestreo, por lo que los datos están correlacionados en todas las distancias y estos semivariogramas podrían representar la fase de transición a la meseta.

En los mapas de distribución del PSI es notable cómo en el primer muestreo dominan los valores altos de PSI en casi toda el área, mientras que se da una marcada reducción para el segundo muestreo. Debido al aumento en variabilidad para el segundo muestreo, el mapa de error reduce su confiabilidad con respecto al del primer muestreo.

PSI

A diferencia de los muestreos con distancias de separación de 100 m, el PSI a la separación de 10 m presenta una mayor estructura espacial con cambios graduales, aunque el valor de C_0 de 56% con respecto a la meseta es muy similar, así como el grado de dependencia espacial (43%). Esto puede ser debido al estrecho rango de PSI que se

observa, lo que hace que las diferencias entre los sitios de muestreo no sean muy marcadas, aunque el rango es de 25 m (figura 4.2.24.).

4.2.2.9. CLORUROS

A 100 m de separación, los semivariogramas correspondientes a la distribución de los cloruros se ajustaron mejor al modelo esférico (figuras 4.2.25. y 4.2.26.), aunque los valores de r^2 fueron de los más bajos que se observaron. El nugget es muy alto, representando más de 78% de la meseta, y la dependencia espacial es asimismo muy baja, lo cual puede atribuirse a la elevada solubilidad y movilidad de estos iones. Sin embargo, los rangos son menores que la distancia máxima, 0.5 y 0.9 km, para el primero y segundo muestreos, desapareciendo la correlación para esta variable entre sitios separados por distancias mayores.

Si bien la distribución de los cloruros que se presenta en los mapas es similar a lo observado para otras variables, los cloruros se distribuyen más uniformemente en toda el área, a excepción de la ya observada disminución en concentraciones de la parte sur. Los valores de desviación estándar se reducen comparativamente para el segundo muestreo, por lo que el mapa de error de éste resulta más confiable; sin embargo, estos valores son elevados, debido a los altos coeficientes de variación de este parámetro, cercanos o superiores a 100%.

En contraste, a 10 m de separación, los cloruros presentan el valor más bajo de C_0 observado (11% de la meseta), con una clara estructura espacial y un cambio gradual con la distancia, presentando un buen ajuste al modelo esférico y una alta dependencia espacial, con un rango de 29 m, muy similar al del sodio, aunque el menor de los aniones (figura 4.2.27.). Los cloruros son los aniones que presentan mayor dependencia espacial. El hecho de que el sodio tenga una dependencia más baja obedece al parecer a que esta alta dependencia de los cloruros es contrarrestada a cierto grado por los otros aniones, que presentan valores más bajos, de modo que el sodio, que es el principal catión (y casi único, para estos fines), presenta una dependencia espacial que viene siendo un promedio de la de los aniones. En este sentido, la dinámica del sodio queda establecida por este promedio de los aniones.

Los resultados reportados por Palacio *et al.* (1994) para cloruros muestran rangos muy elevados, de 21 km; sin embargo, su distancia de separación es muy grande y sus semivariogramas corresponden a la fase de transición a la meseta, y el mismo autor señala la necesidad de tomar muestras a distancias más cortas. Igualmente, Pepiol (1997) obtiene rangos de 3 km para los cloruros. Un caso diferente es el de González (1997), quien encuentra rangos de 6 km para los cloruros del subsuelo de una zona costera de España afectada por intrusión marina.

4.2.2.10. CARBONATOS

Para la separación de 100 m, como se observa en los semivariogramas de las figuras 4.2.28. y 4.2.29., los valores de carbonatos del primer muestreo se ajustan mejor a un modelo lineal, mientras que los del segundo se ajustan mejor al modelo esférico. En ambos casos el valor C_0 representa un porcentaje mayor de 65% de la meseta, y la dependencia espacial es baja. Es notable que para el primer muestreo el rango es mayor que la mayor distancia, mientras que para el segundo el rango es menor a ella, (0.68 km). Esto puede deberse al incremento en el rango de las concentraciones de carbonatos que se dio para el segundo muestreo, que aumenta las diferencias entre las concentraciones separadas por las mismas distancias, así como a una migración diferente a la de iones más móviles como los cloruros, que genera patrones distintos de acumulación.

Los mapas de distribución de carbonatos muestran patrones de distribución muy semejantes, con la excepción del aumento en las superficies tanto de áreas con mayores concentraciones, en la parte media del área, como de áreas con menores concentraciones que se observan al sur. Esta mayor variabilidad que se presenta en el segundo muestreo lleva a que el mapa de error para éste señale valores de desviación estándar más altos para toda el área, lo que resalta la importancia de considerar la época de muestreo para la realización de estudios de este tipo.

El semivariograma de los carbonatos para 10 m de separación muestra una considerable disminución en el valor de C_0 con respecto a la distancia de 100 m (de más de 70% baja a 42%), y la dependencia espacial aumenta de 28 a 57%. Hay mayor estructura espacial y los cambios son más graduales, y el rango se presenta a los 42 m (figura 4.2.30.).

Palacio *et al.*(1994) reporta rangos de 28 km para los carbonatos; sin embargo, sus semivariogramas corresponden a la fase de la meseta debido a sus grandes distancias de muestreo, superiores a 450 m.

4.2.2.11. BICARBONATOS

A diferencia de los carbonatos, los semivariogramas de bicarbonatos a la distancia de 100 m se ajustan mejor al modelo esférico en ambos muestreos (figuras 4.2.31) y 4.2.32.). El nugget C_0 sigue siendo elevado y la dependencia espacial baja, pero al igual que los carbonatos, se presenta la marcada diferencia de un rango mayor (y por tanto mayor continuidad) para el primer muestreo, que para el segundo (rangos de 0.84 y 0.36 km., respectivamente, ambos menores que la menor distancia).

En comparación con los carbonatos, las concentraciones de bicarbonatos son muy bajas, pero presentan patrones de acumulación similares a los carbonatos, con los cuales se relacionan. Como se observa en los mapas correspondientes, al igual que en el caso de los carbonatos, para el segundo muestreo hay un aumento tanto en las áreas de mayor concentración, como en las de menor concentración, y este aumento en variabilidad que genera cambios más abruptos con la distancia, lleva a que el mapa de error para el segundo muestreo señale una menor confiabilidad que para el primer muestreo.

A la distancia de 10 m, los bicarbonatos presentan un comportamiento similar al de los carbonatos, aunque el valor C_0 del semivariograma es más reducido (21% de la meseta), lo que muestra mejor estructura espacial y cambios más graduales, con una alta dependencia espacial (78%). El rango es de 31 m, que coincide con el de la RAS y la conductividad eléctrica (figura 4.2.33.).

4.2.2.12. SULFATOS

A la distancia de 100 m, los sulfatos, que representan el tercer catión en orden de abundancia, también presentan semivariogramas que corresponden al modelo esférico (figuras 4.2.34. y 4.2.35.). Si bien el nugget C_0 es elevado, es menor que para el caso de cloruros y carbonatos, sobre todo en el segundo muestreo, y su dependencia espacial, aunque baja, es también mayor que la de éstos. Los rangos son menores de la máxima distancia, 0.78 y 0.32 km para el primer y segundo muestreo, respectivamente. Como se

aprecia en los mapas, el patrón de distribución presentado por los sulfatos es muy similar al del sodio, sobre todo en el segundo muestreo, donde las lluvias y su efecto en el lavado y arrastre de sales acentúan las diferencias entre al área central de altas concentraciones y la zona sur de concentraciones menores, lo que lleva a la disminución del rango del semivariograma y a una mayor desviación estándar del mapa de error para la mayor superficie de la zona de estudio, en comparación con el primer muestreo, en el que se observa mayor continuidad en la distribución de sulfatos en el área, con cambios menos abruptos.

A la distancia de 10 m, los sulfatos presentan también un incremento en su dependencia espacial con respecto a la distancia de 100, aunque en menor grado que otros aniones, debido tal vez a su menor movilidad. El valor C_0 es de 40% de la meseta, y la dependencia espacial llega a ser de 59%. El rango observado en el semivariograma es también el mayor de los aniones (48 m), lo que muestra un cambio más lento y menos abrupto en la concentración de sulfatos con la distancia (figura 4.2.36.). Contrastando con estos resultados, el rango encontrado para los sulfatos por Pepiol (1997) para un suelo salino de España es mayor de 3.6 km.

4.2.3. Efecto de la vegetación

Una característica observada en los resultados obtenidos, fue la marcada diferencia de los valores de salinidad y sodicidad entre los sitios donde existía vegetación, y los sitios carentes de ésta. Estas diferencias, además, se manifestaron de otra manera entre los dos periodos de muestreo, ya que durante la época de lluvias, se observó una marcada disminución en la salinidad de los sitios cubiertos por vegetación, mientras que los sitios carentes de ella no mostraron disminución en la salinidad, y en algunos casos se registró incluso un aumento.

En el apéndice C se señalan las coordenadas de los sitios donde se encontró vegetación presente. Del total de sitios muestreados, 76 presentaron esta característica (42% del total). Para estos sitios cubiertos por vegetación, la variación en los parámetros evaluados mostrada entre los dos periodos de muestreo se resume en los cuadros 4.2.7. (época seca) y 4.2.8. (época húmeda):

Cuadro 4.2.7. Características de las variables analizadas en sitios cubiertos por vegetación, primer muestreo.

Variable	Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar	C.V. %
CE	25.3	2.2	84.6	20.78	81.8
pH	9.3	8.0	10.1	0.47	5.1
Ca ²⁺	0.40	0.05	1.55	0.30	69.7
Mg ²⁺	0.36	0.05	0.80	0.17	47.3
Na ⁺	405.1	21.7	2000.7	442.29	109.1
K ⁺	28.2	2.5	125.8	28.79	101.8
RAS	590.1	23.2	3014.9	744.73	126.1
PSI	73.1	24.8	97.8	20.97	28.6
CO ₃ ²⁻	67.3	0.0	245.0	67.31	114.2
HCO ₃ ⁻	32.6	2.0	137.0	26.47	81.1
Cl ⁻	213.4	20.0	1220.0	229.55	107.5
SO ₄ ²⁻	39.5	0.0	218.4	52.72	133.1

Cuadro 4.2.8. Características de las variables analizadas en sitios cubiertos por vegetación, segundo muestreo.

Variable	Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar	C.V. %
CE	7.2	1.0	33.9	6.62	91.4
pH	9.8	9.2	10.6	0.25	2.6
Ca ²⁺	0.87	0.30	1.50	0.30	34.4
Mg ²⁺	0.57	0.10	1.25	0.27	46.8
Na ⁺	94.4	4.3	630.7	112.64	119.2
K ⁺	8.7	0.3	89.5	12.57	142.9
RAS	85.6	2.7	891.9	125.25	146.1
PSI	42.5	2.71	92.9	21.56	50.6
CO ₃ ²⁻	12.4	1.0	94.0	16.10	128.9
HCO ₃ ⁻	6.8	0.0	37.0	8.22	119.5
Cl ⁻	54.5	7.0	335.0	62.51	114.5
SO ₄ ²⁻	10.4	0.0	102.8	16.29	155.9

Al comparar los cuadros anteriores, puede observarse una notable disminución en la salinidad del suelo en el segundo muestreo, correspondiente a la época de lluvias. Así, la conductividad eléctrica promedio disminuye de 25 a 7 dS m⁻¹, y los contenidos de Na⁺, K⁺, CO₃²⁻, HCO₃⁻, Cl⁻ y SO₄²⁻ disminuyen en proporción similar, lo cual puede considerarse lógico, en virtud de que las lluvias provocan un lavado de sales de las capas superficiales del suelo, arrastrándolas a capas más profundas, y esto es un proceso que va de acuerdo con

lo descrito en el capítulo 4.1. para un perfil bajo observación mensual, y corresponde a observaciones como las de Ramos (1979), Ortiz (1988b) y Del Valle (1983). La RAS y el PSI igualmente disminuyen. Esto, sin embargo, es debido en gran parte a que, se observa un aumento en los contenidos de Ca^{2+} y Mg^{2+} ; el pH también aumenta.

Los sitios carentes de vegetación constituyeron el 58% del total. En ellos, los cambios en la salinidad tuvieron un comportamiento distinto (cuadros 4.2.9. y 4.2.10.):

Cuadro 4.2.9. Características de las variables analizadas en sitios carentes de vegetación, primer muestreo.

Variable	Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar	C.V. %
CE	99.9	23.6	157.8	27.09	27.1
pH	9.6	9.2	9.9	0.17	1.7
Ca^{2+}	0.15	0.05	0.55	0.09	63.8
Mg^{2+}	0.19	0.05	0.50	0.10	53.6
Na^+	2307.2	282.7	6089.3	1087.13	47.1
K^+	146.6	5.2	380.5	65.55	44.6
RAS	4585.6	421.4	15722.5	2919.65	63.6
PSI	97.6	86.1	99.6	2.26	2.31
CO_3^{2-}	288.1	44.0	780.0	132.50	46.0
HCO_3^-	96.1	2.0	280.0	52.70	54.8
Cl^-	1274.8	170.0	3850.0	685.16	53.7
SO_4^{2-}	247.3	8.5	621.1	132.20	53.4

Cuadro 4.2.10. Características de las variables analizadas en sitios carentes de vegetación, segundo muestreo.

Variable	Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar	C.V. %
CE	114.1	25.2	169.2	26.85	23.5
pH	10.6	10.3	10.9	0.14	1.3
Ca^{2+}	0.51	0.15	1.50	0.24	46.5
Mg^{2+}	0.38	0.15	1.00	0.16	44.6
Na^+	3125.8	387.1	7220.5	1424.79	45.5
K^+	181.8	5.1	347.8	65.24	35.8
RAS	3521.9	462.6	8950.2	1879.80	53.3
PSI	97.4	87.1	99.2	1.78	1.82
CO_3^{2-}	413.0	55.0	890.0	158.20	38.2
HCO_3^-	133.7	19.0	385.0	84.50	63.2
Cl^-	1761.7	195.0	4250.0	864.0	49.0
SO_4^{2-}	318.3	34.2	856.8	167.50	52.6

La comparación de estos cuadros señala un aumento general en la salinidad de los sitios muestreados durante la época de lluvias. Por ejemplo, la conductividad eléctrica promedio aumenta de 99 a 114 dS m⁻¹, e igualmente aumentan los contenidos de todos los aniones y cationes. La RAS y el PSI disminuyen debido a que los contenidos de Ca²⁺ y Mg²⁺ aumentan en mayor proporción que el Na⁺.

Estos aumentos en la salinidad van en contra de lo que cabría esperar, ya que en estos sitios no se observa que la lluvia tenga un efecto de disminución de la salinidad en la capa superficial del suelo. Considerando que en la zona existe una gran cantidad de grietas, y tomando en cuenta la baja permeabilidad del suelo debido a la dispersión de los coloides propiciada por los altos niveles de PSI, es muy probable que la lluvia en las zonas carentes de vegetación no se infiltre verticalmente, sino que escurra horizontalmente hacia las grietas, sin efectuar un lavado de sales del suelo, y dejando expuestos estos sitios a la evaporación, con lo que aumenta la salinidad, algo similar a lo señalado por Dagar *et al.* (1992) para suelos de manglares. En cambio, en los sitios con vegetación, la estructura del suelo se ha mejorado notablemente debido a la presencia de raíces y materia orgánica, con lo cual la infiltración aumenta, permitiendo que la lluvia efectúe un lavado de las sales a capas más profundas, disminuyendo la salinidad. Por otro lado, el establecimiento vegetal en la zona origina la formación de pequeñas dunas sobre las que se asienta la vegetación, y que están ligeramente más elevadas que el terreno sin vegetación que las rodea, de modo que también es posible que exista un desplazamiento de sales hacia estos sitios, contribuyendo a elevar su salinidad. Asimismo, se hace necesario un estudio sobre el comportamiento del manto freático en la zona, para determinar su papel en la dinámica de las sales. La ausencia de un proceso de lavado en estos sitios durante la época de lluvias explica la carencia de germinación o establecimiento de plántulas en ellos, ya que la salinidad se mantiene durante todo el año en niveles muy elevados, y por este motivo en la actualidad los sitios carentes de vegetación continúan siéndolo, sin posibilidad de un establecimiento natural de las plantas.

Para confirmar si existía diferencia entre los parámetros analizados correspondientes a sitios con y sin vegetación, y entre las dos épocas de muestreo, se realizó el análisis estadístico de prueba de t para comparación de medias (cuadro 4.2.11.).

Cuadro 4.2.11. Comparación de medias para sitios con y sin vegetación para ambos muestreos.

Entre sitios con y sin vegetación del primer muestreo		Entre sitios con y sin vegetación del segundo muestreo		Entre sitios sin vegetación del primero y segundo muestreos		Entre sitios con vegetación del primero y segundo muestreos	
CE	*	CE	*	CE	*	CE	*
pH	*	pH	*	pH	*	pH	*
Ca ²⁺	*	Ca ²⁺	*	Ca ²⁺	*	Ca ²⁺	*
Mg ²⁺	*	Mg ²⁺	*	Mg ²⁺	*	Mg ²⁺	*
Na ⁺	*	Na ⁺	*	Na ⁺	*	Na ⁺	*
K ⁺	*	K ⁺	*	K ⁺	*	K ⁺	*
RAS	*	RAS	*	RAS	*	RAS	*
PSI	*	PSI	*	PSI	x	PSI	*
CO ₃ ²⁻	*	CO ₃ ²⁻	*	CO ₃ ²⁻	*	CO ₃ ²⁻	*
HCO ₃ ⁻	*	HCO ₃ ⁻	*	HCO ₃ ⁻	*	HCO ₃ ⁻	*
Cl ⁻	*	Cl ⁻	*	Cl ⁻	*	Cl ⁻	*
SO ₄ ²⁻	*	SO ₄ ²⁻	*	SO ₄ ²⁻	*	SO ₄ ²⁻	*

* = diferencia significativa al 95%

x = no significativo

Existe diferencia estadísticamente significativa entre los valores de los parámetros analizados en función de la presencia o ausencia de vegetación, así como entre las dos épocas de muestreo. La única variable que no presentó diferencia significativa fue el PSI en los sitios carentes de vegetación, para las dos épocas de muestreo. En este caso, puede tomarse en cuenta que los valores de la RAS a partir de los cuales se calculó el PSI, son tan altos que, a pesar de presentar diferencias, dan valores de PSI muy elevados y similares, de más de 97%.

Otro método estadístico que permite llegar a las mismas conclusiones es el análisis de grupos o enjambres (análisis de "clusters"). La figura 4.2.37. muestra los resultados del análisis de clusters practicado a la relación de la biomasa total con tres de las variables analizadas. En el caso de la conductividad eléctrica y de la concentración de cloruros, se puede observar la clara distinción de dos grupos, uno de ellos correspondiente a los sitios donde existía una vegetación presente, caracterizado por valores de biomasa total superiores a cero, y otro en la parte baja de la gráfica, con valor de biomasa de cero, correspondiente a los sitios carentes de vegetación. El resto de los iones (no mostrados) presentaron una tendencia similar. El PSI también muestra dos grupos de datos, aunque con

una separación menos clara, pero de todas formas se distingue el grupo de sitios carentes de vegetación, con valores de PSI muy elevados, en el extremo derecho inferior de la gráfica. En varios estudios se aprecian diferencias marcadas en las propiedades del suelo entre sitios con y sin vegetación; Ramos (1979) encontró en la laguna Del Carmen que sitios con vegetación halófila presentaban valores de salinidad mucho más bajos que sitios sin vegetación. Igualmente, Delgado (1985) encontró relaciones estadísticamente significativas entre la presencia de vegetación y las variables CE y PSI en una cuenca endorreica del Estado de Jalisco.

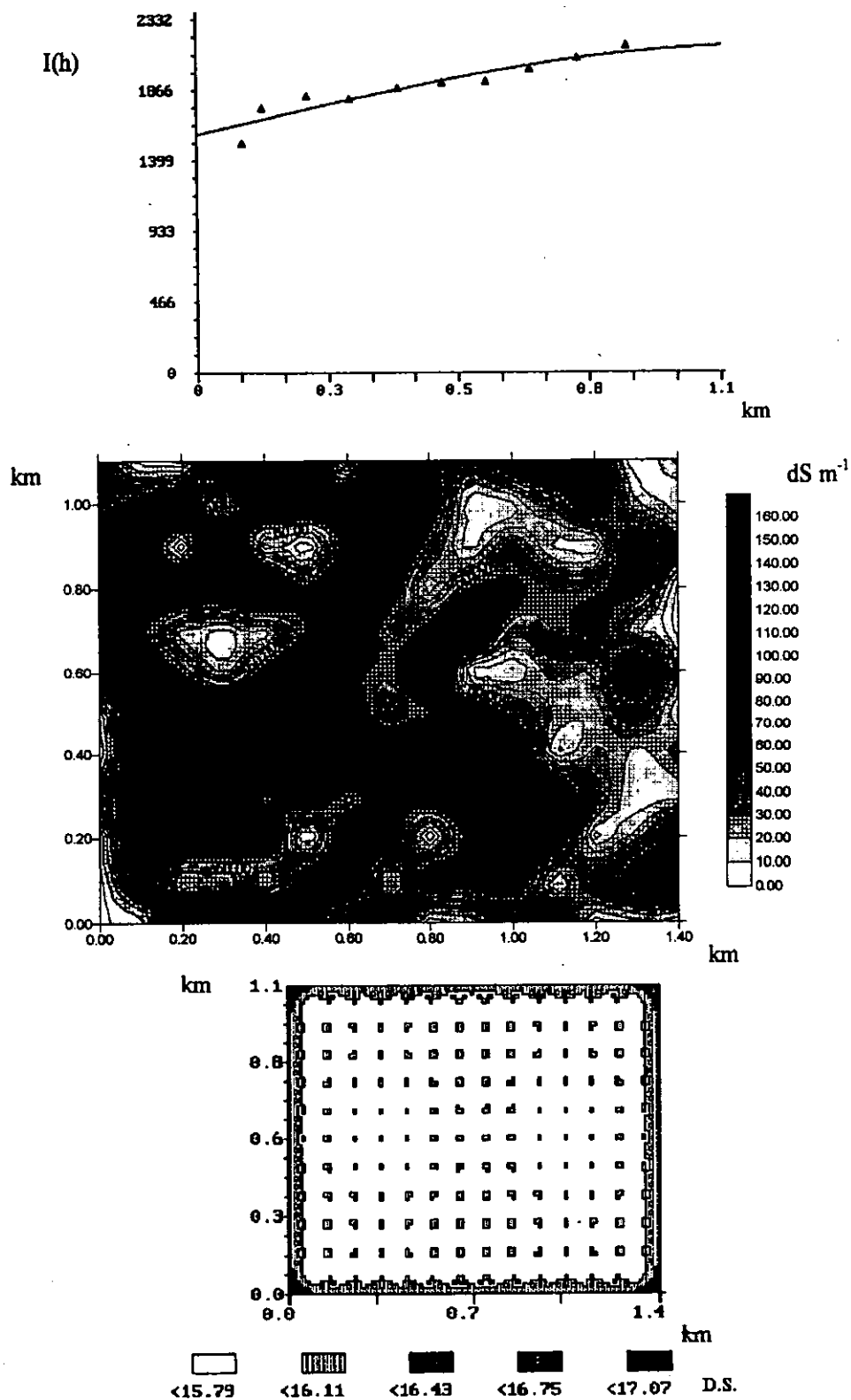


Figura 4.2.1. Semivariograma experimental y teórico (modelo esférico), mapa de distribución y mapa de error para la CE, primer muestreo (separación 100 m).

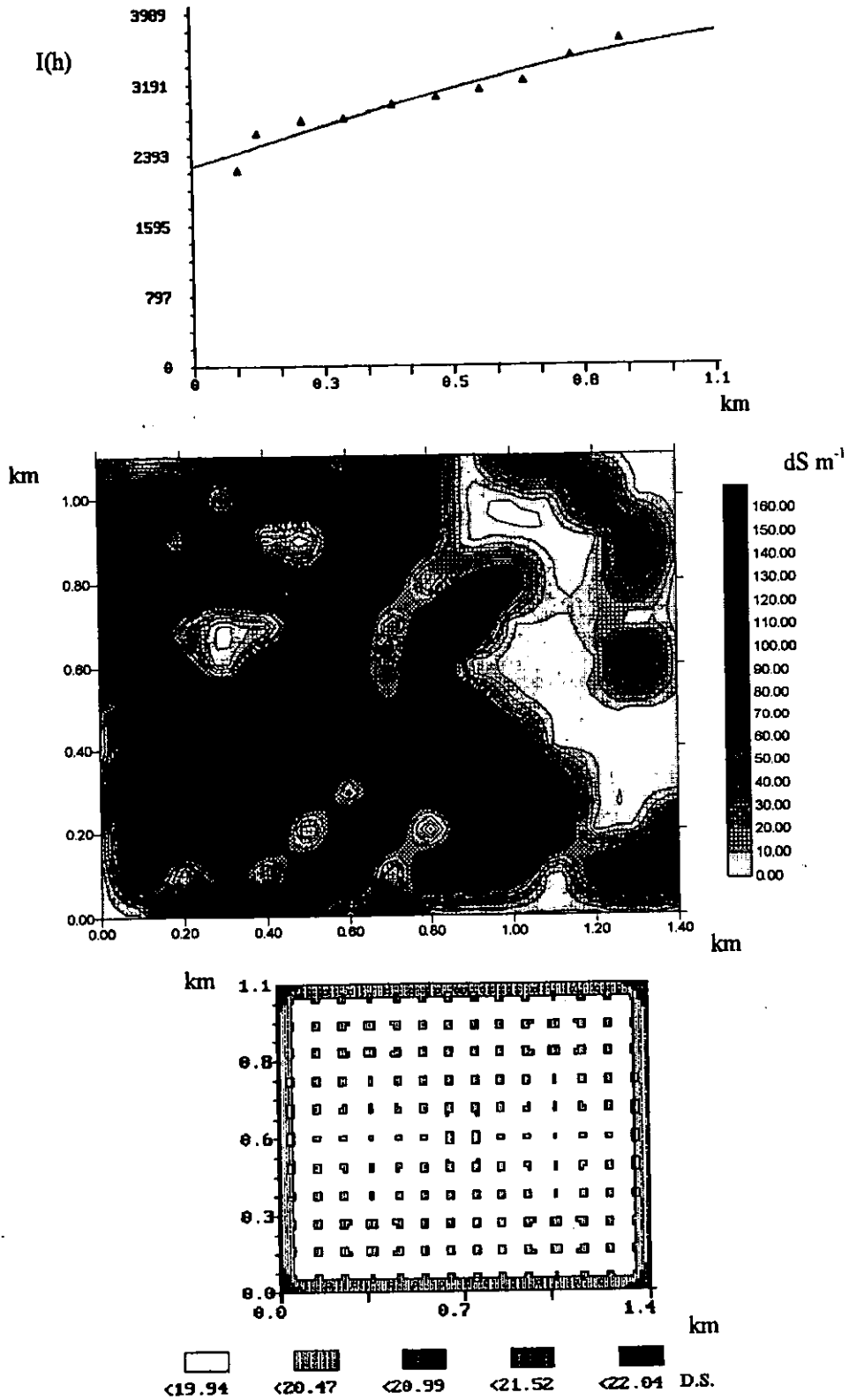


Figura 4.2.2. Semivariograma experimental y teórico (modelo esférico), mapa de distribución y mapa de error para la CE, segundo muestreo (separación 100 m).

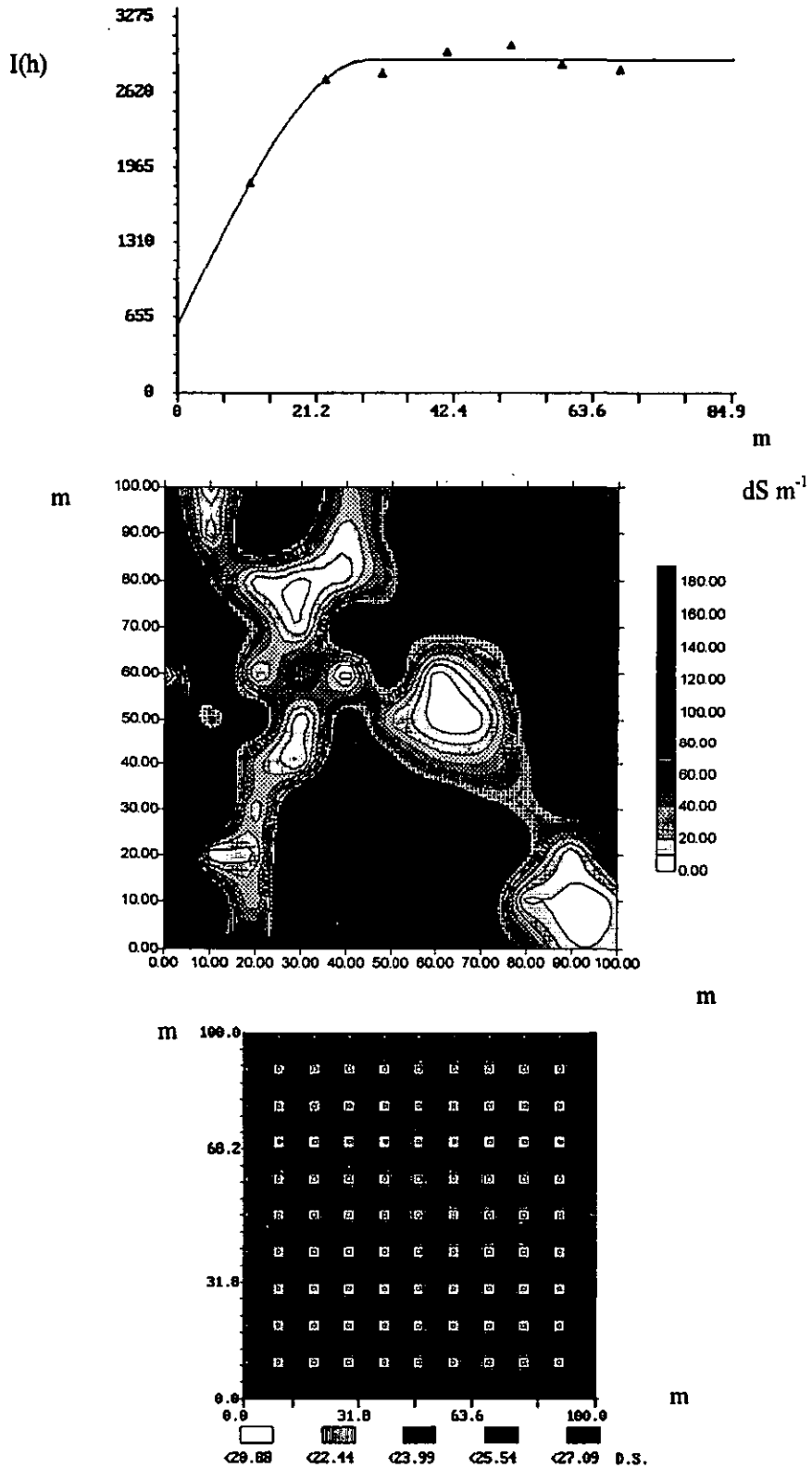


Figura 4.2.3. Semivariograma experimental y teórico (modelo esférico), mapa de distribución y mapa de error para la CE (separación 10 m).

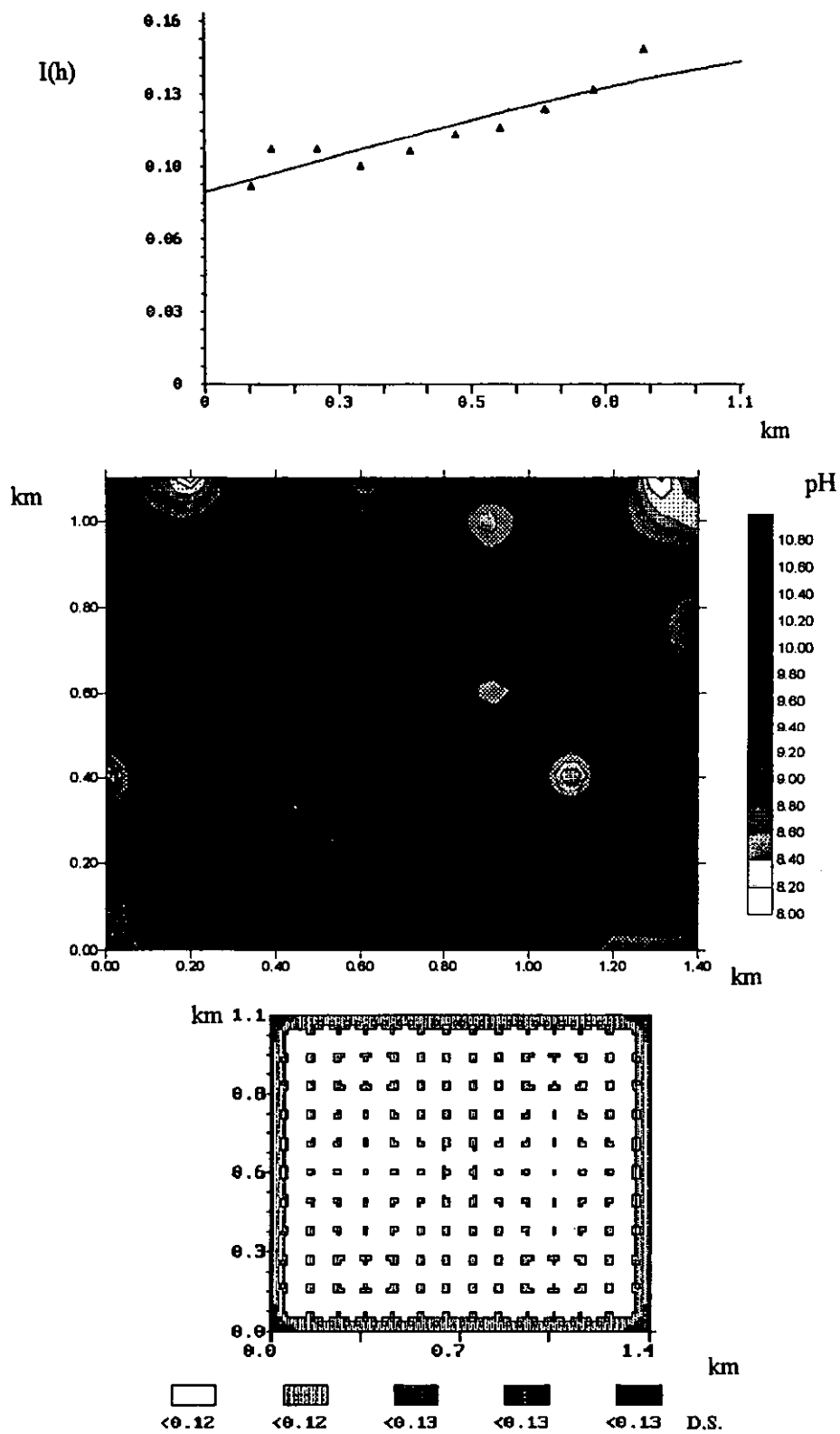


Figura 4.2.4. Semivariograma experimental y teórico (modelo esférico), mapa de distribución y mapa de error para el pH, primer muestreo (separación 100 m).

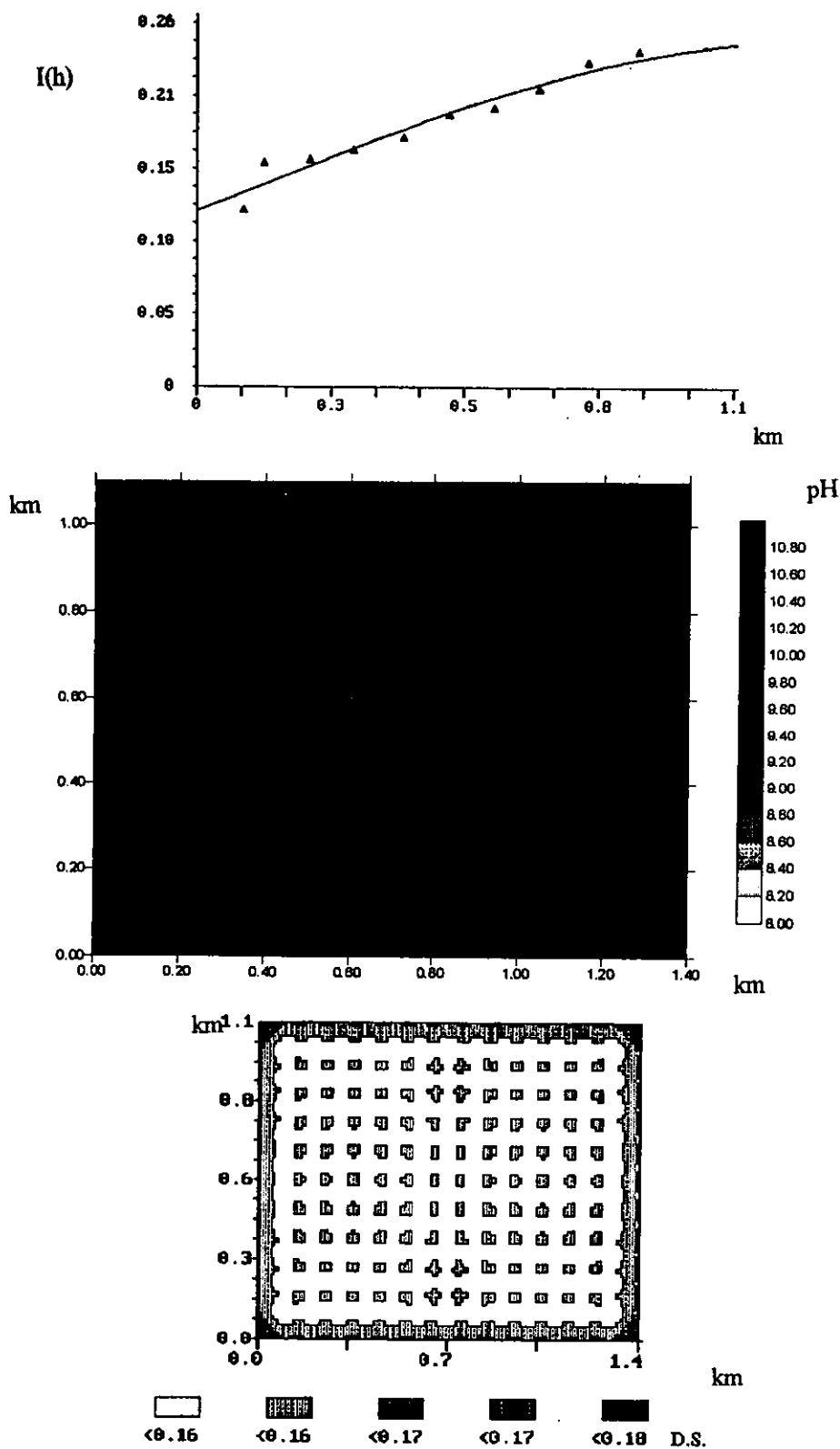


Figura 4.2.5. Semivariograma experimental y teórico (modelo esférico), mapa de distribución y mapa de error para el pH, segundo muestreo (separación 100 m).

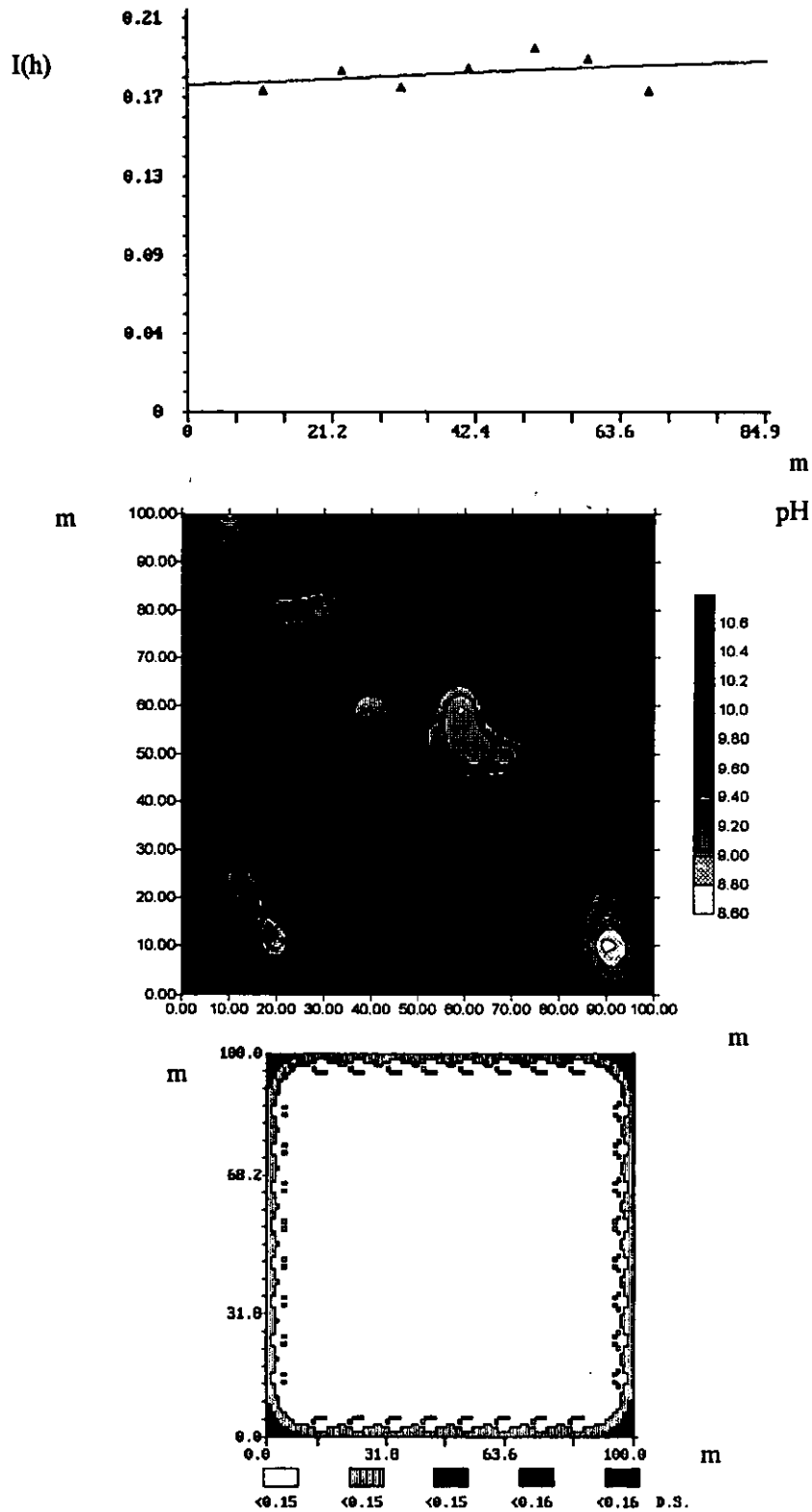


Figura 4.2.6. Semivariograma experimental y teórico (modelo esférico), mapa de distribución y mapa de error para el pH (separación 100 m).

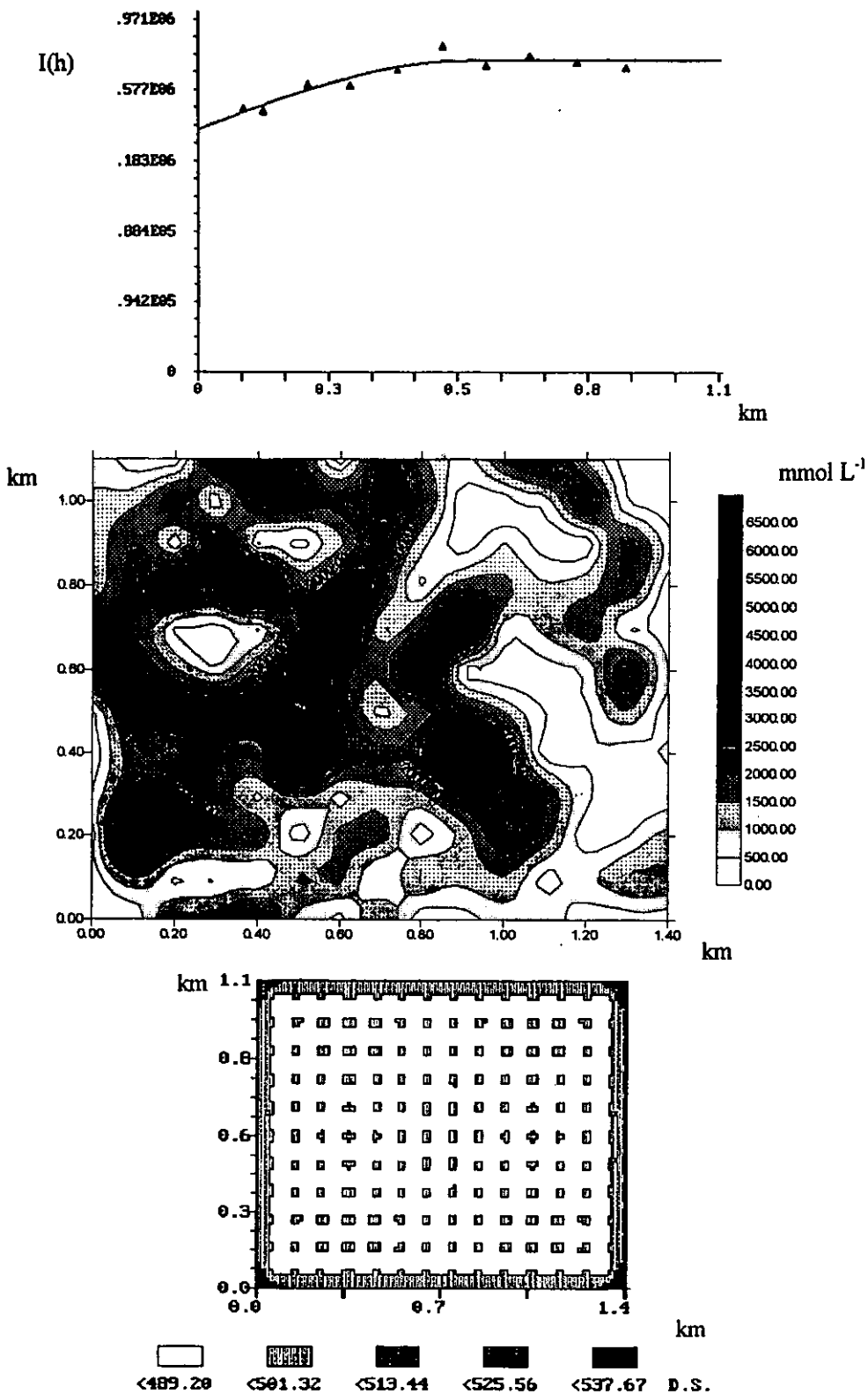


Figura 4.2.7. Semivariograma experimental y teórico (modelo esférico), mapa de distribución y mapa de error para el sodio, primer muestreo (separación 100 m).

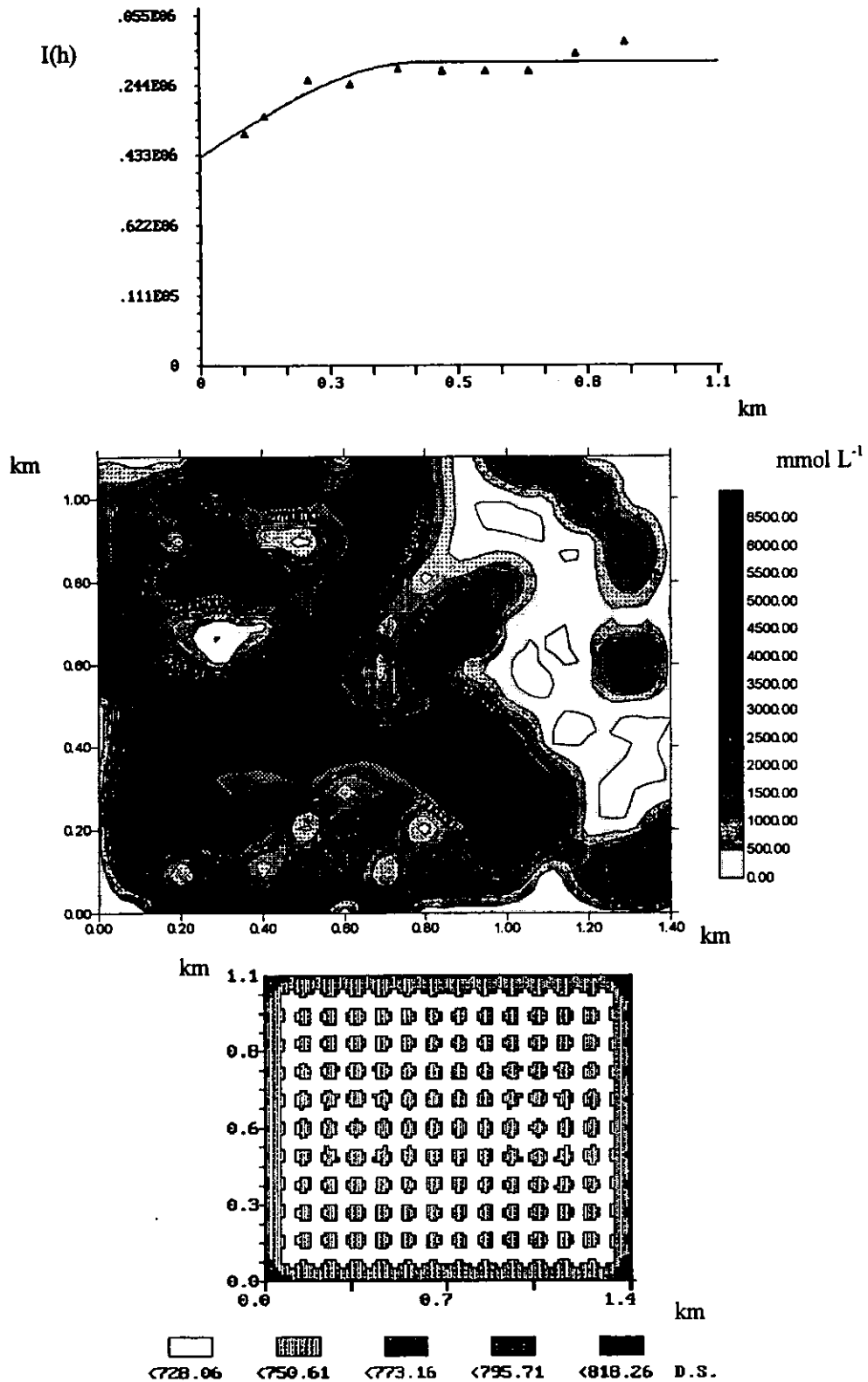


Figura 4.2.8. Semivariograma experimental y teórico (modelo esférico), mapa de distribución y mapa de error para el sodio, segundo muestreo (separación 100 m).

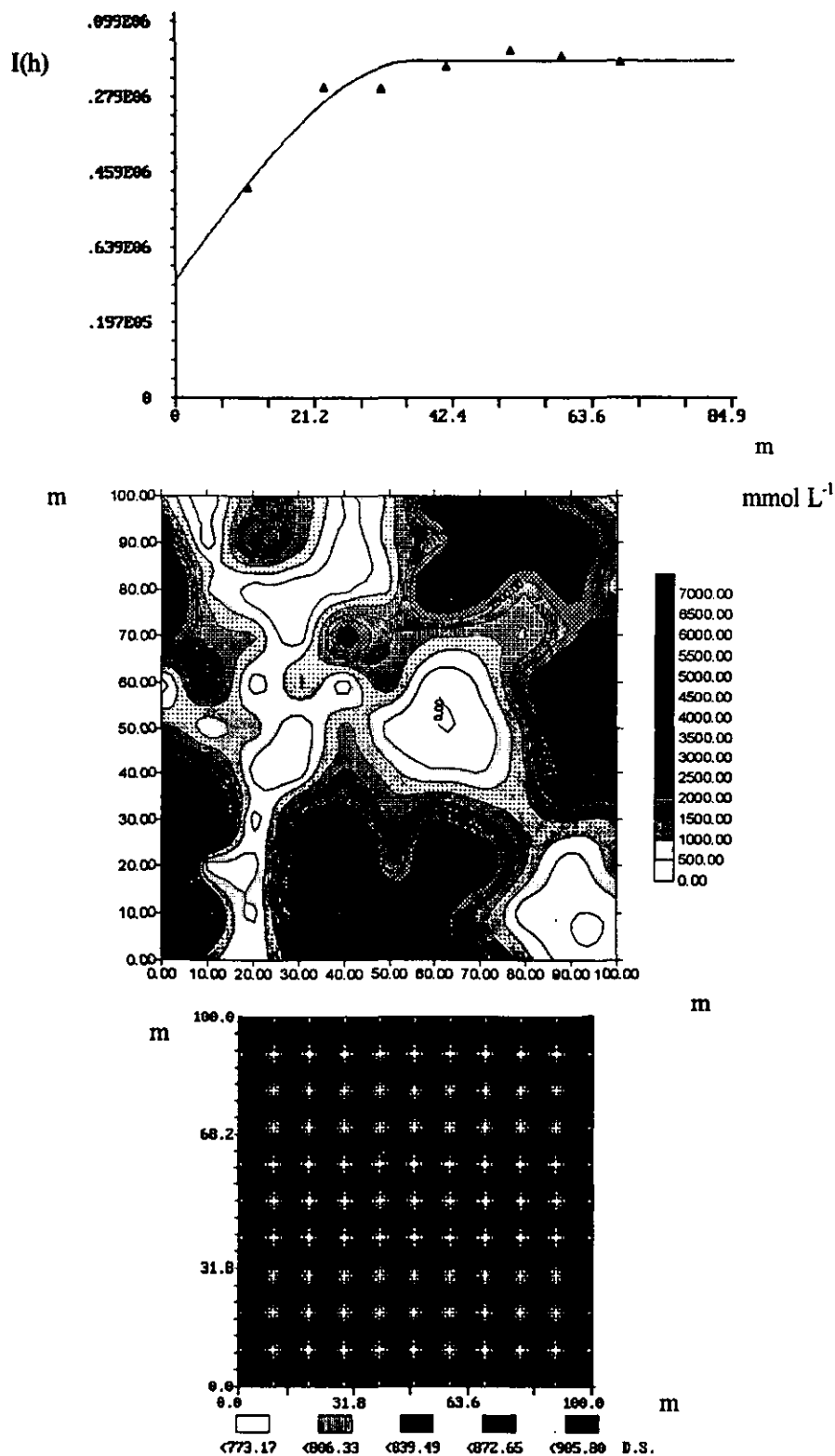


Figura 4.2.9. Semivariograma experimental y teórico (modelo esférico), mapa de distribución y mapa de error para el sodio (separación 10 m).

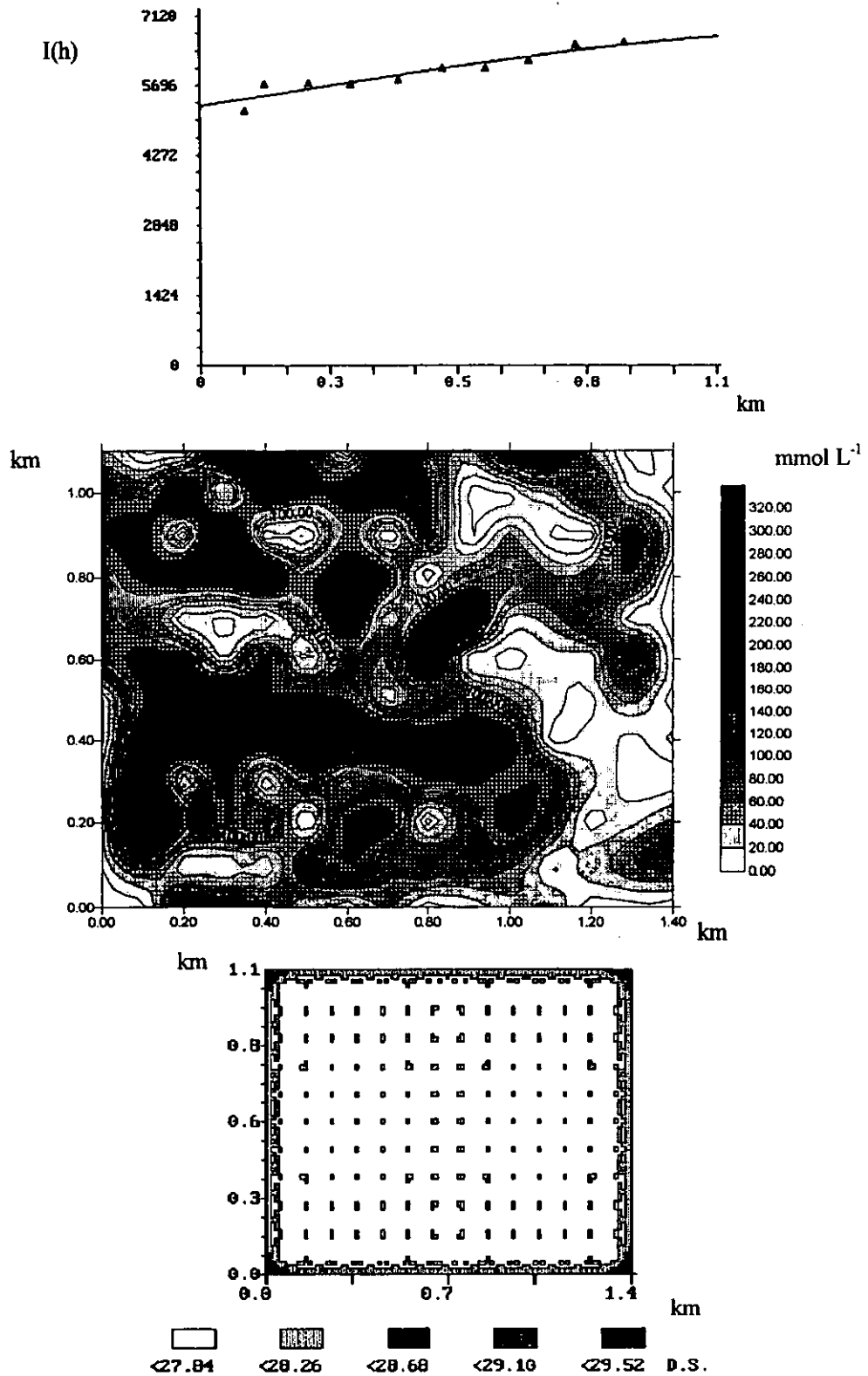


Figura 4.2.10. Semivariograma experimental y teórico (modelo esférico), mapa de distribución y mapa de error para el potasio, primer muestreo (separación 100 m).

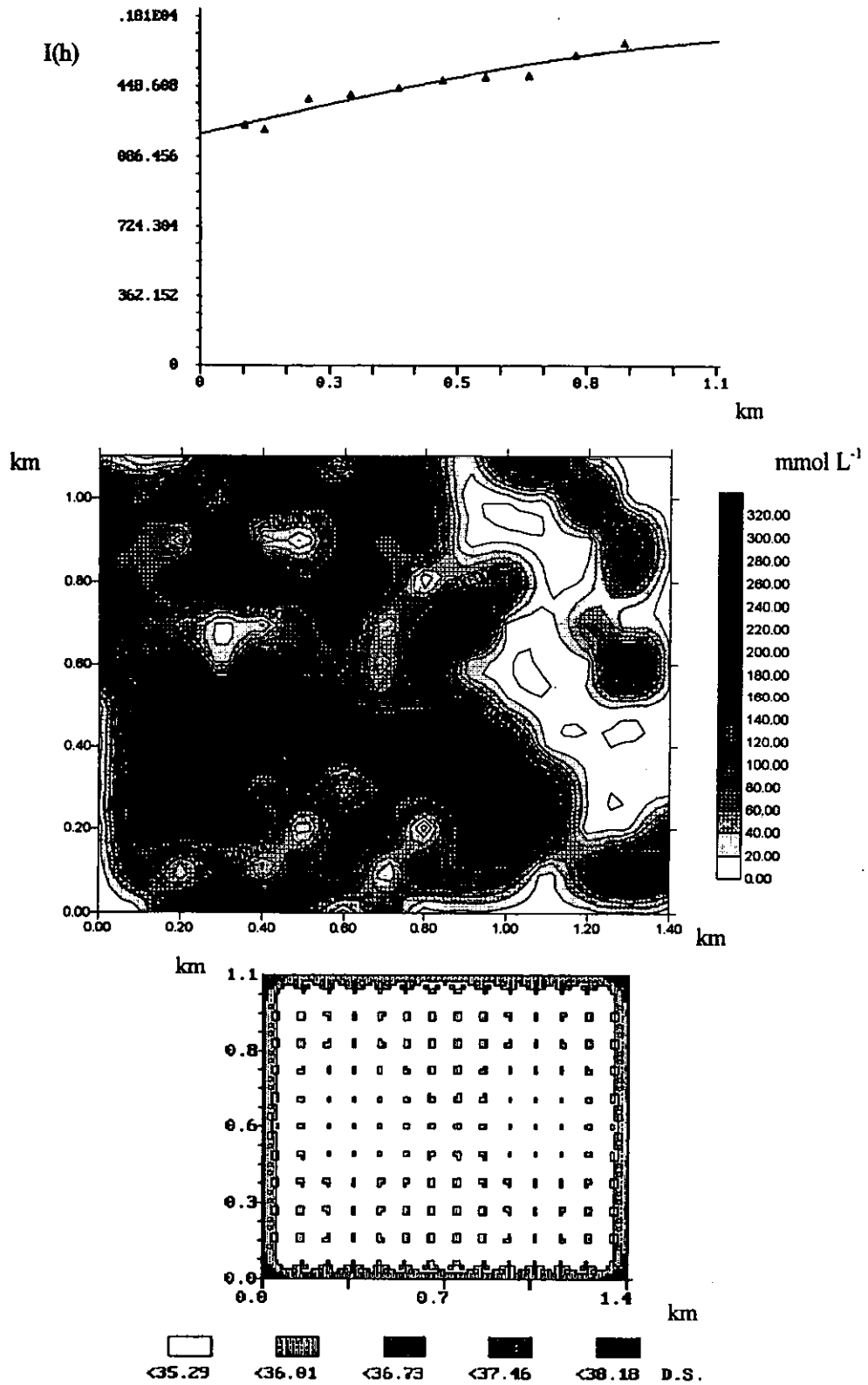


Figura 4.2.11. Semivariograma experimental y teórico (modelo esférico), mapa de distribución y mapa de error para el potasio, segundo muestreo (separación 100 m).

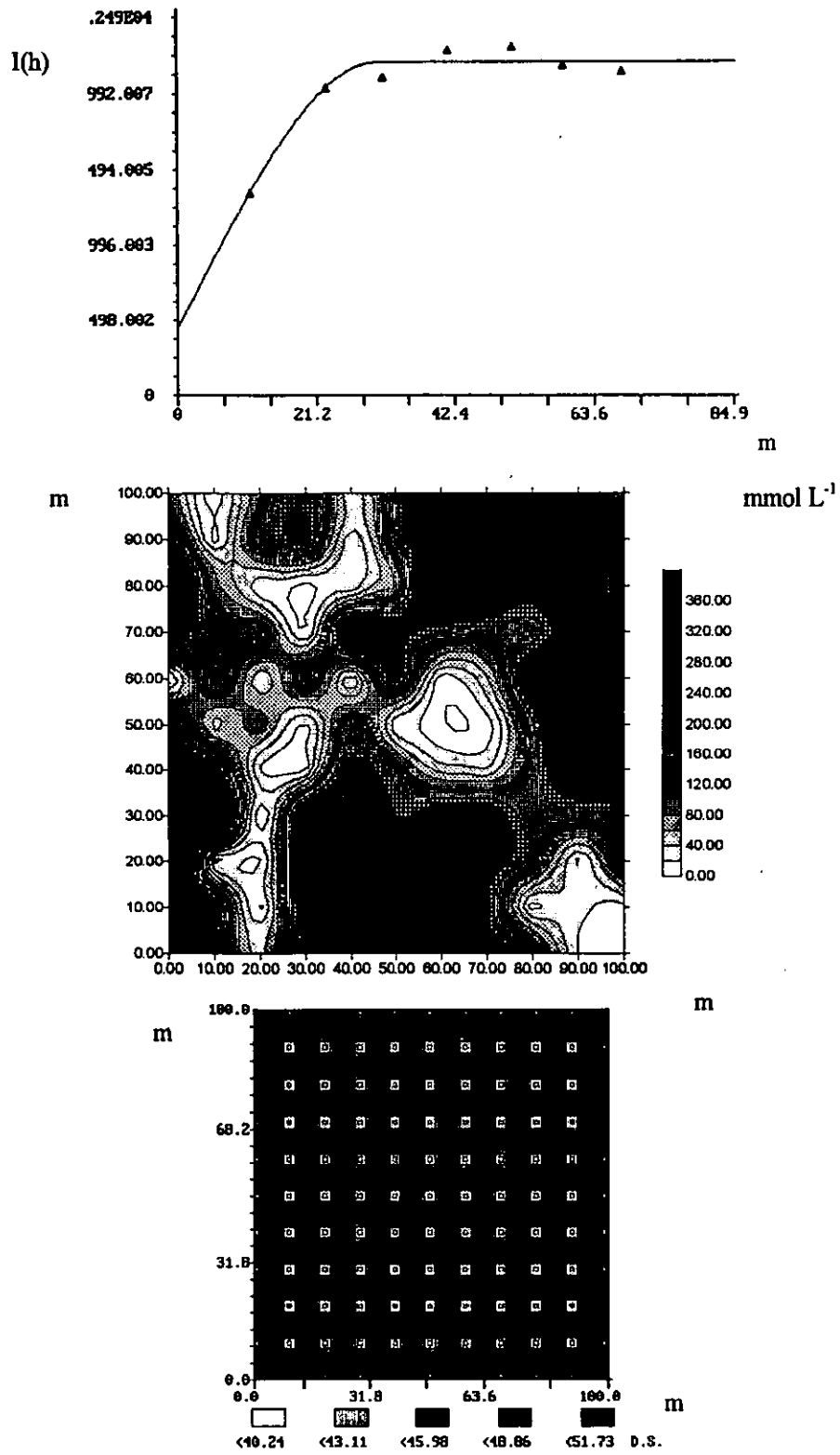


Figura 4.2.12. Semivariograma experimental y teórico (modelo esférico), mapa de distribución y mapa de error para el potasio (separación 10 m).

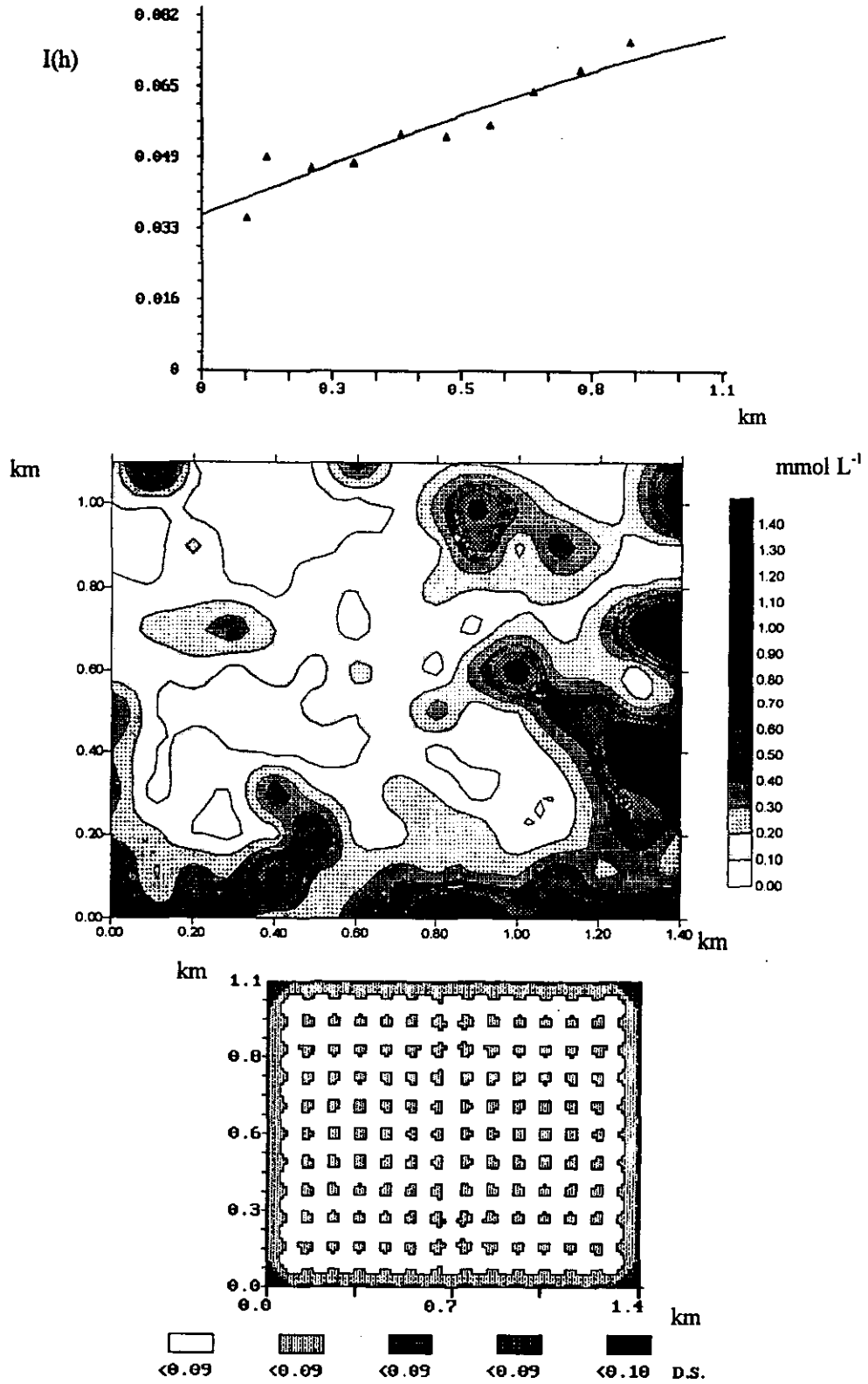


Figura 4.2.13. Semivariograma experimental y teórico (modelo esférico), mapa de distribución y mapa de error para el calcio, primer muestreo (separación 100 m).

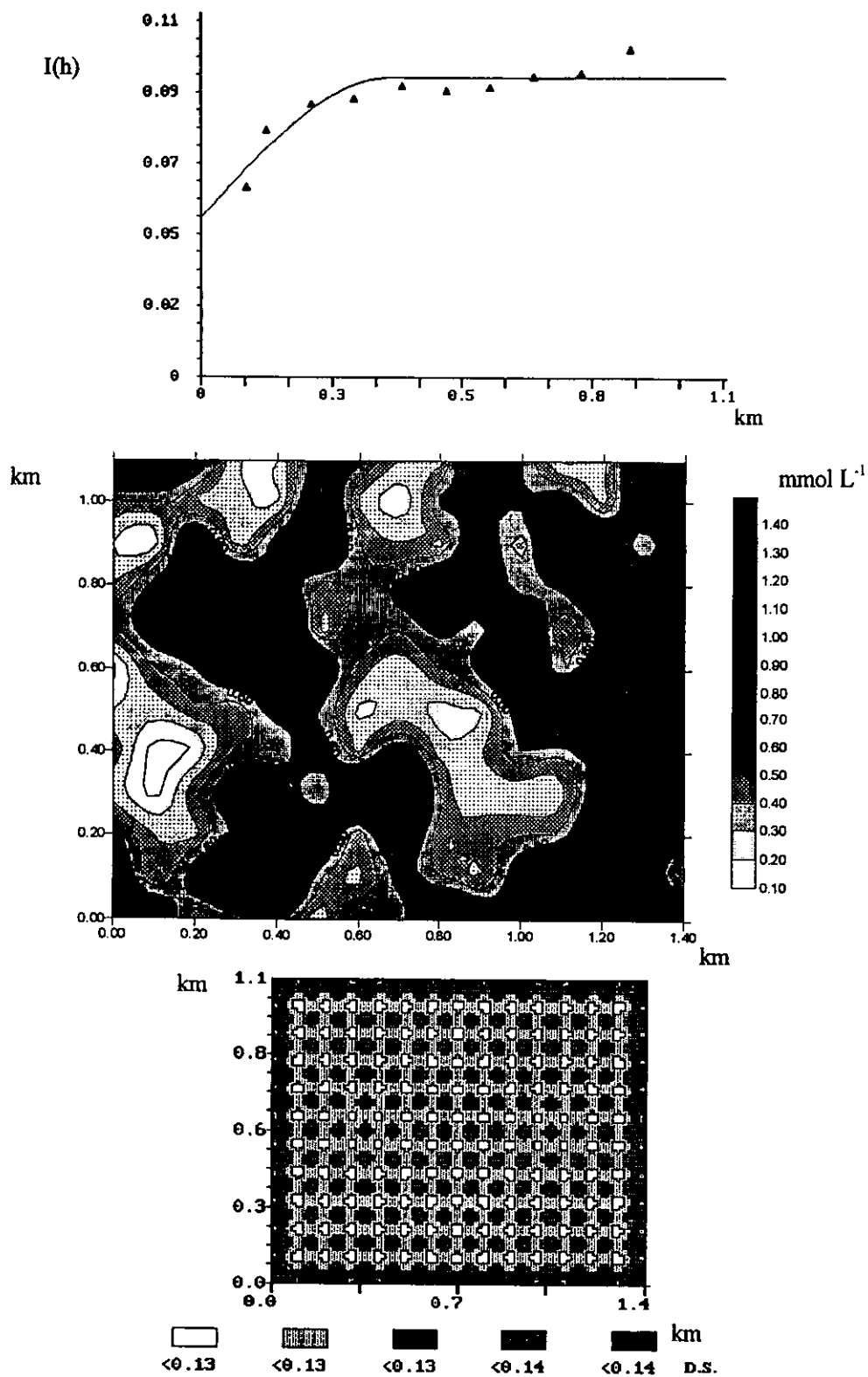


Figura 4.2.14. Semivariograma experimental y teórico (modelo esférico), mapa de distribución y mapa de error para el calcio, segundo muestreo (separación 100 m).

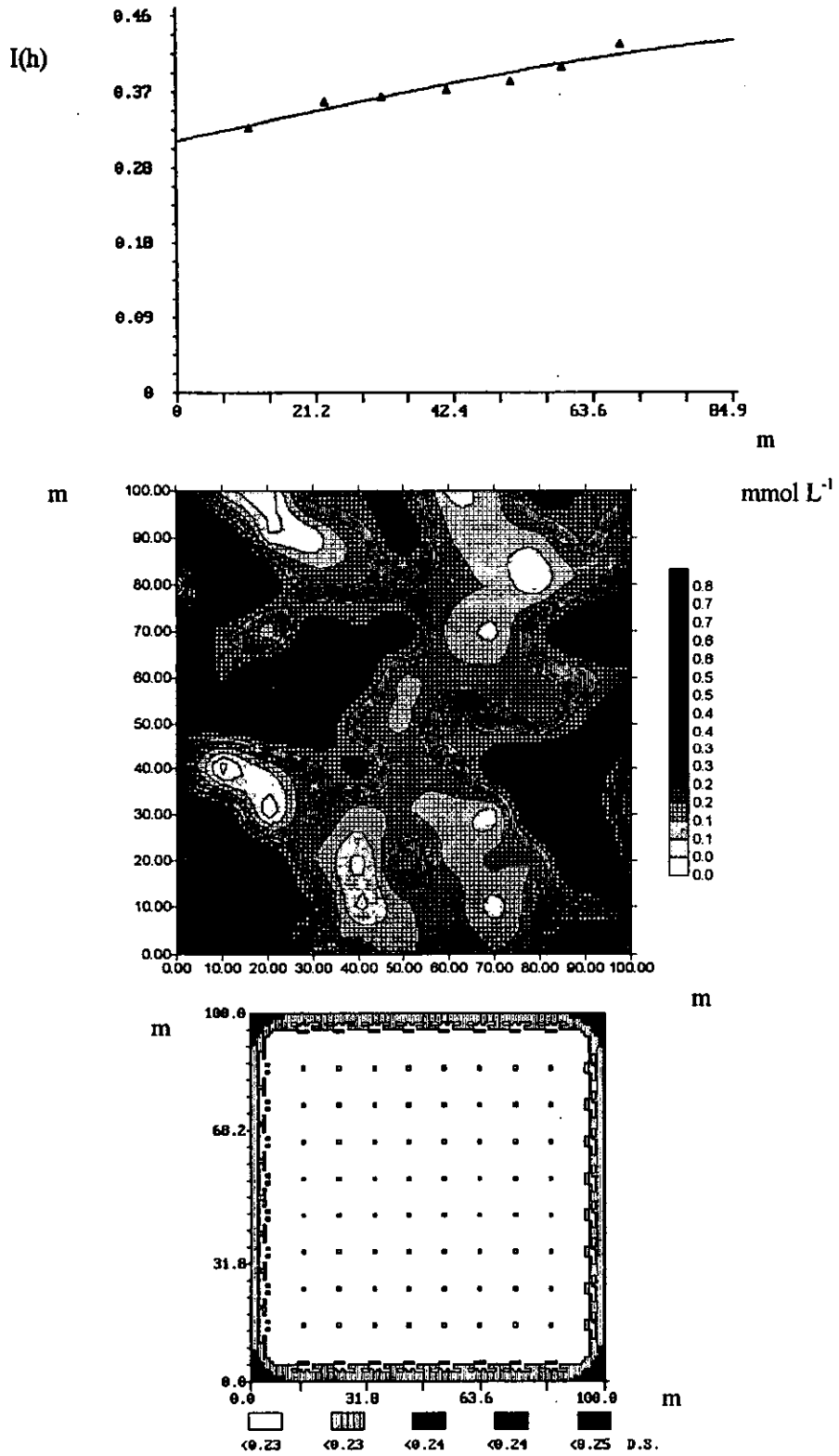


Figura 4.2.15. Semivariograma experimental y teórico (modelo esférico), mapa de distribución y mapa de error para el calcio (separación 10 m).

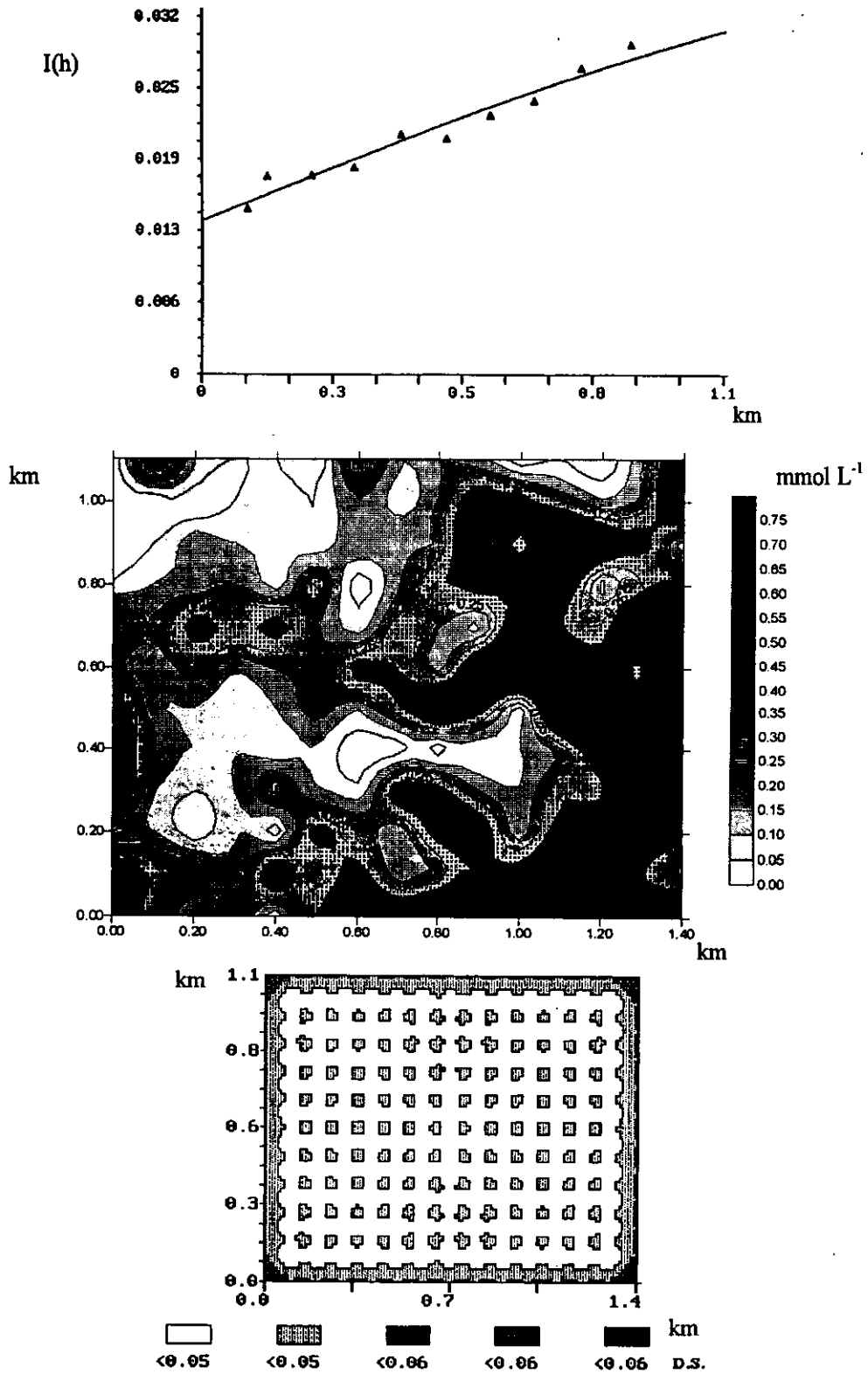


Figura 4.2.16. Semivariograma experimental y teórico (modelo esférico), mapa de distribución y mapa de error para el magnesio, primer muestreo (separación 100 m).

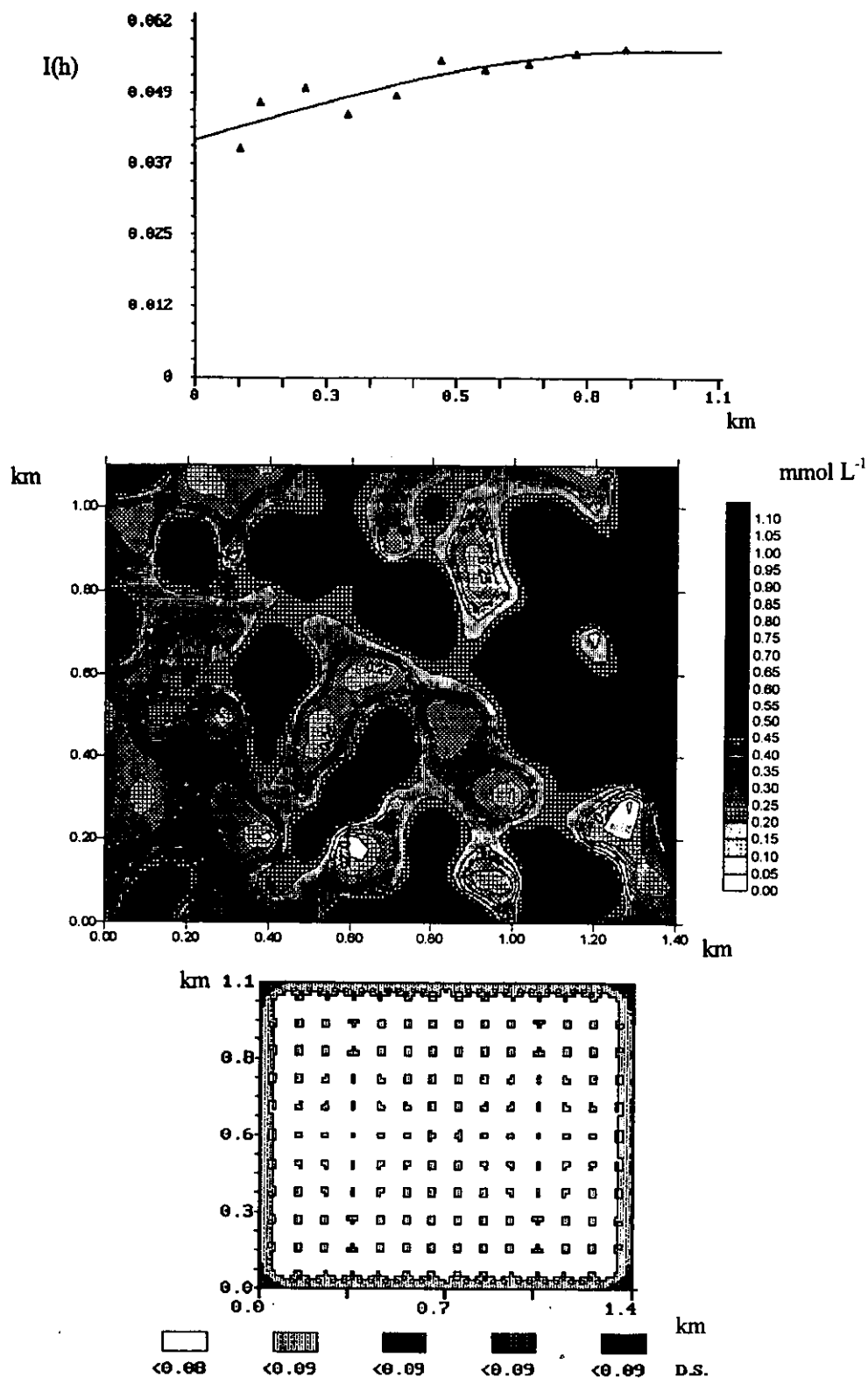


Figura 4.2.17. Semivariograma experimental y teórico (modelo esférico), mapa de distribución y mapa de error para el magnesio, segundo muestreo (separación 100 m).

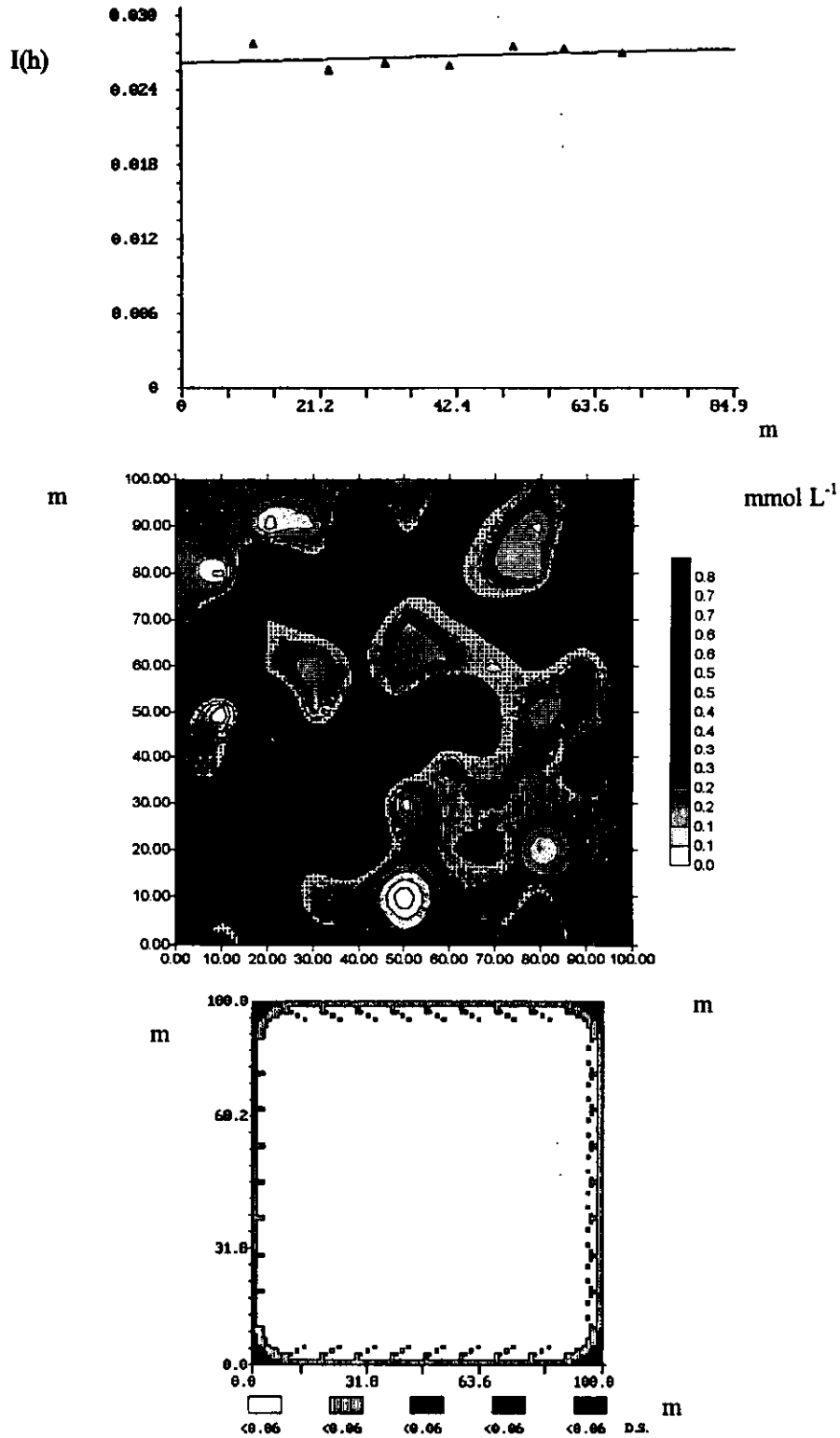


Figura 4.2.18. Semivariograma experimental y teórico (modelo esférico), mapa de distribución y mapa de error para el magnesio (separación 10 m).

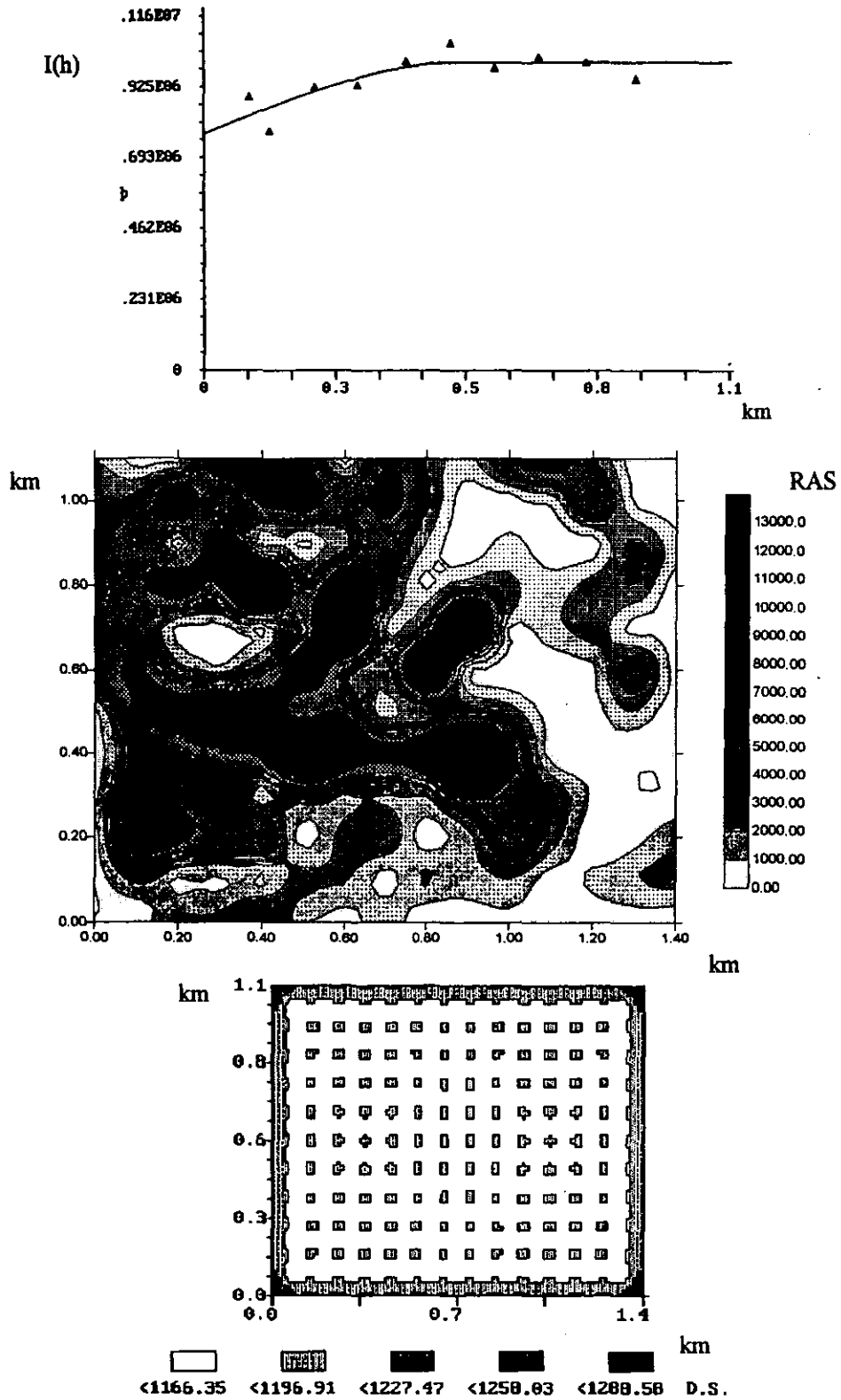


Figura 4.2.19. Semivariograma experimental y teórico (modelo esférico), mapa de distribución y mapa de error para la RAS, primer muestreo (separación 100 m).

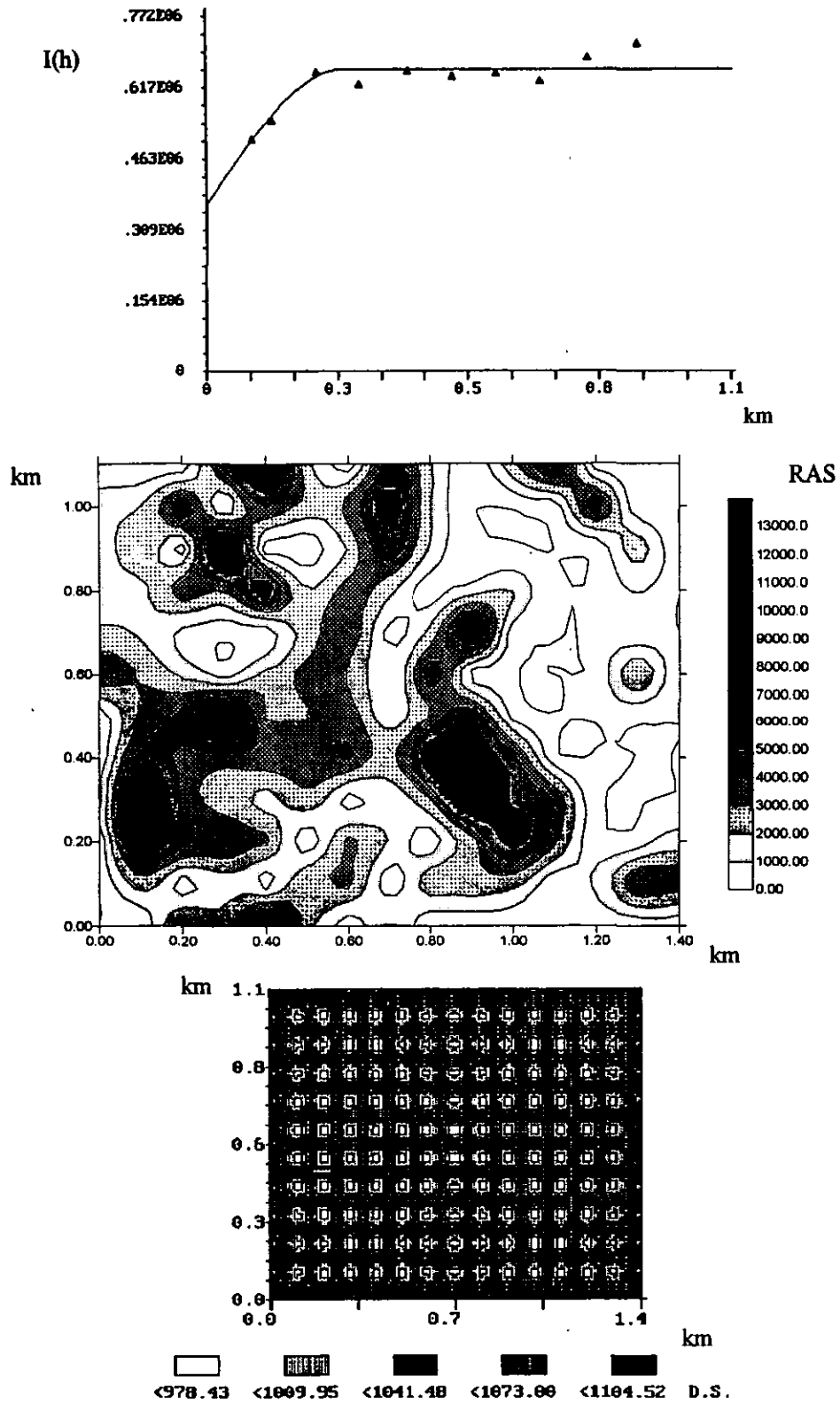


Figura 4.2.20. Semivariograma experimental y teórico (modelo esférico), mapa de distribución y mapa de error para la RAS, segundo muestreo (separación 100 m).

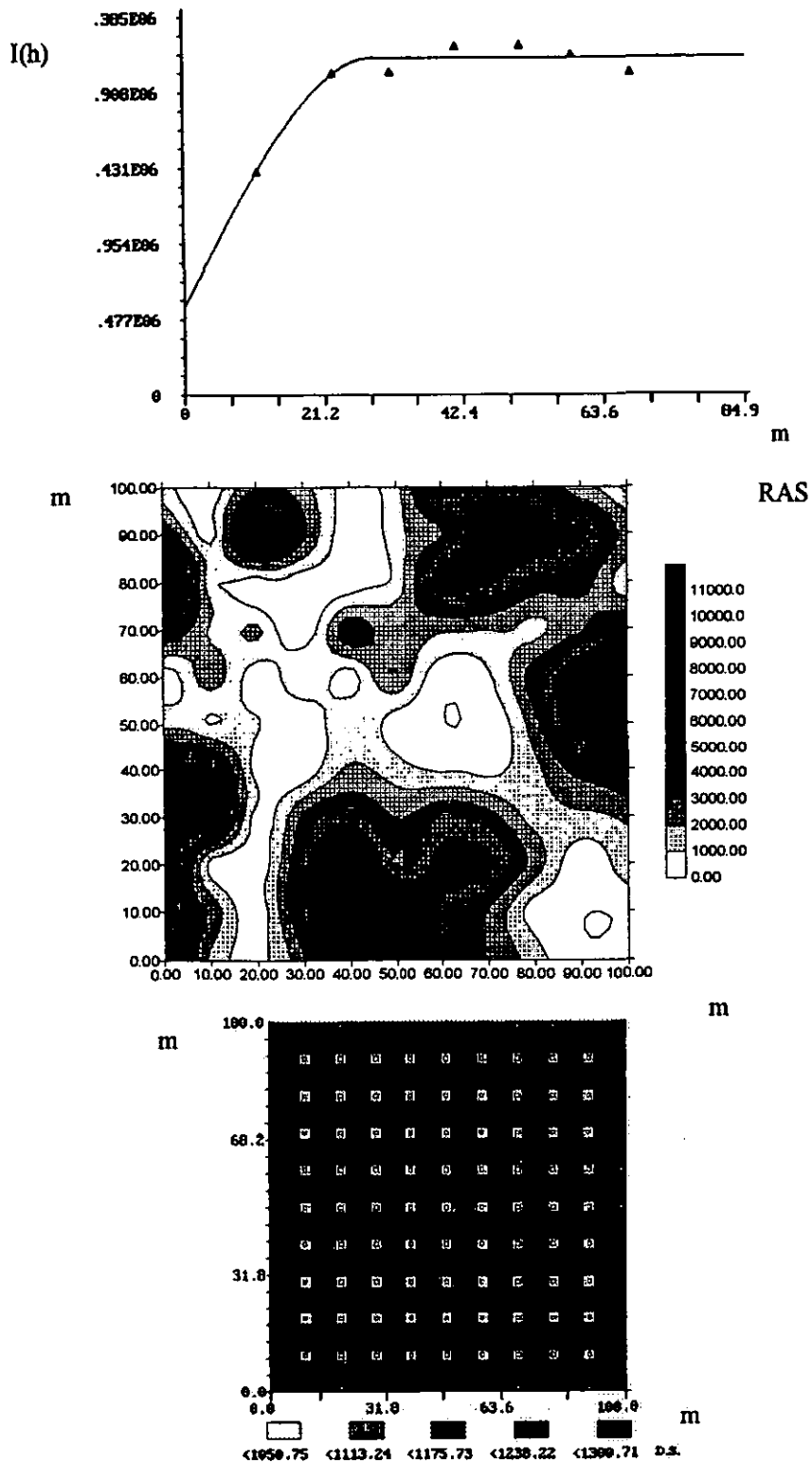


Figura 4.2.21. Semivariograma experimental y teórico (modelo esférico), mapa de distribución y mapa de error para la RAS (separación 10 m).

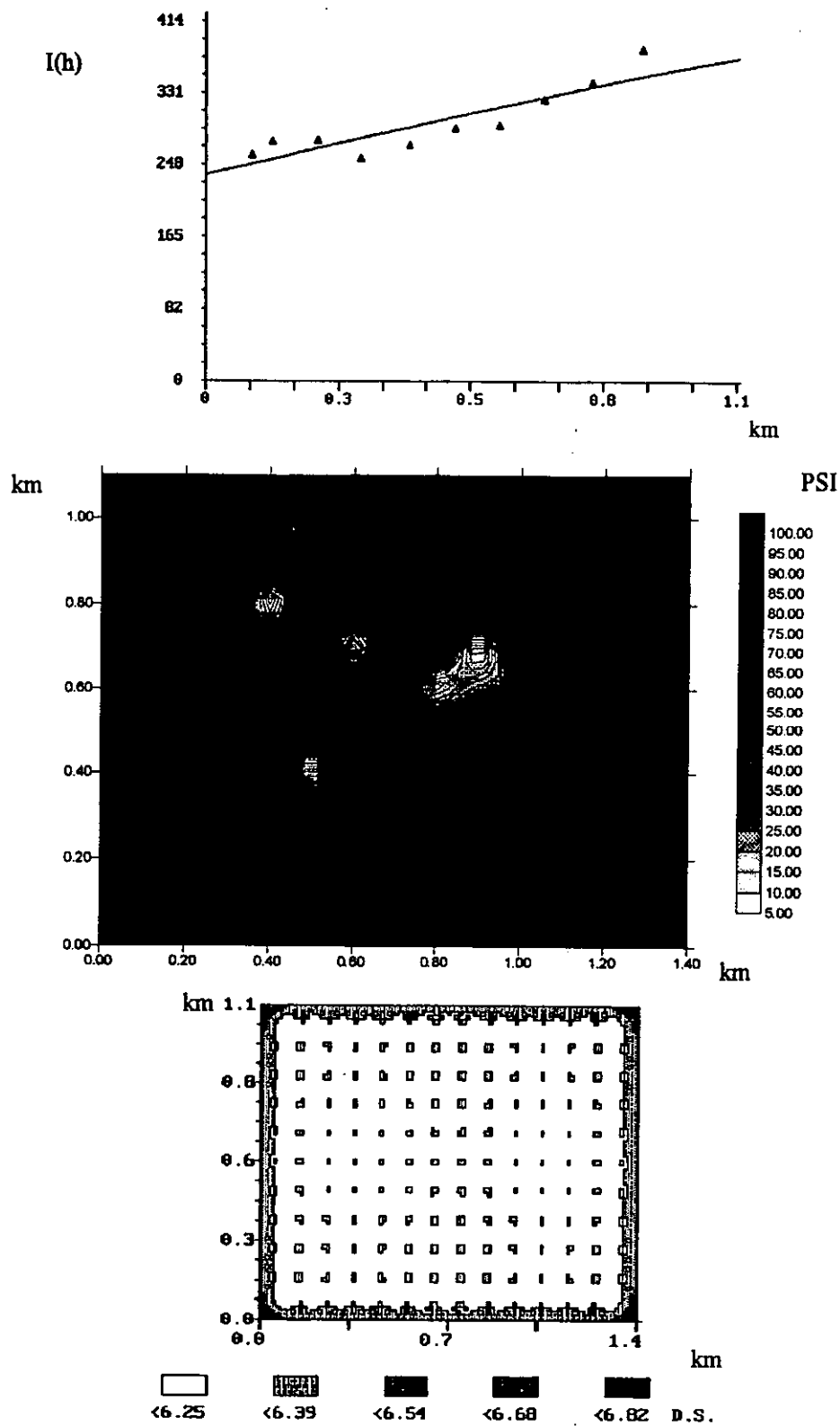


Figura 4.2.22. Semivariograma experimental y teórico (modelo esférico), mapa de distribución y mapa de error para el PSI, primer muestreo (separación 100 m).

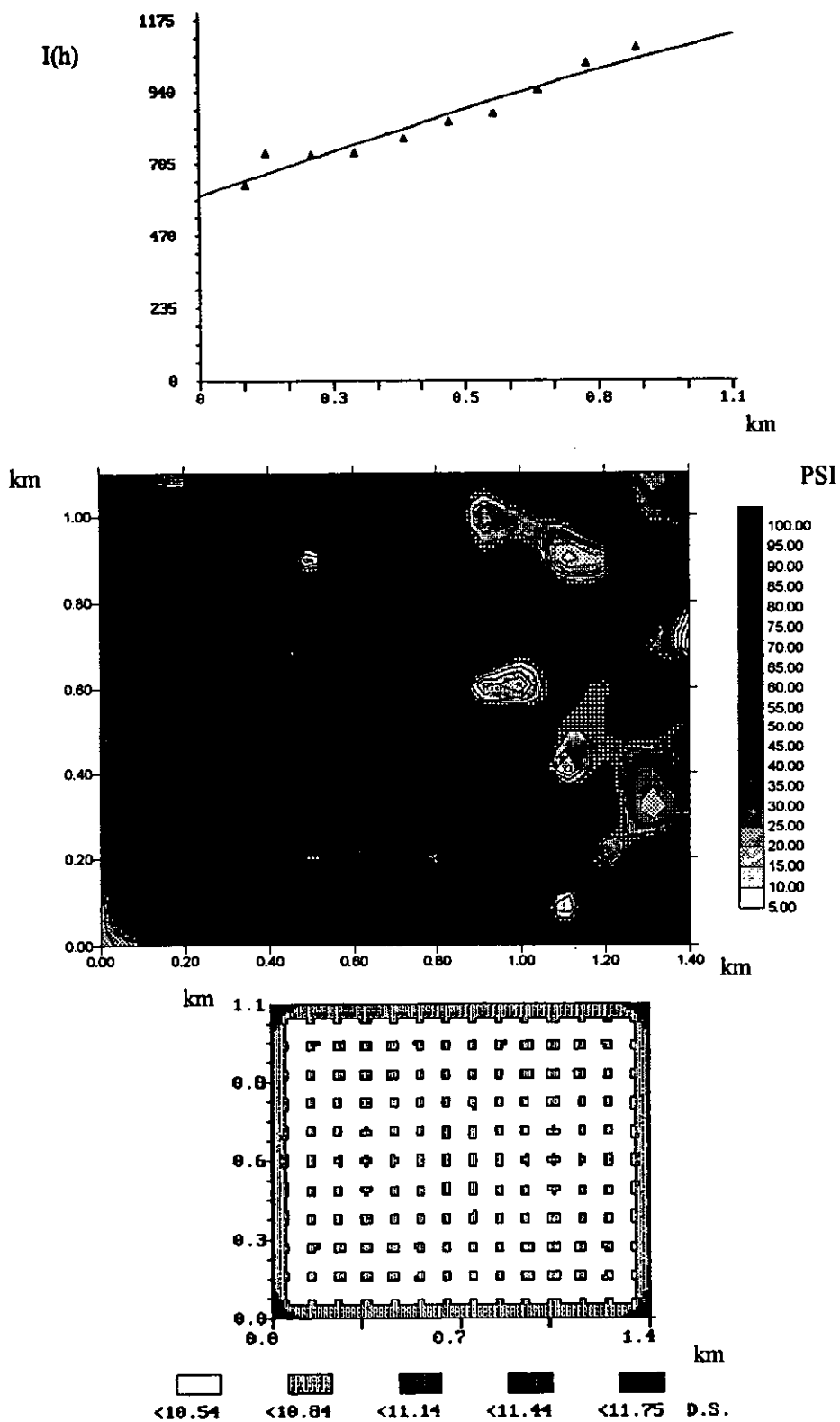


Figura 4.2.23. Semivariograma experimental y teórico (modelo esférico), mapa de distribución y mapa de error para el PSI, segundo muestreo (separación 100 m).

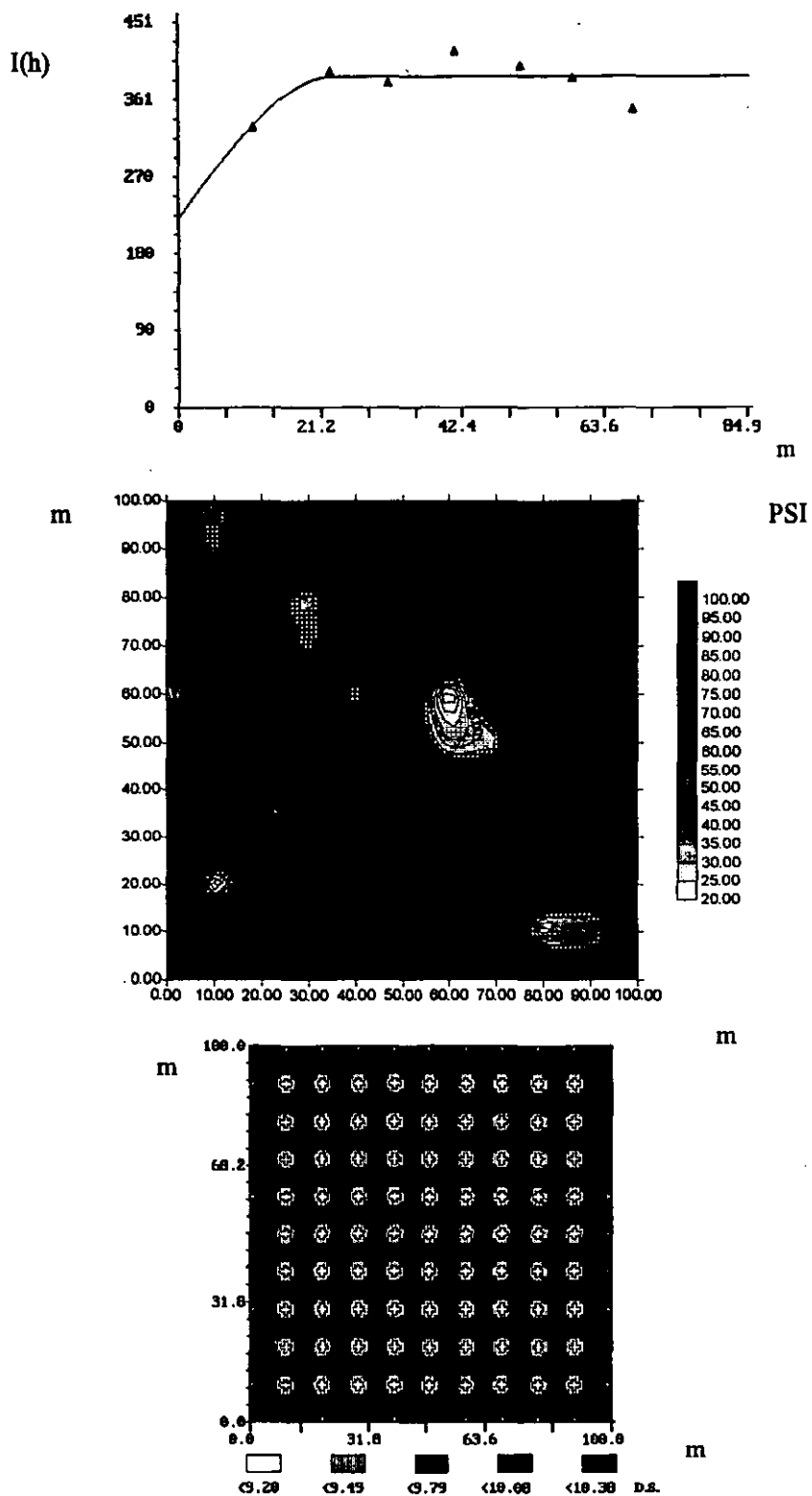


Figura 4.2.24. Semivariograma experimental y teórico (modelo esférico), mapa de distribución y mapa de error para el PSI (separación 10 m).

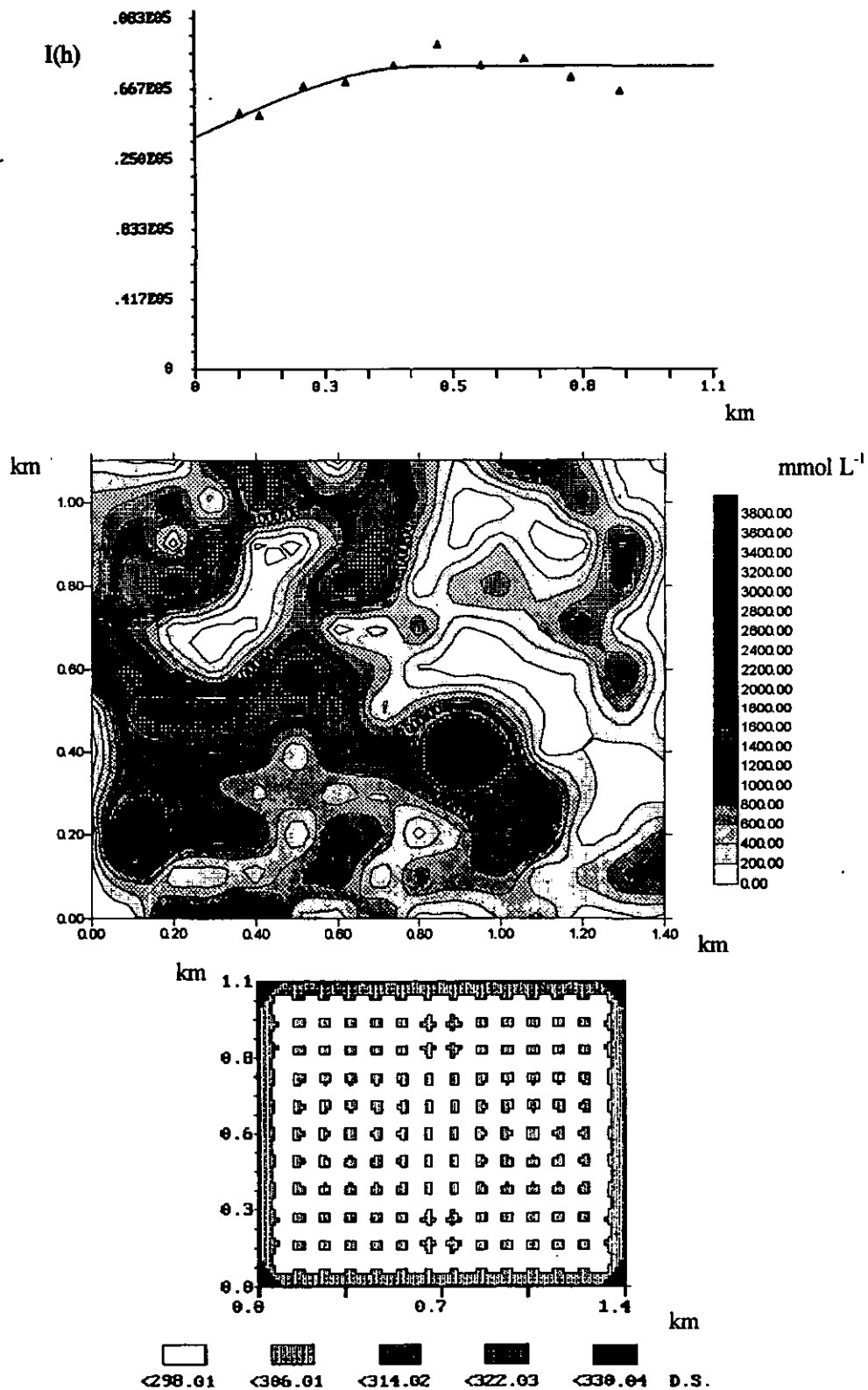


Figura 4.2.25. Semivariograma experimental y teórico (modelo esférico), mapa de distribución y mapa de error para los cloruros, primer muestreo (separación 100 m).

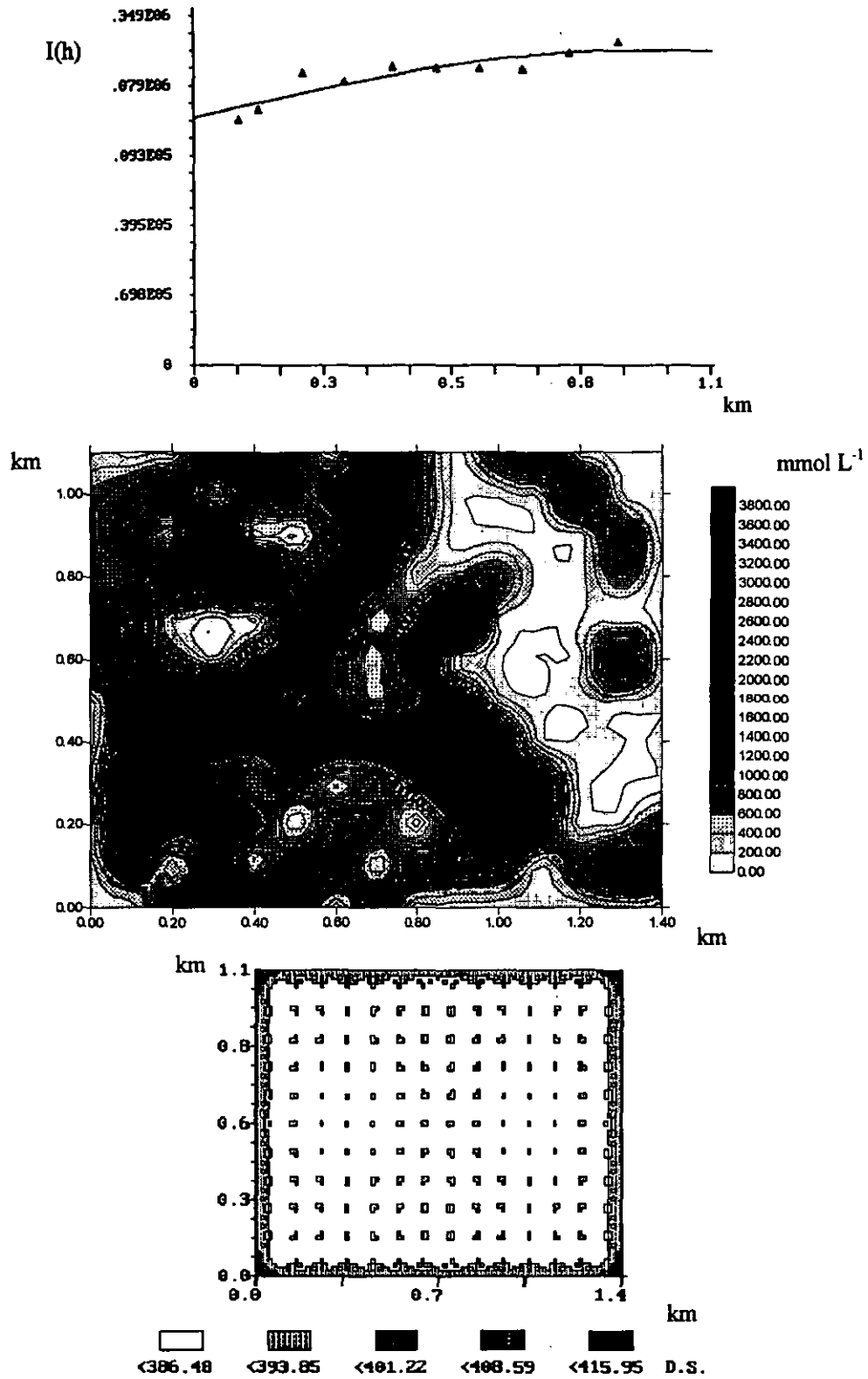


Figura 4.2.26. Semivariograma experimental y teórico (modelo esférico), mapa de distribución y mapa de error para los cloruros, segundo muestreo (separación 100 m).

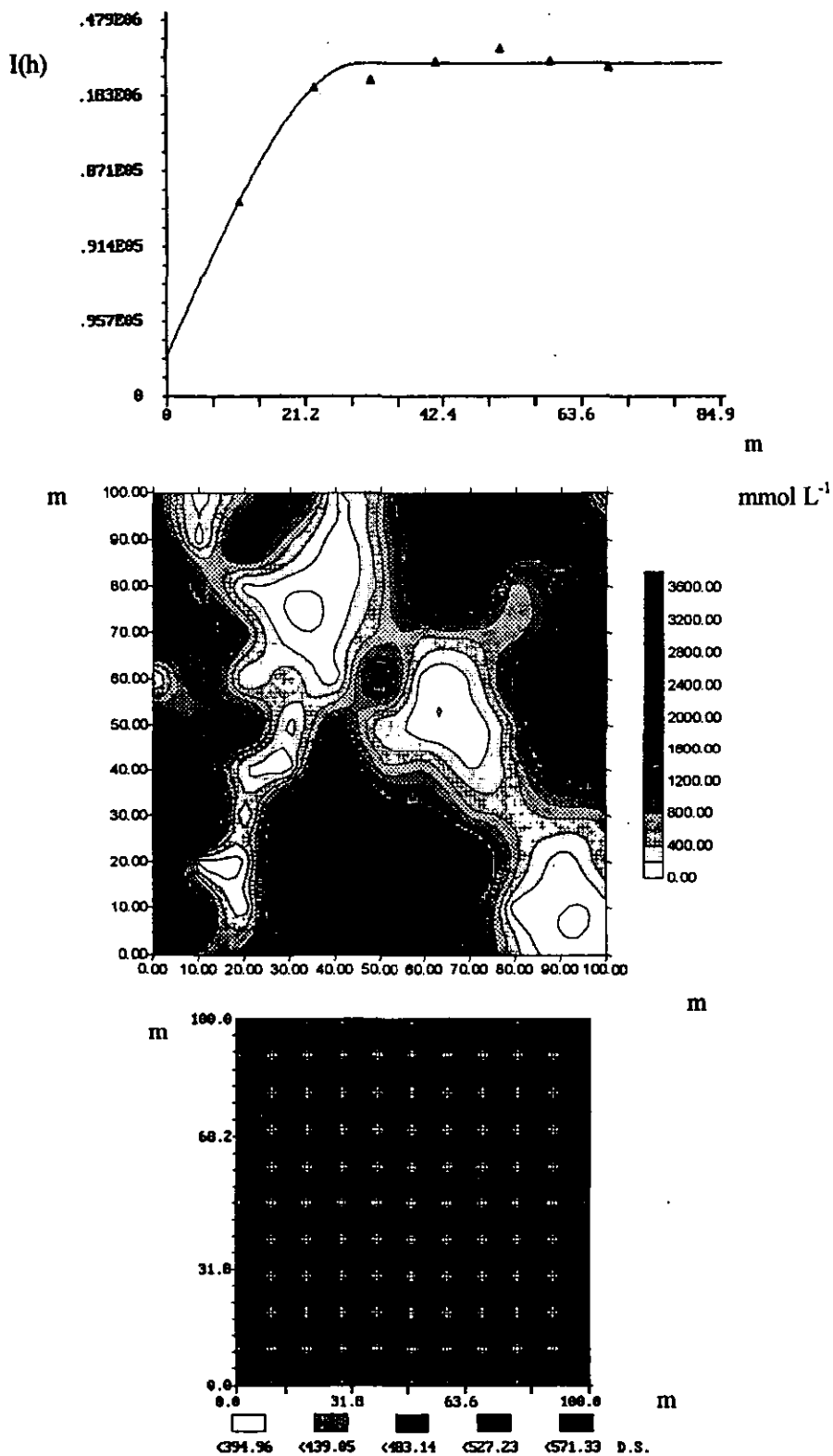


Figura 4.2.27. Semivariograma experimental y teórico (modelo esférico), mapa de distribución y mapa de error para los cloruros (separación 10 m).

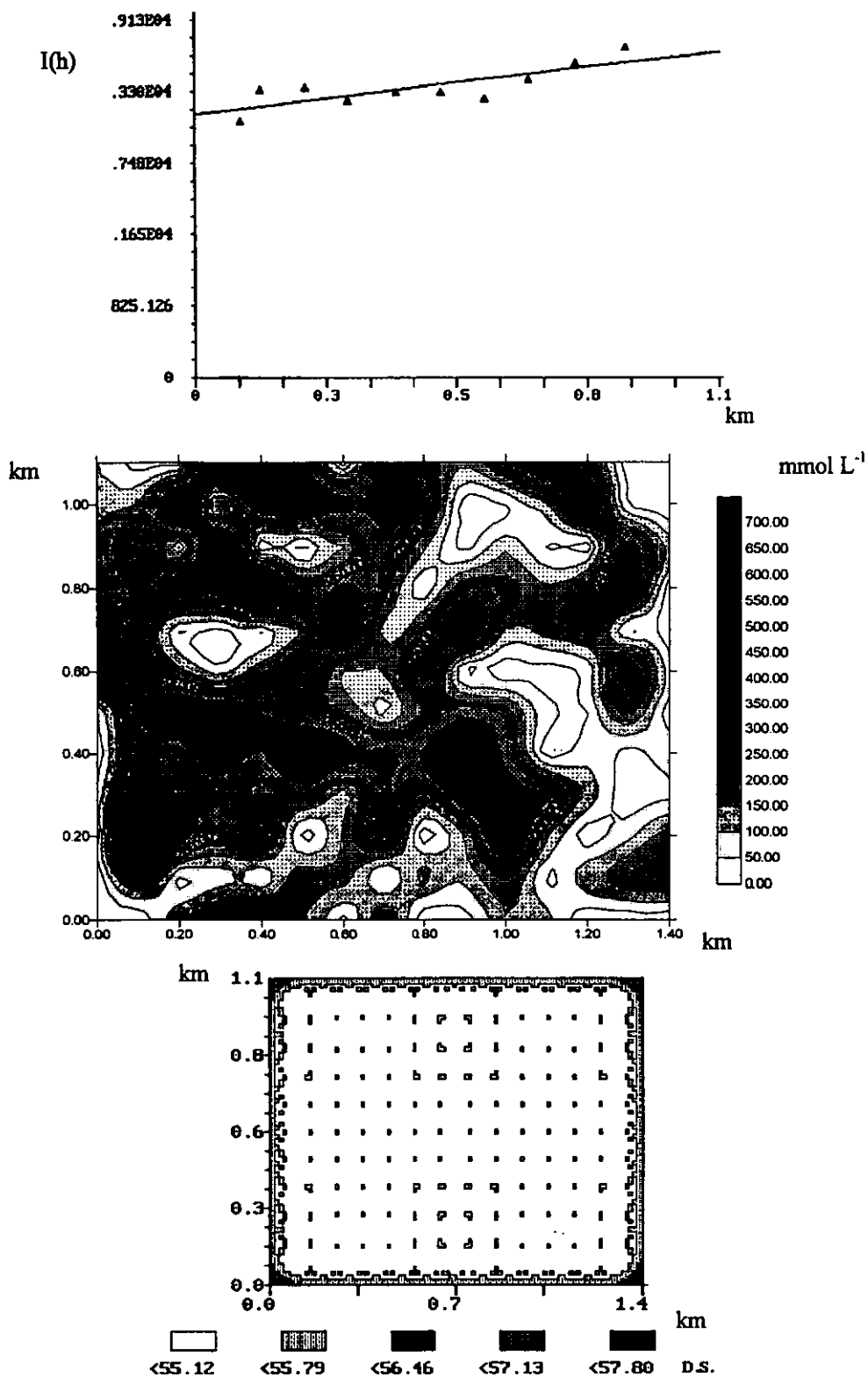


Figura 4.2.28. Semivariograma experimental y teórico (modelo esférico), mapa de distribución y mapa de error para los carbonatos, primer muestreo (separación 100 m).

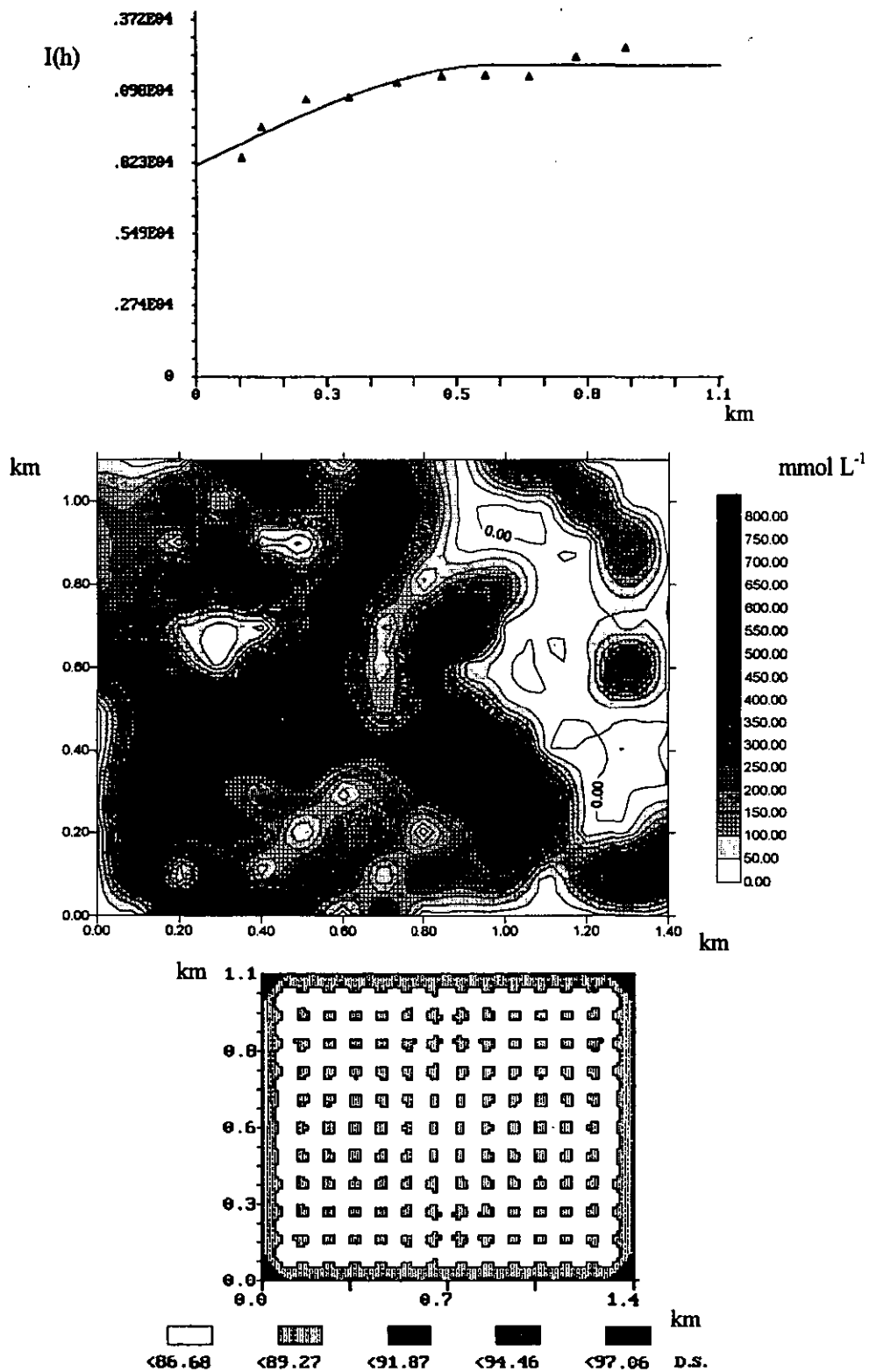


Figura 4.2.29. Semivariograma experimental y teórico (modelo esférico), mapa de distribución y mapa de error para los carbonatos, segundo muestreo (separación 100 m).

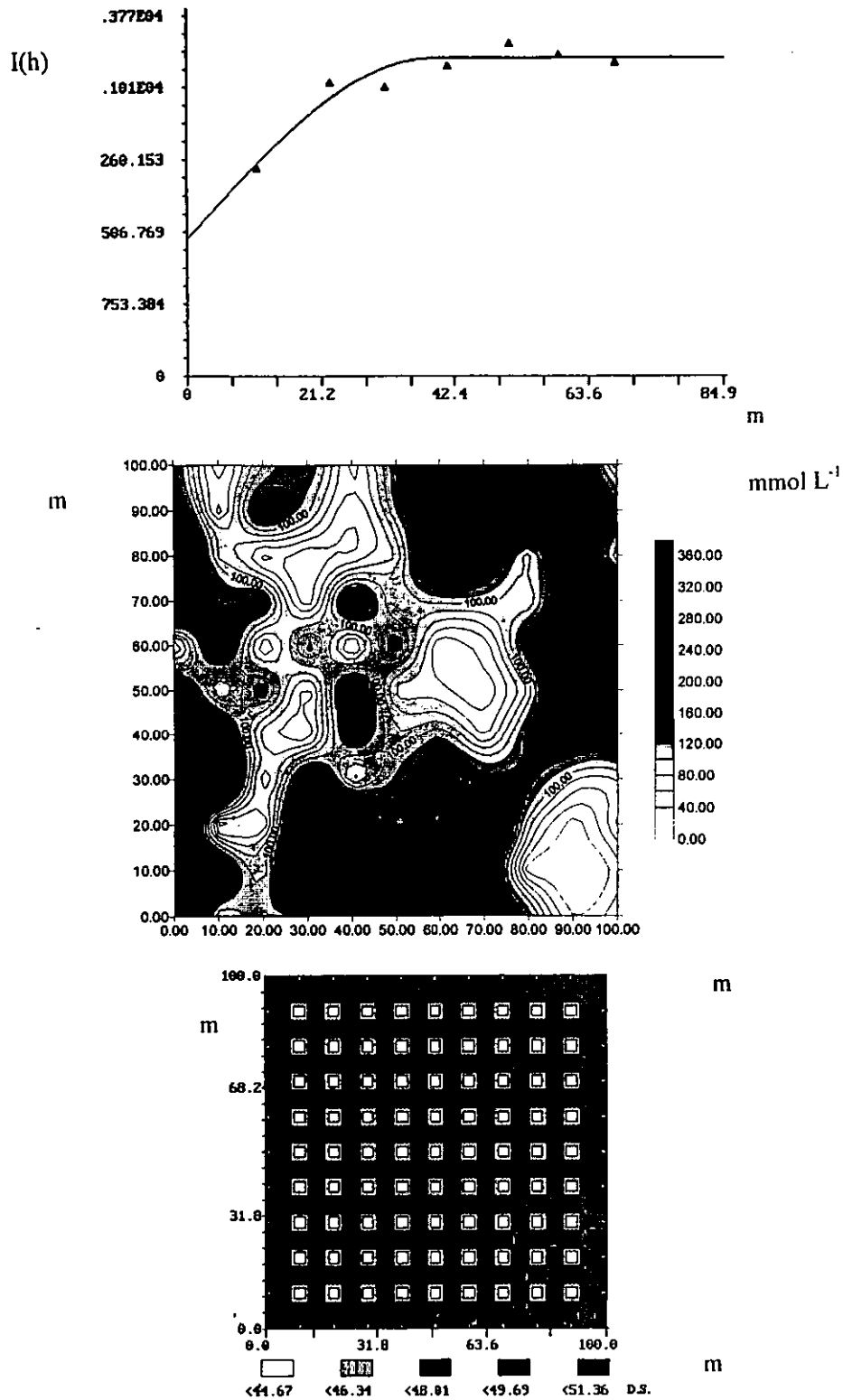


Figura 4.2.30. Semivariograma experimental y teórico (modelo esférico), mapa de distribución y mapa de error para los carbonatos (separación 10 m).

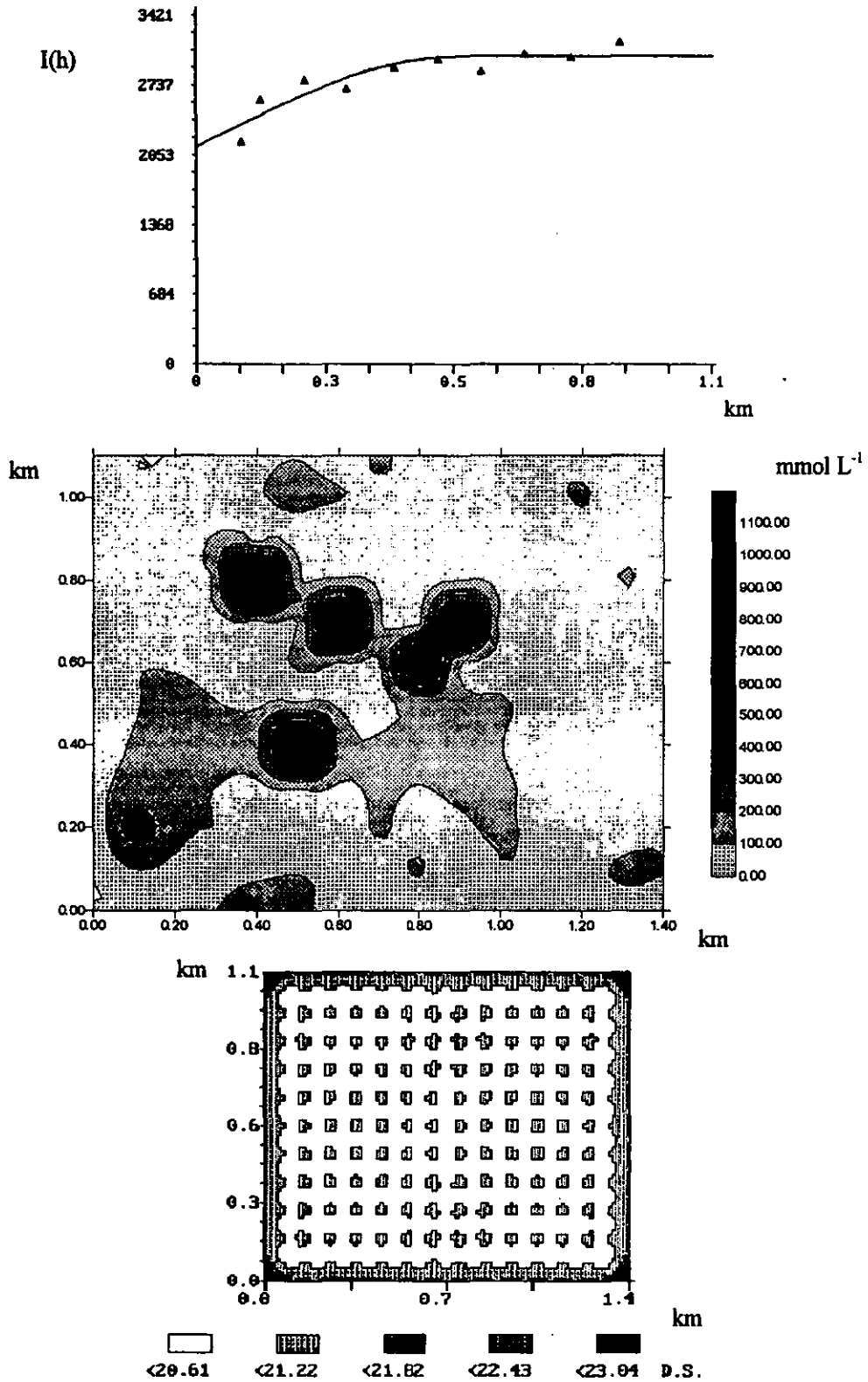


Figura 4.2.31. Semivariograma experimental y teórico (modelo esférico), mapa de distribución y mapa de error para los bicarbonatos, primer muestreo (separación 100 m).

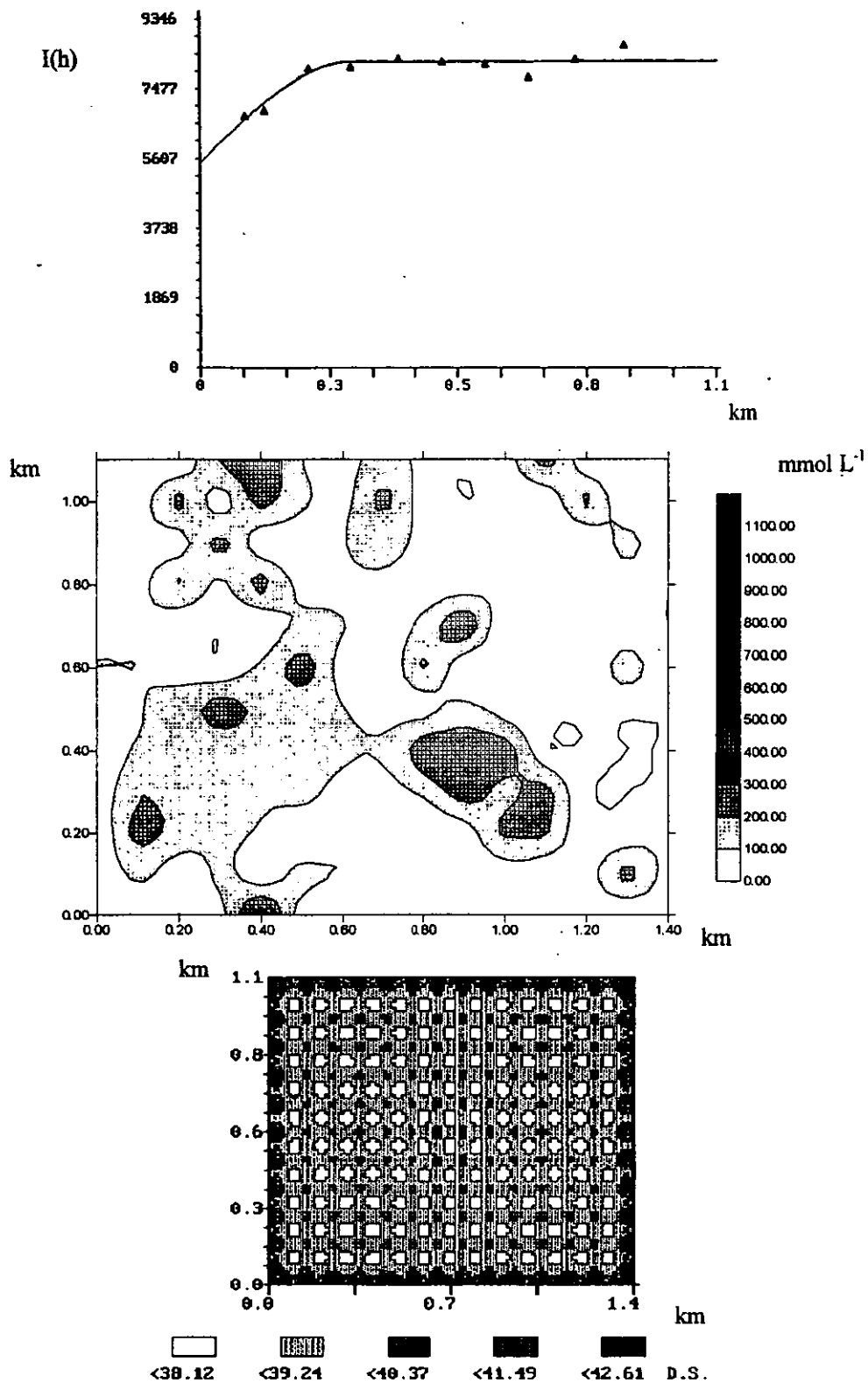


Figura 4.2.32. Semivariograma experimental y teórico (modelo esférico), mapa de distribución y mapa de error para los bicarbonatos, segundo muestreo (separación 100 m).

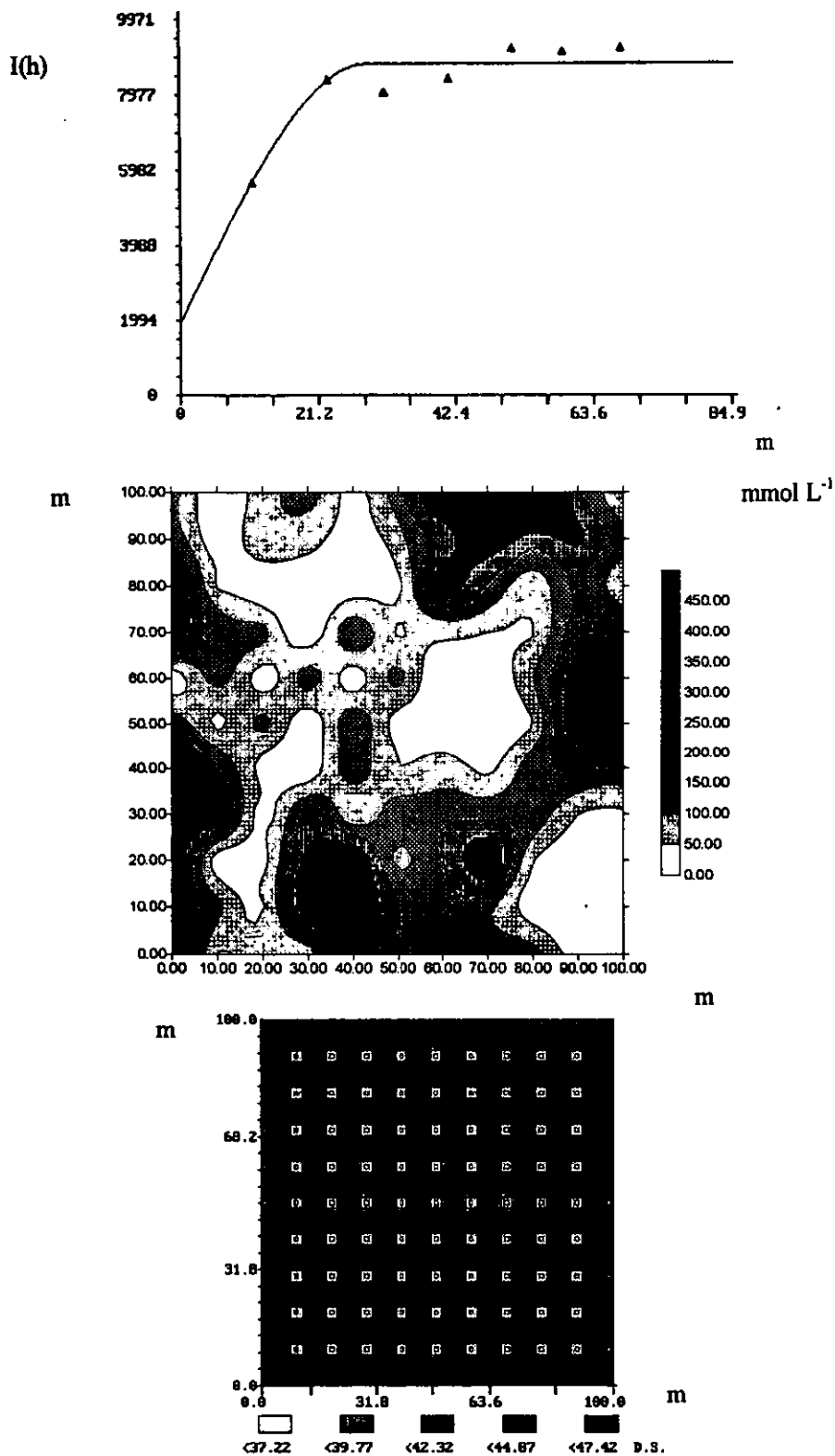


Figura 4.2.33. Semivariograma experimental y teórico (modelo esférico), mapa de distribución y mapa de error para los bicarbonatos (separación 10 m).

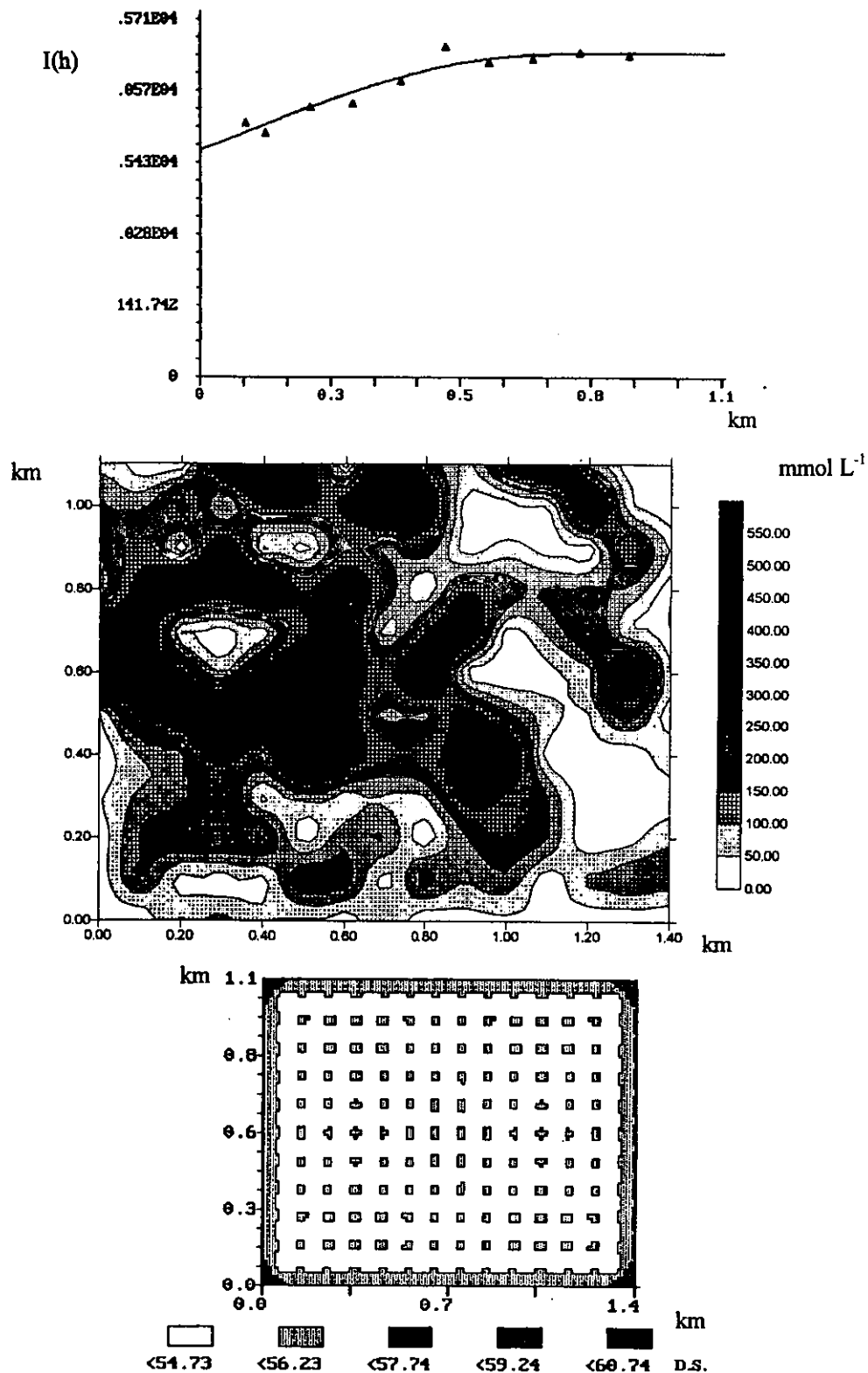


Figura 4.2.34. Semivariograma experimental y teórico (modelo esférico), mapa de distribución y mapa de error para los sulfatos, primer muestreo (separación 100 m).

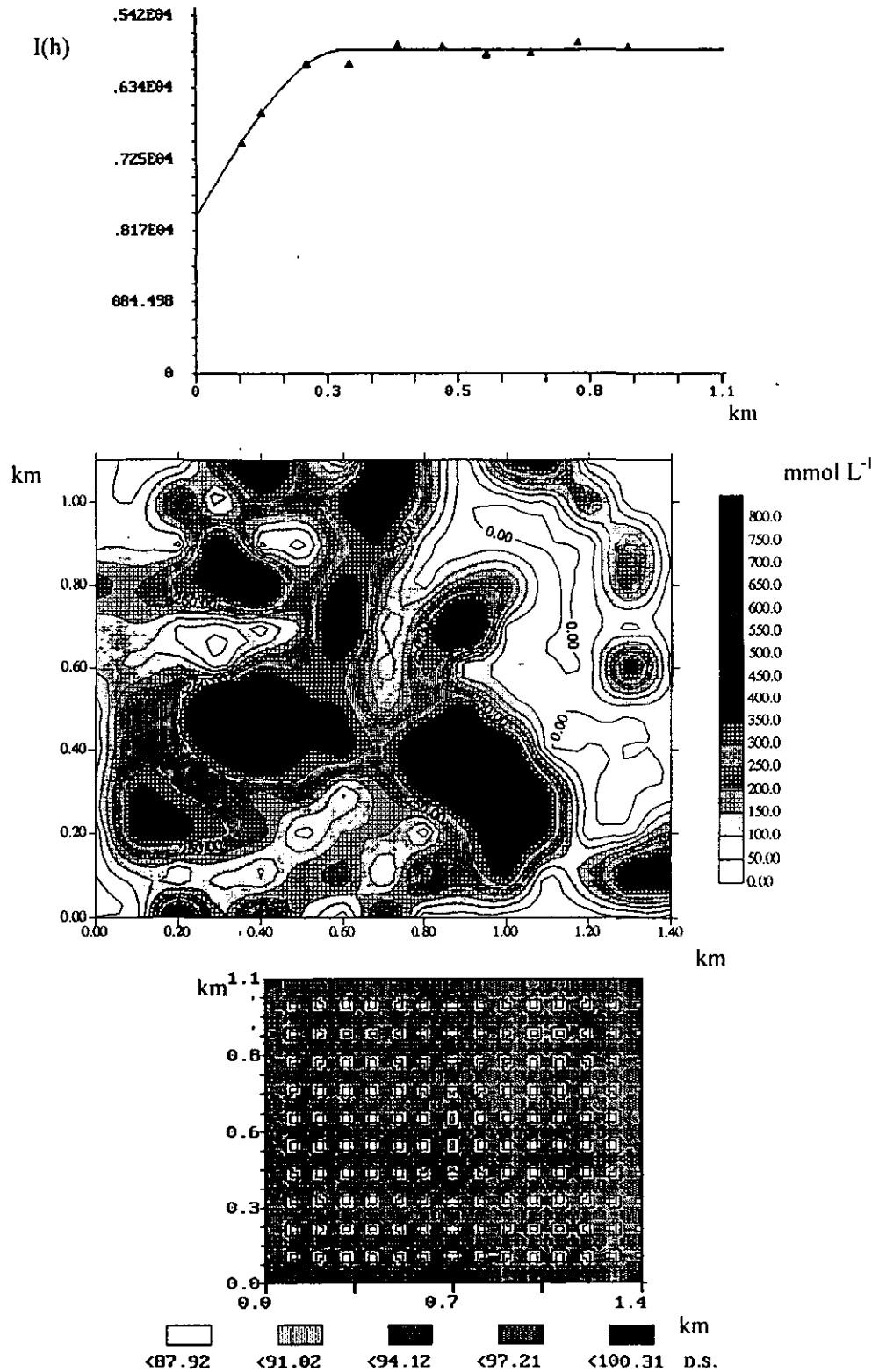


Figura 4.2.35. Semivariograma experimental y teórico (modelo esférico), mapa de distribución y mapa de error para los sulfatos, segundo muestreo (separación 100 m).

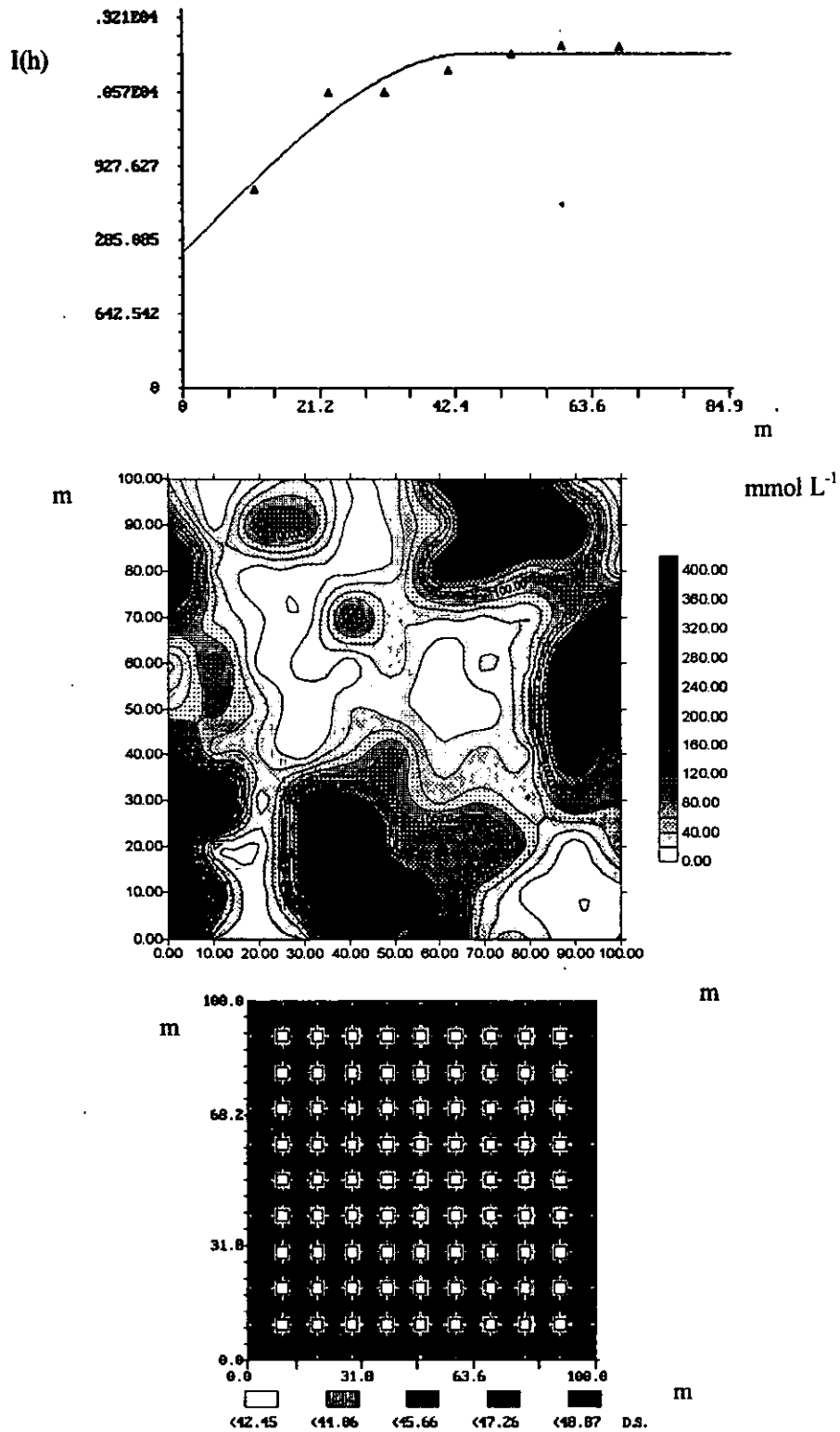


Figura 4.2.36. Semivariograma experimental y teórico (modelo esférico), mapa de distribución y mapa de error para los sulfatos (separación 10 m).

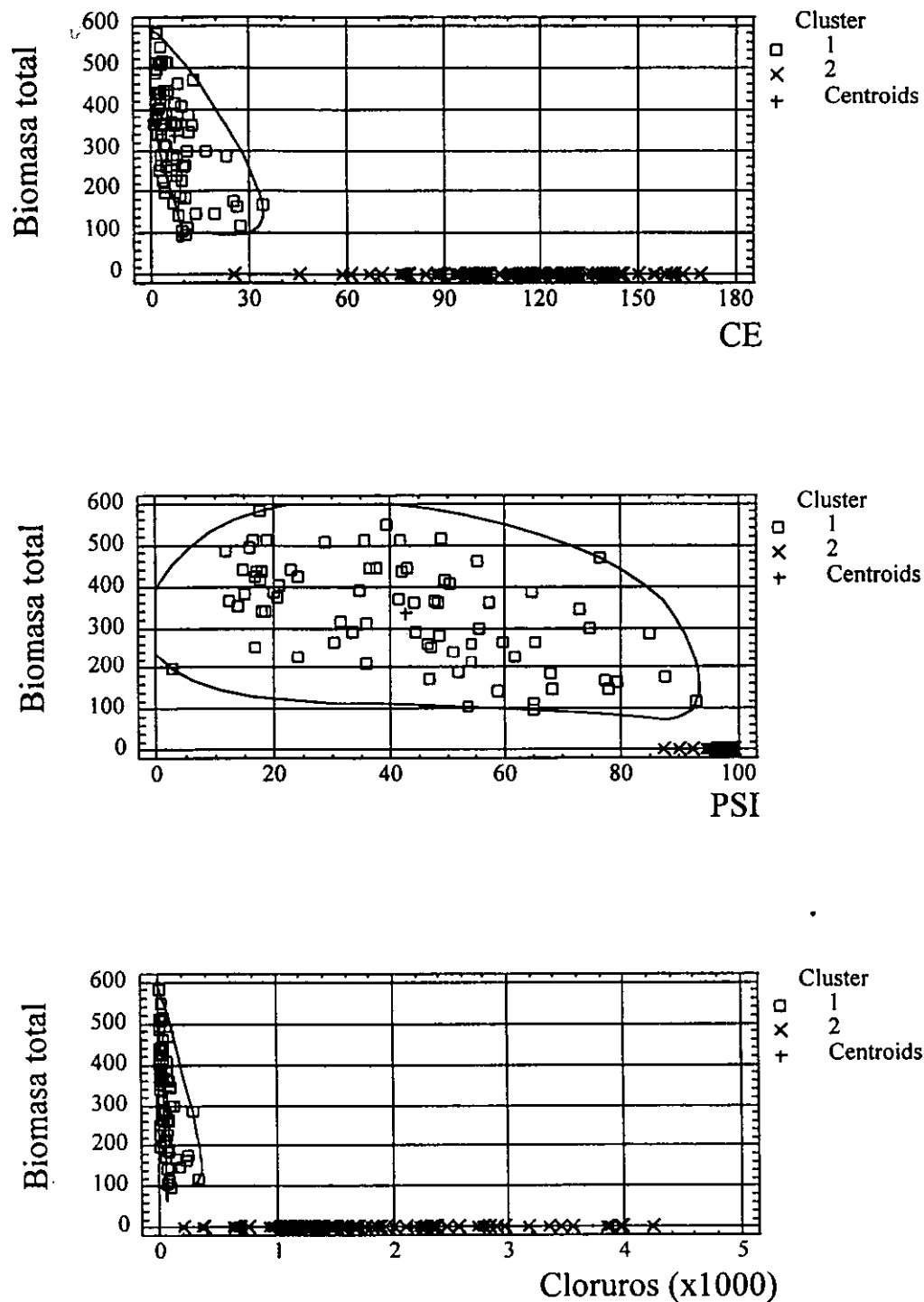


Figura 4.2.37. Análisis de "clusters" entre la biomasa total (g m^{-2}), la conductividad eléctrica (dS m^{-1}), el PSI y la concentración de cloruros (mmol L^{-1}). Método del vecino más cercano.

4.3. PRODUCCION DE BIOMASA Y ACUMULACION DE SODIO Y POTASIO DE HALOFITAS

Para los sitios donde se encontró vegetación presente, los cuadros C1, C2 y C3 del apéndice C muestran los valores obtenidos de biomasa de la parte aérea ($\text{g de peso seco m}^{-2} 240\text{día}^{-1}$) de las especies colectadas, así como las determinaciones realizadas en este material del contenido de cenizas (%), los contenidos de sodio y potasio ($\text{mmol } 100\text{g}^{-1}$ de tejido seco) y el valor de la relación sodio/potasio.

Considerando los 180 sitios sujetos a muestreo, el cuadro 4.3.1. muestra los valores de biomasa obtenidos al final del periodo de observación de 240 días.

Cuadro 4.3.1. Biomasa producida en un periodo de 240 días (parte aérea).

Especie	Total de sitios	Sitios donde está presente	Biomasa			
			Total $\text{g } 180\text{m}^{-2}$	Mínimo g m^{-2}	Maximo g m^{-2}	Promedio g m^{-2}
<i>Distichlis spicata</i>	180	42 (23.3%)	13201.7	0	548.5	73.34
<i>Sporobolus pyramidatus</i>	180	21 (11.6%)	1202.4	0	89.3	6.68
<i>Suaeda torreyana</i>	180	62 (34.4%)	10713.4	0	346.4	59.51

Un primer aspecto que destaca de la zona de estudio, es la baja biodiversidad, ya que durante la mayor parte del año sólo se encuentran las tres especies señaladas. Esta característica es común en suelos con altos niveles de salinidad; por ejemplo, Ortiz (1994a) reporta que los suelos de las marismas del Estado de Nayarit presentan sólo asociaciones de *Batis maritima* con *Salicornia bigelovii*, y frecuentemente se encuentra sólo una de las dos especies. Jiménez *et al.* (1995) reporta también una baja biodiversidad en los suelos de marismas de la costa del Pacífico tropical de México, donde de 17 especies “frecuentes”, 11 se encuentran en menos del 10% de los sitios, y únicamente *Batis maritima* se encuentra en más del 50% de ellos. Henrickson (1978) señala en general la baja biodiversidad en los suelos salinos del desierto Chihuahuense. Ramos (1979) reporta también una baja biodiversidad en los suelos de la Laguna del Carmen, Tlaxcala, aunque observa la aparición de varias especies de anuales durante la época de lluvias y sobre todo en áreas con menor

salinidad. En la zona de estudio del ex-lago de Texcoco, sólo se observó la aparición de *Hordeum jubatum* durante la época de lluvias.

La alta salinidad de los suelos no sólo trae como consecuencia una baja biodiversidad, sino también una baja productividad de estos suelos. Como se observa en el cuadro 4.3.1., la producción de biomasa es baja; aunque los datos no comprenden un año completo, sí corresponden a la estación de crecimiento hasta la floración, de modo que la mayor parte de biomasa de la parte aérea ha sido generada. Con esta consideración, los datos concuerdan con lo señalado por Waisel (1972), quien reporta que la productividad de la parte aérea de las asociaciones de halófitas varía entre 10 y 400 g m⁻² año⁻¹, aunque para algunas gramíneas como *Spartina alterniflora*, llega a ser de más de 4000 g m⁻² año⁻¹ (Odum, 1974; Croughan y Rains, 1988). Los manglares, en cambio, producen más de 4500 g m⁻² año⁻¹ (Teas, 1979).

4.3.1. *Distichlis spicata*

Las características de las variables analizadas para *Distichlis spicata* se presentan en el cuadro 4.3.2. Por otro lado, el cuadro 4.3.3. muestran las características de los suelos donde se colectó esta especie, durante la época de lluvias.

Del análisis de estos cuadros y los siguientes, puede verse que de las especies estudiadas *Distichlis spicata* resultó ser la menos tolerante a la salinidad, ya que en la estación de lluvias, se desarrolla en suelos con valores de CE menores de 23 dS m⁻¹, con una media de 4.5, y con niveles de sodio soluble máximos de 391 mmol L⁻¹, con una media de 53.5. El PSI máximo que tolera es de 84.9, con una media de 32.

Bajo estas condiciones, el promedio de biomasa (parte aérea) producida por m² en el periodo evaluado de 240 días, es de 73.3 gramos de peso seco, del cual 10% es ceniza, con un valor de relación Na⁺/K⁺ de 1.6, que lleva a concluir que esta especie es una halófito no acumuladora de sales, y que logra sobrevivir en suelos salinos a través de la presencia de adaptaciones encaminadas a reducir la entrada de sales, como glándulas de sal, estructuras conocidas de esta especie. Esta especie es muy común en la zona; se encontró en más del 23% de los sitios muestreados.

Cuadro 4.3.2. Características de las variables analizadas, para *Distichlis spicata* (ceniza = %; Na⁺ y K⁺ = mmol 100g⁻¹).

Variable	Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar	C.V. %
Ceniza	10.3	5.8	22.4	3.3	31.9
Na ⁺	26.5	5.8	78.0	15.9	60.3
K ⁺	17.8	6.4	33.8	6.0	33.7
Na ⁺ /K ⁺	1.6	0.3	4.6	1.1	69.6

Cuadro 4.3.3. Características de las variables del suelo en los sitios donde se encontró *Distichlis spicata* (42 sitios) (CE = dS m⁻¹, concentraciones de iones = mmol L⁻¹).

Variable	Media	Mínimo	Máximo	Varianza	Desviación estándar
CE	4.5	1.0	23.1	14.9	3.8
pH	9.7	9.2	10.5	0.04	0.2
Ca ²⁺	0.9	0.4	1.5	0.1	0.3
Mg ²⁺	0.5	0.1	1.3	0.1	0.3
Na ⁺	53.5	4.3	391.5	3957.1	62.9
K ⁺	4.4	0.3	29.4	23.5	4.8
RAS	47.4	2.7	382.0	4042.8	63.5
PSI	32.9	2.7	84.9	304.4	17.4
CO ₃ ²⁻	7.0	1.0	44.0	67.5	8.2
HCO ₃ ⁻	3.7	0.0	19.0	21.4	4.6
Cl ⁻	32.8	7.0	280.0	1857.2	43.0
SO ₄ ²⁻	5.3	0.0	38.5	44.3	6.6

La productividad de *Distichlis spicata* ha sido estudiada por varios autores, debido a la importancia que esta especie tiene como forraje. En el área de Montecillos, cerca del ex-Lago de Texcoco, García y Montanez (1992) reportan una producción anual de biomasa de la parte aérea de 537 a 1995 g m⁻², con productividad mensual de 5 a 430 g m⁻² que es muy superior a la encontrada en este trabajo. Sin embargo, los suelos del área de Montecillos son mucho menos salinos que los del área de estudio, de modo que ésta puede ser la razón de la diferencia. En cambio, en la laguna Del Carmen, en condiciones similares a las del ex-lago de Texcoco, se reporta una producción de 77.6 g m⁻² en sitios no inundables, que es muy similar a la encontrada en el presente trabajo; sin embargo, en sitios inundados la producción llega hasta 407 g m⁻² (Ramos, 1979). Por otro lado, Mudie (1974) señala que en el área del Golfo de California, *D. spicata* produce anualmente de 600 a 860 g m⁻², y

resultados similares (660 g m^{-2}) reporta Malcolm (1986). Croughan y Rains (1988) reportan valores de hasta 985 g m^{-2} . Si se considera la biomasa subterránea, estos valores aumentan cerca de 10 veces (García y Montanez, 1992).

Por otro lado, en el área de estudio las concentraciones máximas de sodio encontradas en el suelos en el momento del corte fueron de 391 mmol L^{-1} , aunque en la época seca estos valores son mucho más altos. Malcolm (1986) reporta que los niveles máximos de supervivencia de esta especie son de 775 mmol L^{-1} de Na^+ . Sin embargo, los contenidos de sodio encontrados en los tejidos vegetales son bajos, manteniendo igualmente baja la relación Na^+/K^+ (media 1.6). Aunque no existe una respuesta uniforme de esta relación a la salinidad, en general se observa que las plantas no acumuladoras de sales presentan valores bajos (Jeschke, 1984), incluso inferiores a 1, como por ejemplo las gramíneas halófitas *Puccinellia maritima* y *Elymus oliveri* que tienen valores de esta relación de 0.9 y 0.8 respectivamente (Flowers, 1985). Por otro lado, en no halófitas bajo condiciones de salinidad, aumenta considerablemente (Porcelli *et al.*, 1995).

4.3.2. *Sporobolus pyramidatus*.

Los cuadros 4.3.4. y 4.3.5. muestran que *Sporobolus pyramidatus* es una especie con tolerancia similar a *Distichlis spicata*, aunque las características promedio de los sitios donde se encontró muestran mayores valores de conductividad eléctrica, pH, concentraciones de aniones y cationes (con excepción de Ca^{2+} y Mg^{2+}), RAS y PSI, aunque los valores máximos de algunos de estos parámetros son inferiores a los correspondientes a *D. spicata*. La producción de biomasa para el área es la menor de las especies estudiadas, $6.6 \text{ g m}^{-2} 240\text{día}^{-1}$, que en parte es debido a su hábito de crecimiento, ya que se presenta más bien como plantas individuales mezcladas entre las otras especies, mientras que *D. spicata* crece mediante estolones muy largos y ramificados, que poseen una mayor cobertura. Asimismo, fue la especie que se encontró en un menor número de sitios (menos de 12%). Los contenidos de ceniza promedio y máximos son mayores, e igualmente muestran una mayor variación. Los niveles de acumulación de Na^+ y K^+ llevan a valores de la relación Na^+/K^+ de 2.6 en promedio, lo que lleva también a considerar a esta especie como no acumuladora de sales.

García y Montanez (1992) señalan la presencia de *Sporobolus pyramidatus* en los pastizales de *Distichlis spicata* de Montecillos, y reportan una producción de biomasa mensual muy baja, de 0 a 14 g m⁻². El valor de la relación Na⁺/K⁺ para esta especie es mayor que para *Distichlis spicata*, pero se encuentra aún dentro del rango observado para gramíneas halófitas que no acumulan sales; por ejemplo, bajo condiciones de salinidad *Agropyron elongatum* posee un valor de esta relación de 2.7 (Elzam y Epstein, 1969).

Cuadro 4.3.4. Características de las variables analizadas, para *Sporobolus pyramidatus* (ceniza = %; Na⁺ y K⁺ = mmol 100g⁻¹).

Variable	Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar	C.V. %
Ceniza	11.2	3.1	49.9	10.1	89.6
Na ⁺	52.6	18.7	212.0	46.2	87.5
K ⁺	19.7	8.2	60.8	14.6	74.4
Na ⁺ /K ⁺	2.6	1.5	3.6	0.6	24.6

Cuadro 4.3.5. Características de las variables del suelo en los sitios donde se encontró *Sporobolus pyramidatus* (21 sitios) (CE = dS m⁻¹, concentraciones de iones = mmol L⁻¹).

Variable	Media	Mínimo	Máximo	Varianza	Desviación estándar
CE	6.9	1.2	16.5	18.8	4.3
pH	9.8	9.6	10.3	0.03	0.19
Ca ²⁺	0.8	0.3	1.5	0.1	0.3
Mg ²⁺	0.6	0.2	1.0	0.1	0.2
Na ⁺	85.5	13.0	282.7	4538.7	67.3
K ⁺	8.8	1.2	26.9	58.5	7.6
RAS	74.1	13.0	199.8	3058.3	55.3
PSI	45.2	15.1	74.5	363.9	19.0
CO ₃ ²⁻	12.5	1.0	44.0	125.4	11.2
HCO ₃ ⁻	7.1	0.0	28.0	60.5	7.7
Cl ⁻	46.6	7.0	130.0	1091.1	33.0
SO ₄ ²⁻	8.5	0.0	21.4	44.3	6.6

4.3.3. *Suaeda torreyana*.

Los cuadros 4.3.6. y 4.3.7. muestran que *Suaeda torreyana* posee una mayor tolerancia a la salinidad que las especies anteriores, con un valor promedio de conductividad eléctrica de 8 dS m⁻¹ y máximo de más de 33 dS m⁻¹, con niveles muy elevados de Na⁺, de hasta 630

mmol L⁻¹. La mayor tolerancia de esta especie se refleja en un mayor rango de condiciones edáficas dentro de las que se puede encontrar, motivo por el cual fue la especie que se encontró en más sitios (34% del total de sitios). Posee el mayor coeficiente de variación en la producción de biomasa, encontrándose áreas con densidad y cobertura muy variables, que en promedio producen 59.5 g m⁻² 240día⁻¹.

Esta especie posee una gran capacidad de acumulación de sales, con un porcentaje de cenizas de más del doble de las especies anteriores del cual gran parte es sodio, llevando a valores de la relación Na⁺/K⁺ mayores a 10, lo que lleva a considerar a esta especie como acumuladora de sales, logrando sobrevivir en condiciones de alta salinidad debido a la presencia de una gran capacidad de ajuste osmótico y a que posee un metabolismo resistente al sodio; se trata además de una especie que presenta succulencia y una gruesa cutícula.

En el área de la laguna Del Carmen, Ramos (1979) encontró una producción anual de *Suaeda torreyana* de 54.6 g m⁻², que resulta incluso inferior a la de Texcoco. Sin embargo, en suelos menos salinos, y con altos contenidos de humedad en el suelo, su producción anual de biomasa llega a ser mucho mayor. Ortiz (1991a) reporta valores superiores a 2000 g m⁻². Por otro lado, en lo referente a la acumulación de iones en los tejidos de *S. torreyana*, esta especie se distingue de inmediato de las otras dos por presentar mucha mayor acumulación de sodio (5 veces más que *Sporobolus pyramidatus* y 10 veces más que *D. spicata*), con valores Na⁺/K⁺ también muy elevados (media 10.9). Características similares se han observado en otras especies del mismo género, como *Suaeda maritima*, que presenta valores de esta relación de 9 a 24 (Flowers, 1985)

Cuadro 4.3.6. Características de las variables analizadas, para *Suaeda torreyana* (ceniza = %; Na⁺ y K⁺ = mmol 100g⁻¹).

Variable	Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar	C.V. %
Ceniza	26.6	9.0	53.3	7.7	28.9
Na ⁺	285.2	79.6	513.2	99.0	34.7
K ⁺	26.6	14.8	44.8	7.6	28.6
Na ⁺ /K ⁺	10.9	4.6	17.9	3.3	30.2

Cuadro 4.3.7. Características de las variables del suelo en los sitios donde se encontró *Suaeda torreyana* (62 sitios) (CE = dS m⁻¹, concentraciones de iones = mmol L⁻¹).

Variable	Medio	Mínimo	Máximo	Varianza	Desviación estándar
CE	8.0	1.0	33.9	47.6	6.9
pH	9.8	9.2	10.6	0.07	0.2
Ca ²⁺	0.9	0.3	1.5	0.1	0.3
Mg ²⁺	0.6	0.1	1.3	0.1	0.2
Na ⁺	106.7	10.9	630.7	14035.3	118.4
K ⁺	10.0	0.4	89.5	178.5	13.3
RAS	97.2	10.6	891.9	17765.7	133.2
PSI	46.1	12.6	92.9	440.3	20.9
CO ₃ ²⁻	14.1	1.0	94.0	289.8	17.0
HCO ₃ ⁻	7.8	0.0	37.0	72.8	8.5
Cl ⁻	61.3	7.0	335.0	4322.5	65.7
SO ₄ ²⁻	11.7	0.0	102.8	301.6	17.3

Hay que recalcar que para los anteriores análisis se utilizaron los datos de suelos correspondientes a la época de lluvias, por considerar que es en ella donde se da el crecimiento activo de las plantas; sin embargo, la salinidad es mucho más elevada en la época seca del año. Por este motivo, los resultados presentados sobre los valores de conductividad eléctrica bajo los cuales se desarrollan estas especies, pueden parecer comparativamente bajos para lo que cabría esperar de especies de halófitas.

4.3.4. Relación entre las variables analizadas y los parámetros edáficos.

Con el fin de determinar las relaciones existentes entre las variables analizadas para las especies arriba señaladas y las características de los suelos donde se encontraron, se realizaron una serie de análisis de regresión, solo para los sitios donde se colectó vegetación. En la mayoría de los casos, el coeficiente de correlación (r) fue muy bajo.

El cuadro 4.3.8. muestra los valores del coeficiente de correlación obtenidos al hacer los análisis de regresión entre la biomasa de las tres especies, por separado y en conjunto, y las características de los suelos donde se colectaron. Para aquellos casos donde el análisis de varianza asociado al de regresión mostró una relación significativamente estadística, se obtuvieron las ecuaciones de regresión correspondientes, las cuales se presentan en el cuadro 4.3.9., y gráficamente en las figuras 4.3.1. a 4.3.8.

Cuadro 4.3.8. Valores de los coeficientes de correlación (r) para la biomasa total y por especie.

Variable edáfica	<i>Distichlis spicata</i>	<i>Sporobolus pyramidatus</i>	<i>Suaeda torreyana</i>	Biomasa total
CE	-0.45	0.15	0.02	-0.54
pH	-0.23	0.11	0.01	-0.50
Ca ²⁺	-0.22	0.01	0.07	-0.02
Mg ²⁺	-0.16	-0.05	0.18	-0.07
Na ⁺	-0.39	0.08	-0.01	-0.48
K ⁺	-0.39	-0.02	0.04	-0.50
RAS	-0.34	0.11	-0.04	-0.48
PSI	-0.40	-0.02	0.06	-0.59
CO ₃ ²⁻	-0.37	0.09	-0.01	-0.45
HCO ₃ ⁻	-0.37	-0.09	0.07	-0.50
Cl ⁻	-0.47	0.08	-0.02	-0.48
SO ₄ ²⁻	-0.29	0.02	0.01	-0.43

Como se observa en el cuadro anterior, los coeficientes de correlación para *Distichlis spicata* pueden considerarse como relativamente débiles, ya que presentan valores absolutos menores de 0.5; el signo negativo significa una relación inversa, o sea que al incrementarse el valor de la variable edáfica disminuye la biomasa. La mayor relación la presentan la conductividad eléctrica, el PSI y los cloruros. Para el caso de *Sporobolus pyramidatus* y *Suaeda torreyana*, puede considerarse que prácticamente no existe correlación entre la biomasa y las variables del suelo analizadas, o sea que la biomasa es independiente de la salinidad y sodicidad dentro de los rangos encontrados. Estos resultados son similares a los obtenidos por Villalba (1989), quien encontró también bajos valores de correlación entre la salinidad del suelo y diferentes parámetros de vegetación halófila de una zona costera, como altura, cobertura, densidad, y contenidos de proteína, fibra, grasa y cenizas; sólo encontró altos valores de correlación entre la salinidad y el contenido de humedad de las plantas, lo cual es de esperar en virtud de los efectos osmóticos que se presentan en los suelos salinos. Similarmente, Delgado (1985) encontró relaciones significativas entre la densidad de población de *D. spicata* y el contenido de Ca²⁺ del suelo, entre *Suaeda diffusa* (probablemente *S. torreyana*) y el PSI, y para otras especies, encontró también relaciones con la CE y la concentración de Mg²⁺. En contraste, Riehl y Ungar (1982) encontraron altos coeficientes de correlación entre el peso en raíz y tallo de *Salicornia europaea*, con la CE y los contenidos de Na⁺ y Cl⁻ del suelo.

Es posible que la baja correlación encontrada aquí para las especies se deba a las condiciones del muestreo, ya que durante la época de lluvias la salinidad ha disminuido a niveles muy bajos, menores a su nivel máximo de tolerancia, y bajo estos niveles no se observa ninguna dependencia de la salinidad; de hecho, la especie que presenta los valores de correlación más altos es *Distichlis spicata*, que es también la especie menos tolerante a la salinidad de las tres estudiadas. Las otras especies, más tolerantes, no presentan prácticamente relación con la salinidad y sodicidad, aunque esto se afirma sólo para los rangos encontrados, como ya se ha señalado.

En contraste con los datos correspondientes a la biomasa por especies, la biomasa total encontrada en cada sitio (suma total de la biomasa de todas las especies encontradas), sí presenta mayores valores del coeficiente de correlación que pueden considerarse incluso moderadamente fuertes, como es el caso de la CE, el pH, el PSI, y las concentraciones de potasio y bicarbonatos, y son altos también los valores de sodio, cloruros y RAS. Esto muestra que el desarrollo en conjunto de las especies de esta asociación debe ser tomado en cuenta en estas condiciones, ya que la salinidad y sodicidad manifiesta más su efecto en la biomasa total por unidad de área, que en la biomasa de las especies tomadas por separado.

Las ecuaciones de regresión obtenidas para las variables edáficas que mostraron relación estadísticamente significativa con la biomasa se presentan en el cuadro 4.3.9. Sólo se incluyen datos de *Distichlis spicata*, ya que las otras especies no presentaron este tipo de relación.

Cuadro 4.3.9. Ecuaciones de regresión entre la biomasa (B) y variables edáficas para *Distichlis spicata*. (*, ** y *=significativo al 90, 95 y 99%, respectivamente) (Biomasa = g m⁻²240día⁻¹; CE = dS m⁻¹; concentraciones de iones edáficos = mmol L⁻¹)**

Variable	Ecuación	Significancia
CE	$B = 416.6 - 80.2 \ln(CE)$	***
Na ⁺	$B = 472.1 - 43.9 \ln(Na^+)$	***
K ⁺	$B = 364.6 - 44.6 \ln(K^+)$	***
RAS	$B = 339.4 - 0.5 RAS$	**
PSI	$B = 387.9 - 2.2 PSI$	***
CO ₃ ²⁻	$B = 389.8 - 46.9 \ln(CO_3^{2-})$	**
HCO ₃ ⁻	$B = 344.0 - 7.8 HCO_3^-$	**
Cl ⁻	$B = 494.7 - 57.7 \ln(Cl^-)$	***
SO ₄ ²⁻	$B = 337.5 - 4.3 SO_4^{2-}$	*

Puede observarse en el cuadro anterior que la relación entre la biomasa y la CE y las concentraciones de Na^+ , K^+ , Cl^- y CO_3^{2-} presenta un mejor ajuste a un modelo logarítmico, mientras que el resto de las variables mostraron mejor ajuste al modelo lineal. En contraste con lo observado por Delgado (1985), no se observó relación con calcio o magnesio, probablemente porque en Texcoco se encuentran en cantidades muy reducidas. Las figuras 4.3.1 a 4.3.3. muestran gráficamente estas relaciones.

Como se señaló anteriormente, la biomasa total fue el parámetro que mayor correlación presentó con las variables edáficas analizadas. El cuadro 4.3.10. muestra las ecuaciones de regresión obtenidas, las cuales se muestran gráficamente en las figuras 4.3.4. a 4.3.7. Destaca el alto grado de significancia estadística y que en este caso los modelos que presentaron mejor ajuste fueron los lineales para todas las variables.

Cuadro 4.3.10. Ecuaciones de regresión entre la biomasa total (B) y variables edáficas (=significativo al 99%) ($B = \text{g m}^{-2} 240\text{día}^{-1}$; $CE = \text{dS m}^{-1}$; concentraciones de iones edáficos = mmol L^{-1}).**

Variable	Ecuación	Significancia
pH	$B = 2621.6 - 233.0 \text{ pH}$	***
CE	$B = 370.5 - 4.4 \text{ CE}$	***
Na^+	$B = 357.7 - 0.2 \text{ Na}^+$	***
K^+	$B = 359.9 - 2.6 \text{ K}^+$	***
RAS	$B = 358.5 - 0.2 \text{ RAS}$	***
PSI	$B = 469.9 - 3.2 \text{ PSI}$	***
CO_3^{2-}	$B = 375.9 - 3.3 \text{ CO}_3^{2-}$	***
HCO_3^-	$B = 372.1 - 5.3 \text{ HCO}_3^-$	***
Cl^-	$B = 358.8 - 0.3 \text{ Cl}^-$	***
SO_4^{2-}	$B = 367.0 - 3.1 \text{ SO}_4^{2-}$	***

Del resto de variables estudiadas del material vegetal colectado, (% de cenizas, contenidos de Na^+ , K^+ y relación Na^+/K^+), no se observó ninguna relación estadísticamente significativa con la salinidad y sodicidad del suelo para los casos de *Distichlis spicata* y *Sporobolus pyramidatus*; sin embargo, sí se encontró este tipo de relación entre *Suaeda torreyana* y algunos parámetros edáficos

Es posible que lo anterior se deba a que las dos primeras especies no son acumuladoras de sales, de modo que su concentración interna de sales no cambia aunque cambie la salinidad del suelo, como Flowers (1985) reporta para otras gramíneas como *Elymus oliveri*

y *Puccinellia maritima*. En cambio, *Suaeda torreyana*, que sí es acumuladora, sí presenta un aumento estadísticamente significativo en su concentración interna de sales y Na^+ con el aumento en salinidad, al igual que ocurre con otras especies acumuladoras de la misma familia Chenopodiaceae, como *Suaeda maritima*, *S. monoica* y varias especies de *Atriplex* (Flowers, 1985), y *Salicornia europaea*, que presenta una relación significativa entre la salinidad y la acumulación de Na^+ en tallo y raíz (Riehl y Ungar, 1982).

Las relaciones entre las variables analizadas de *Suaeda torreyana* y los parámetros edáficos se presentan en el cuadro 4.3.11., y la figura 4.3.8. muestra como ejemplo tres gráficas de estas relaciones.

Cuadro 4.3.11. Relaciones estadísticamente significativas entre variables vegetales y edáficas para *Suaeda torreyana*. (CE = dS m^{-1} , concentraciones de iones edáficos = mmol L^{-1}).

Variable edáfica	% de ceniza en el tejido vegetal (% C)		
	Ecuación	r	significancia
CE	$\%C = 19.1 + 4.2 \ln(\text{CE})$	0.44	***
pH	$\%C = -70.0 + 9.8 \text{ pH}$	0.30	***
Na^+	$\%C = 12.4 + 3.3 \ln(\text{Na}^+)$	0.42	***
K^+	$\%C = 20.6 + 3.3 \ln(\text{K}^+)$	0.43	***
PSI	$\%C = 2.5 + 6.5 \ln(\text{PSI})$	0.44	***
CO_3^{2-}	$\%C = 20.6 + 2.7 \ln(\text{CO}_3^{2-})$	0.34	**
HCO_3^-	$\%C = 23.8 + 0.3 \text{ HCO}_3^-$	0.39	***
Cl^-	$\%C = 13.8 + 3.4 \ln(\text{Cl}^-)$	0.42	***
SO_4^{2-}	$\%C = 24.8 + 0.15 \text{ SO}_4^{2-}$	0.35	***
Na^+ ($\text{mmol } 100 \text{ g}^{-1}$) en el tejido vegetal ($\text{Na}_v$)			
	Ecuación	r	significancia
CE	$\text{Na}_v = 195.5 + 50.7 \ln(\text{CE})$	0.41	***
pH	$\text{Na}_v = -810.7 + 111.0 \text{ pH}$	0.3	**
Na^+	$\text{Na}_v = 98.7 + 44.2 \ln(\text{Na}^+)$	0.42	***
RAS	$\text{Na}_v = 98.4 + 45.9 \ln(\text{RAS})$	0.45	***
PSI	$\text{Na}_v = -41.8 + 88.2 \ln(\text{PSI})$	0.47	***
CO_3^{2-}	$\text{Na}_v = 202.9.7 + 37.7 \ln(\text{CO}_3^{2-})$	0.36	***
HCO_3^-	$\text{Na}_v = 252.1 + 4.1 \text{ HCO}_3^-$	0.36	***
Cl^-	$\text{Na}_v = 117.5 + 45.5 \ln(\text{Cl}^-)$	0.43	***
SO_4^{2-}	$\text{Na}_v = 264.2 + 1.8 \text{ SO}_4^{2-}$	0.30	**
Relación Na^+/K^+ del tejido vegetal (Na_v/K_v)			
	Ecuación	r	significancia
Na^+	$\text{Na}_v/\text{K}_v = 3.9 + 1.6 \ln(\text{Na}^+)$	0.48	***

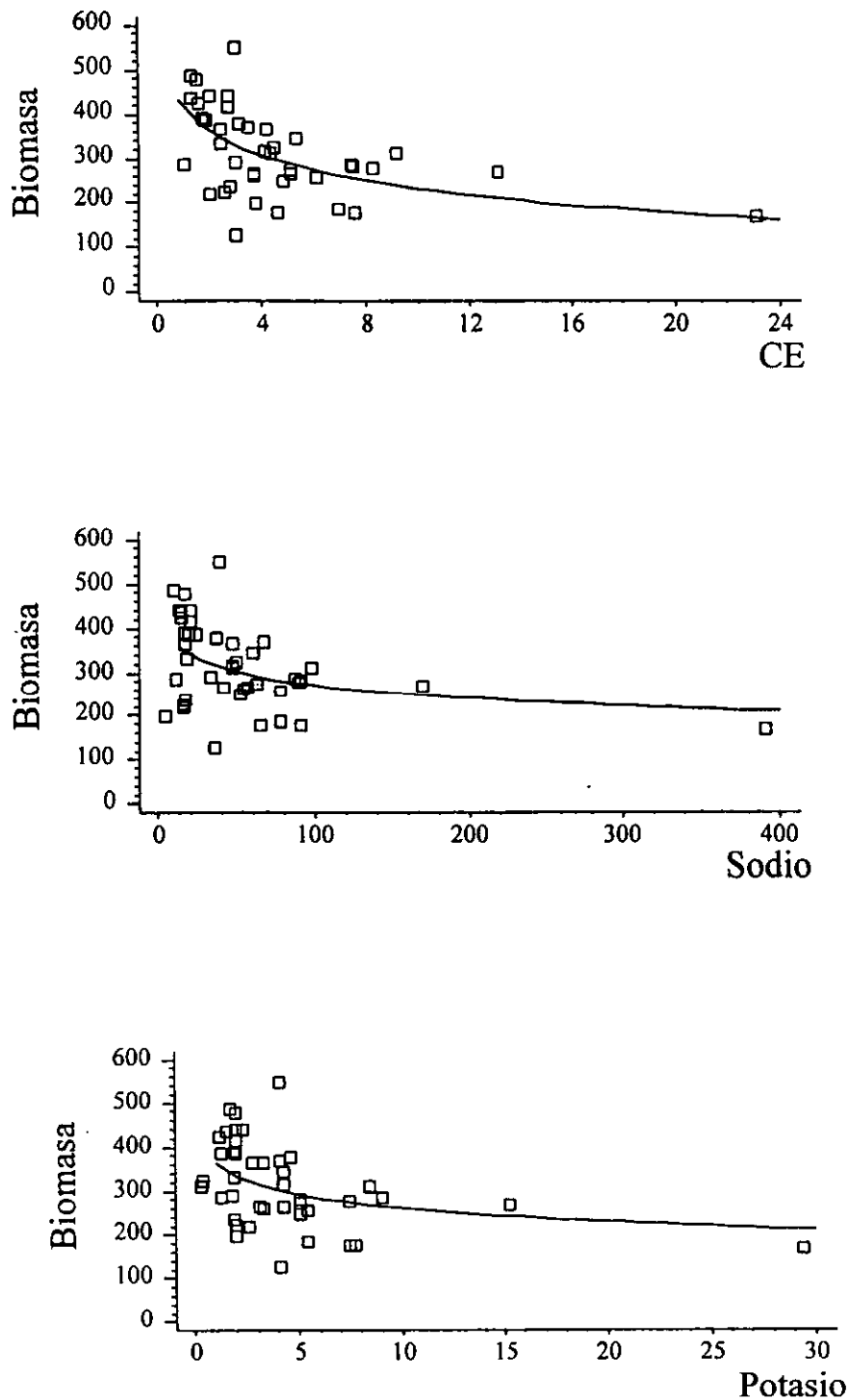


Figura 4.3.1. Relación entre la biomasa (g m⁻²) de *Distichlis spicata* y la conductividad eléctrica (dS m⁻¹) y las concentraciones de sodio y potasio solubles del suelo (mmol L⁻¹).

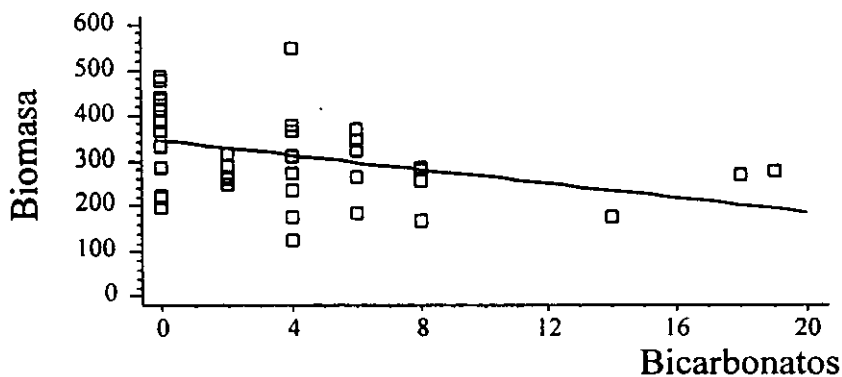
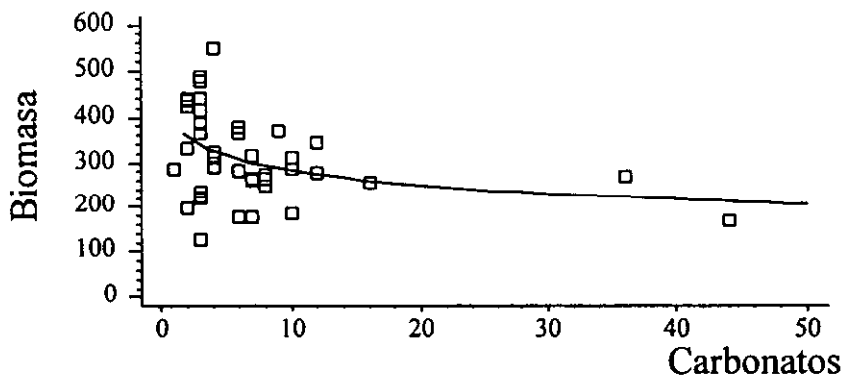
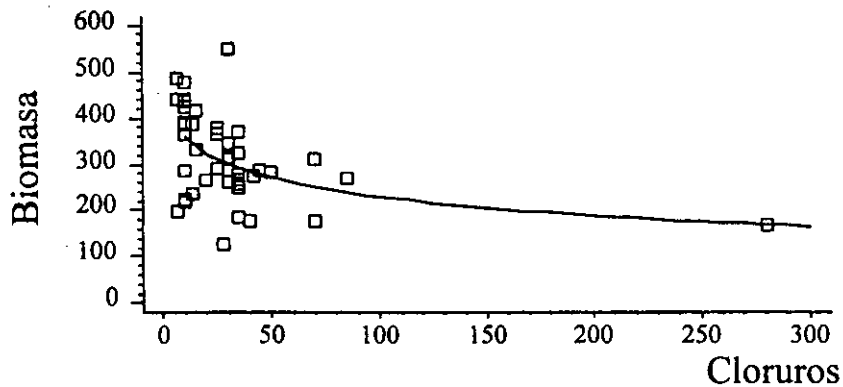


Figura 4.3.2. Relación entre la biomasa (g m⁻²) de *Distichlis spicata* y las concentraciones de cloruros, carbonatos y bicarbonatos del suelo (mmol L⁻¹).

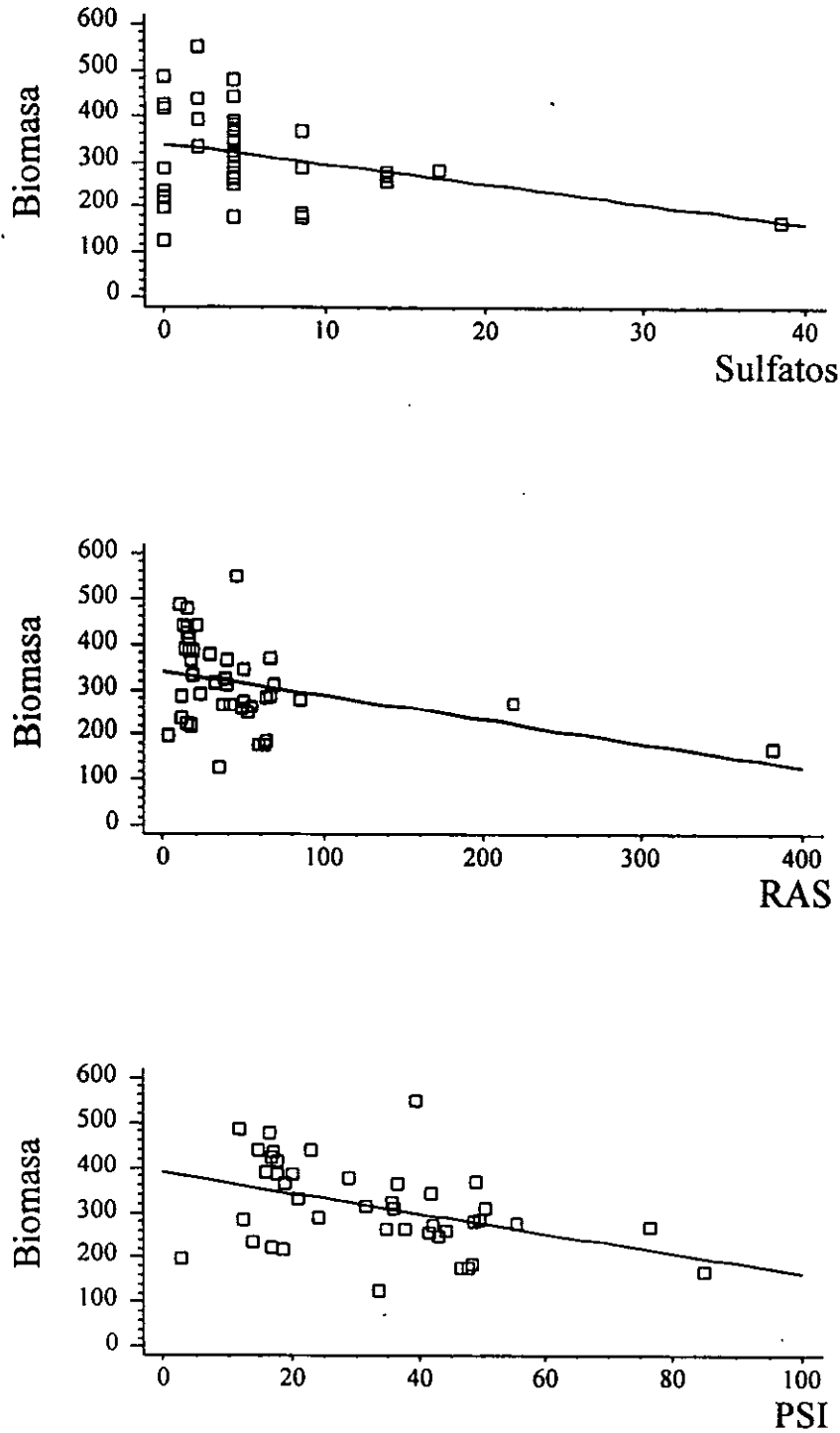


Figura 4.3.3. Relación entre la biomasa (g m⁻²) de *Distichlis spicata* y la concentración de sulfatos (mmol L⁻¹), la RAS y el PSI del suelo.

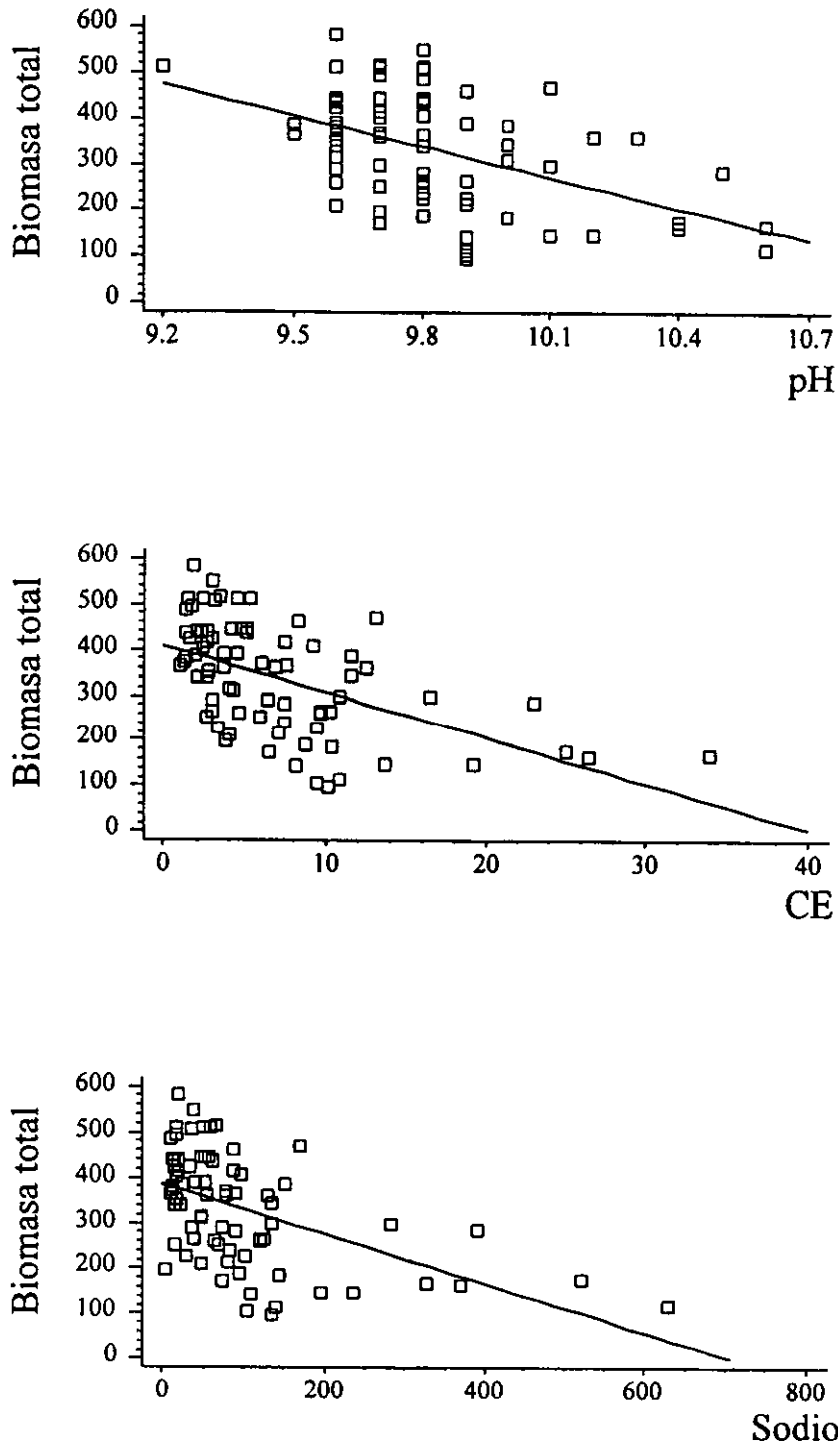


Figura 4.3.4. Relación entre la biomasa total (g m⁻²) y el pH, la conductividad eléctrica (dS m⁻¹) y la concentración de sodio soluble (mmol L⁻¹) del suelo.

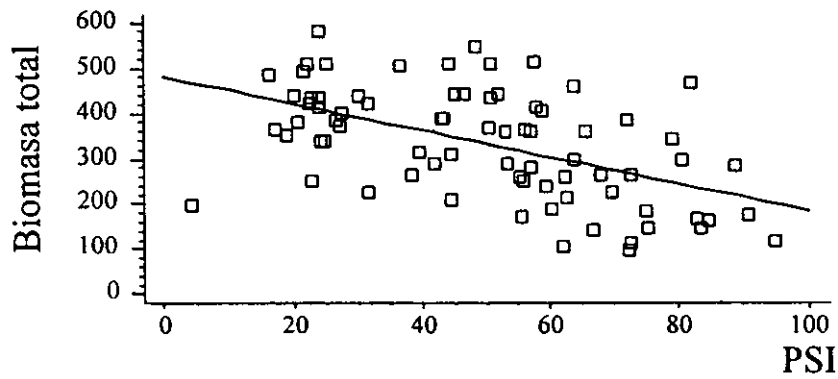
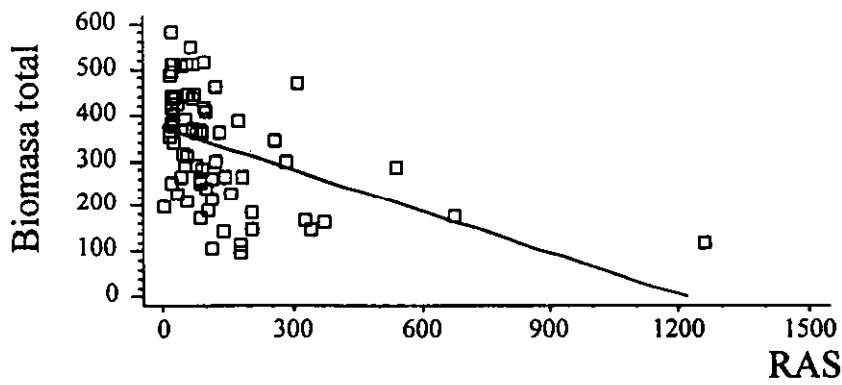
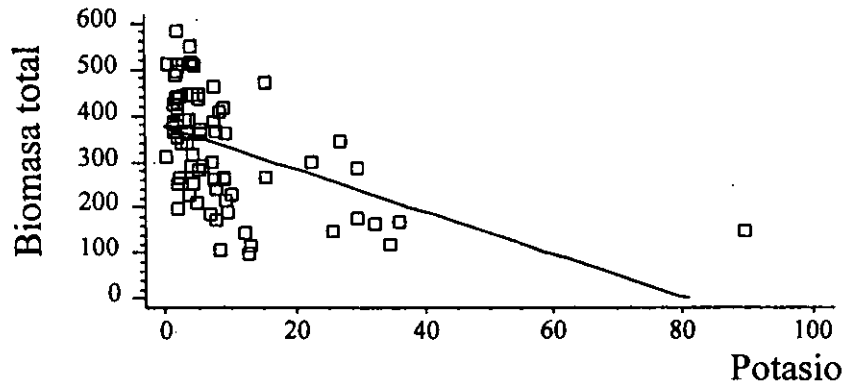


Figura 4.3.5. Relación entre la biomasa total (g m^{-2}) y la concentración de potasio soluble (mmol L^{-1}), la RAS y el PSI del suelo.

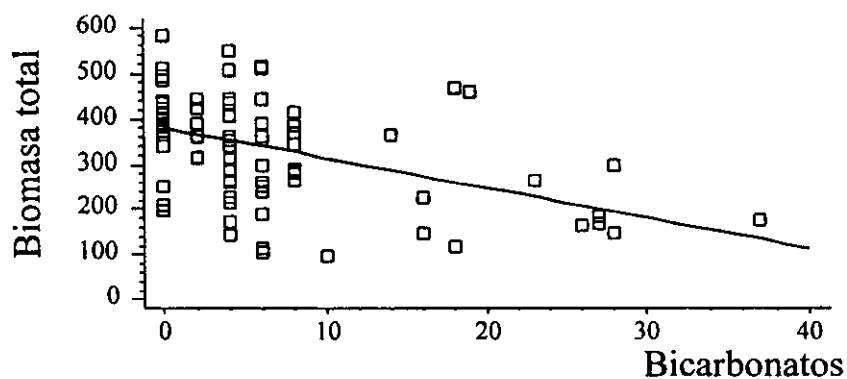
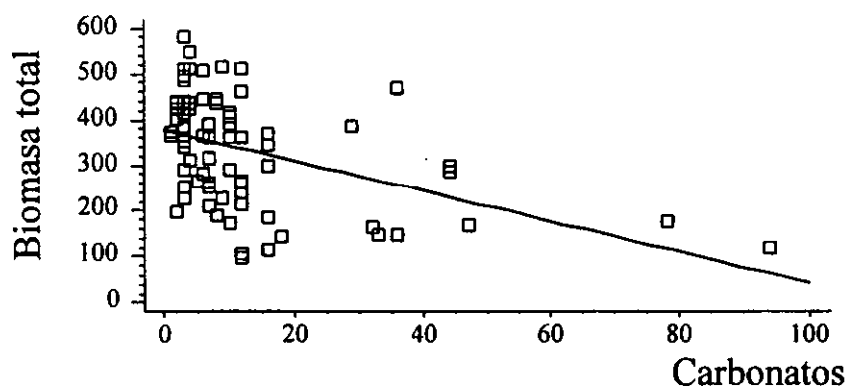
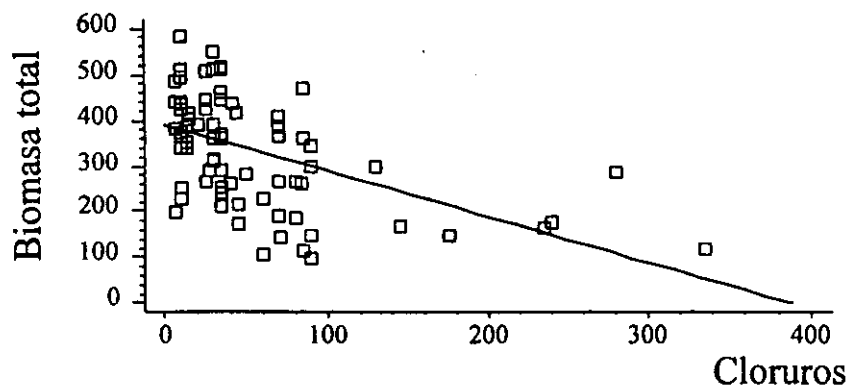


Figura 4.3.6. Relación entre la biomasa total (g m⁻²) y la concentración de cloruros, carbonatos y bicarbonatos solubles del suelo (mmol L⁻¹).

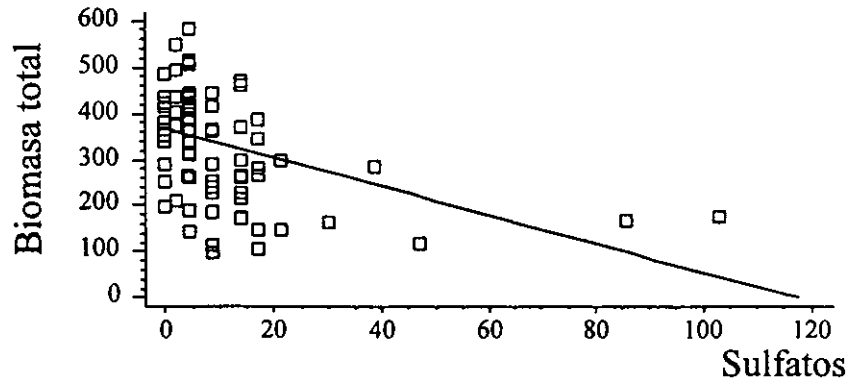


Figura 4.3.7. Relación entre la biomasa total (g m^{-2}) y la concentración de sulfatos solubles del suelo (mmol L^{-1}).

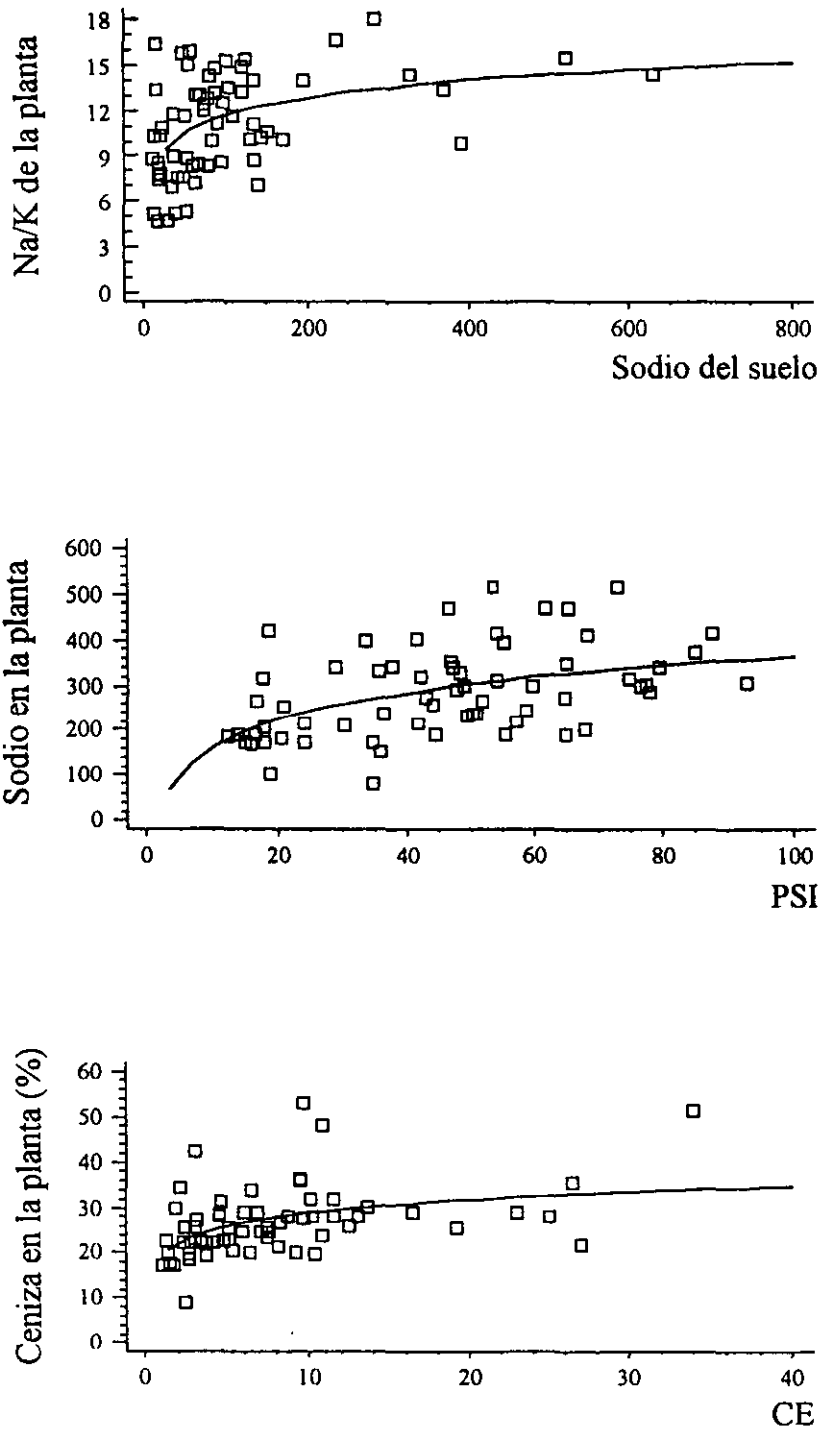


Figura 4.3.8. Relaciones entre la relación Na/K, contenido de sodio ($\text{mmol } 100\text{g}^{-1}$) y contenido de ceniza (%) de *Suaeda torreyana* con el sodio soluble (mmol L^{-1}), PSI y CE (dS m^{-1}) del suelo.

4.4. MEJORAMIENTO DEL SUELO

El cuadro 4.4.1. muestra los resultados de los análisis de salinidad y sodicidad del suelo del área experimental, antes de proceder a aplicar los tratamientos de mejoramiento del suelo. Con base en los resultados de la profundidad 0-30 cm, complementados con las determinaciones de capacidad de intercambio catiónico y densidad aparente, se hicieron los cálculos de las necesidades de mejorador y lámina de lavado, como se señaló en el capítulo 3.2. Puede verse que el suelo presentaba altos niveles de salinidad, caracterizados por una conductividad eléctrica de 87 dS m^{-1} , y un PSI de más de 96, por lo cual se trataba de un suelo extremadamente salino-sódico; como se señaló anteriormente, el sitio se encontraba desprovisto de vegetación y varios intentos anteriores de pastización con *Distichlis spicata* y forestación con *Tamarix chinensis* fracasaron por completo.

Cuadro 4.4.1. Análisis de salinidad y sodicidad del área experimental antes del proceso de mejoramiento.

Variable	Prof. 0-30 cm	Prof. 30-60 cm
pH	9.9	9.9
CE	87 dS m^{-1}	84 dS m^{-1}
Na^+	$1913.7 \text{ mmol L}^{-1}$	$1607.2 \text{ mmol L}^{-1}$
$\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$	1 mmol L^{-1}	1 mmol L^{-1}
RAS	1913.7	1607.2
PSI	96.6	96.0
CIC	$58 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$	$56 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$
densidad aparente	1.04 Mg m^{-3}	1.02 Mg m^{-3}

En las dos profundidades los resultados son prácticamente iguales, lo cual seguramente fue debido al mezclado del suelo por el subsoleo y barbecho que se realizó en el terreno previo a los trabajos de mejoramiento.

El cuadro 4.4.2. muestra los resultados que se obtuvieron en las parcelas experimentales sujetas a mejoramiento, al final de la aplicación de los lavados y del polisulfuro de calcio. Adicionalmente, afuera de las parcelas experimentales se efectuó un muestreo compuesto adicional, para representar las condiciones del suelo que no fue sujeto a ningún mejoramiento; los datos de estas muestras se designan como "SM".

Cuadro 4.4.2. Características del suelo después del mejoramiento (CE en dS m^{-1} ; concentraciones de iones en mmol L^{-1}).

Unidad	Prof.	pH	CE	N	Ca ²⁺ Mg ²⁺	RAS	PSI	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻
O1	0-30	10.3	33.2	620	1.0	620	90.1	248	32	225
	30-60	10.2	36.3	662	1.1	631	90.3	228	24	245
O2	0-30	10.1	49.5	728	1.1	694	91.1	272	38	330
	30-60	10.1	37.9	714	1.0	714	91.3	254	32	315
O3	0-30	10.1	21.4	282	1.0	282	80.6	88	34	150
	30-60	10.2	27.5	324	1.1	309	82.0	104	28	165
I1	0-30	10.0	39.5	492	2.2	332	83.0	168	30	200
	30-60	9.9	36.4	450	2.0	318	82.4	146	30	185
I2	0-30	9.7	61.3	1215	4.2	593	89.7	268	28	610
	30-60	9.9	58.4	1120	2.8	669	90.8	252	34	595
I3	0-30	9.9	38.1	576	2.6	357	84.0	152	32	250
	30-60	9.8	42.0	735	2.2	495	87.9	176	38	270
II1	0-30	9.8	66.6	1000	3.0	577	89.5	280	76	455
	30-60	9.7	62.1	910	2.8	544	88.9	268	60	440
II2	0-30	9.7	51.8	791	2.7	481	87.6	96	68	330
	30-60	9.8	53.0	836	3.0	482	87.7	104	74	335
II3	0-30	9.7	65.7	1159	4.0	580	89.5	240	46	505
	30-60	9.7	60.2	965	3.2	539	88.8	268	36	480
SM	0-30	9.9	89.6	1723	1.0	1723	96.2	332	36	565
	30-60	9.8	83.2	1614	1.0	1614	96.0	328	42	555

Con el fin de determinar si existieron diferencias producidas por los tratamientos aplicados, se realizaron una serie de análisis de varianza, que se presentan en el apéndice E (cuadros E1 a E9). Puesto que el mejoramiento planeado en los tres tratamientos se calculó solo para la capa 0-30 cm, se realizaron solamente los análisis de varianza correspondientes a dicha profundidad.

En la mayoría de los casos no existió diferencia significativa entre los tratamientos para ninguna de las variables excepto para el pH y las concentraciones de $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ y HCO_3^- , donde se presentó diferencia significativa al 5%. Estas diferencias pueden deberse al efecto acidificante del polisulfuro de calcio, que disminuyó el pH en los tratamientos donde fue aplicado; además, el contenido de calcio y bicarbonatos del mismo mejorador influyó en el incremento de estos dos parámetros en las parcelas donde fue aplicado. Por otro lado, si se comparan los datos de los tratamientos con los del suelo sin tratar (SM), se observa que los lavados produjeron una marcada disminución en la conductividad eléctrica, lo que era de esperarse.

Resultados muy variables han sido encontrados por otros autores al aplicar distintos mejoradores a los suelos del área. Usando polisulfuro de calcio, Ureña (1975) y Avila (1999) no encontraron efectos significativos, pero hay que señalar que las cantidades de mejorador utilizadas por estos autores fueron muy bajas. En cambio, aplicando azufre (que está contenido en el polisulfuro de calcio) Becerra (1983) observó una significativa reducción del pH en estos suelos, y también un incremento en el contenido de calcio.

Después de finalizado el proceso de mejoramiento del suelo, se procedió a la siembra de halófitas. Sin embargo, el muestreo del suelo se repitió en el momento en que éstas fueron cosechadas, para determinar el estado final del suelo, aproximadamente cuatro meses después de finalizado el trabajo de mejoramiento. Los resultados de este muestreo post-cosecha se presentan en el cuadro 4.4.3.

Cuadro 4.4.3. Características del suelo después de la cosecha (CE en dS m^{-1} ; concentraciones de iones en mmol L^{-1}).

Unidad	Prof.	pH	CE	Na^+	$\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$	RAS	PSI	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-
O1	0-30	10.5	53.5	1108	1.0	1108	94.2	368	25	455
	30-60	10.4	49.2	945	1.3	829	92.4	312	12	450
O2	0-30	10.4	68.4	1467	1.3	1287	95.0	484	23	615
	30-60	10.5	63.1	1239	1.2	1131	94.3	364	50	555
O3	0-30	10.6	51.2	945	1.4	996	93.6	340	9	423
	30-60	10.6	63.7	1402	1.2	1280	95.0	462	16	624
I1	0-30	10.2	41.0	684	2.7	416	86.0	188	10	355
	30-60	10.2	49.2	978	1.5	799	92.2	182	15	455
I2	0-30	10.3	58.7	1173	2.6	727	91.5	324	22	555
	30-60	10.2	62.0	1076	2.3	709	91.3	306	46	550
I3	0-30	10.2	50.2	971	1.9	704	91.2	262	17	455
	30-60	10.4	53.7	1043	1.7	800	92.2	300	24	515
II1	0-30	10.2	57.9	1010	1.9	733	91.5	324	13	520
	30-60	10.2	59.2	1206	1.5	985	93.6	320	15	510
II2	0-30	10.0	47.3	880	1.6	696	91.1	148	22	36
	30-60	10.1	54.0	1069	1.3	938	93.3	366	32	565
II3	0-30	10.0	54.3	945	2.4	610	90.0	248	8	415
	30-60	10.1	54.9	1076	1.5	879	92.8	284	24	478
SM	0-30	10.5	63.6	1086	1.2	991	93.6	406	25	522
	30-60	10.5	61.2	1069	1.0	1069	93.9	392	22	495

Al comparar los datos del cuadro 4.4.3. con los del 4.4.2., se observa que durante el período de crecimiento de las especies vegetales introducidas, los niveles de sales, el pH y

el PSI presentaron un incremento notable, casi alcanzando incluso los valores que se presentaron en el suelo sin tratar (SM), aunque en éste se presentó una disminución en la salinidad, debida posiblemente al efecto de lavado del agua de lluvia, ya que en suelos de la zona sujetos a labranza y con sistemas de drenaje instalados se observa este efecto (Avila, 1999). En los suelos del área ecológica referida en el capítulo 4.2. no se presentó disminución de la salinidad durante la época de lluvias, pero en este caso el suelo fue sujeto a subsuelo y labranza, lo que puede explicar la presencia de un proceso de lavado de sales. Este fenómeno puede haber sido producido por ascenso y redistribución de las sales de capas más profundas hacia las capas superficiales, o por el incremento de sales solubles de sodio debido a la salida de sodio del estado intercambiable, por la acción del mejorador aplicado, fenómeno observado en suelos de la zona al aplicar yeso (Montaño *et al.*, 1985).

Los análisis de varianza practicados a los resultados obtenidos en este muestreo (apéndice E; cuadros E10 a E18) son muy similares a los del primer muestreo. Las únicas variables que mostraron diferencias significativas para la segunda etapa fueron, nuevamente, el pH y la concentración de ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$), aunque también la RAS mostró diferencia debida a los tratamientos (lo que a su vez se debe al incremento de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$).

Los análisis de varianza muestran que existen diferencias significativas para algunas de las variables estudiadas debidas a los tratamientos, pero no señalan qué tratamientos fueron los que presentaron diferencias. Para obtener esta información, se realizó la determinación de los valores de diferencia significativa mínima (DSM). El cuadro 4.4.4. muestra los valores de las medias obtenidas en los tratamientos de las variables que presentaron diferencias significativas, junto con los valores de la DSM. Los tratamientos cuyas medias están separadas por valores mayores a la DSM, son diferentes.

Cuadro 4.4.4. Valores medios y diferencia significativa mínima (DSM) para las variables que presentaron diferencias significativas después de los lavados (1) y después de la cosecha (2) (Concentraciones de iones = mmol L⁻¹)

Tratamiento	pH (1)	Ca+Mg (1)	HCO ₃ (1)	pH (2)	Ca+Mg (2)	RAS (2)
O	10.16	1.03	34.6	10.50	1.23	1130.3
I	9.86	3.00	30.0	10.23	2.40	615.6
II	9.73	3.23	63.3	10.06	1.96	679.6
DSM	0.32	2.14	25.5	0.25	1.01	377.7

En este cuadro se observa que existen diferencias entre el tratamiento O y el II para el pH (1), la concentración de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ (1), la concentración de HCO_3^- (1), el pH (2), y la RAS (2); entre el tratamiento I y II para HCO_3^- (1); y entre el tratamiento O y el I para el pH (2), $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ (2) y la RAS (2). De esta información se deduce que los efectos positivos de la aplicación de los tratamientos sobre el suelo consistieron sobre todo en una disminución en el pH, y un incremento en la concentración de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ solubles, efectos que pueden atribuirse al polisulfuro de calcio utilizado y a las reacciones de acidificación y solubilización del calcio y magnesio del suelo que provoca, efecto que persiste aún después de la cosecha de las especies introducidas y que ha sido reportado por Díaz (1982) y Becerra (1983).

La cantidad de agua aplicada permitió reducir la conductividad eléctrica a un nivel menor que el planeado (de 70 dS m^{-1}), aunque para el muestreo realizado al final de la cosecha, los valores de CE se aproximan nuevamente a este valor. En cuanto al PSI, que se planeó reducir a 82% con el tratamiento I y a 68% con el II, presentó valores de menos de 90% al final del proceso de mejoramiento, pero cuando se efectuó la cosecha de las especies introducidas volvió a subir por arriba de 90%, de modo que los efectos de mejoramiento resultaron temporales, efecto que puede ser atribuido a la presencia de grandes cantidades de sales residuales, como señala González (1982); sin embargo, los cambios fueron suficientes para permitir el establecimiento de algunas especies, como se señala en el capítulo siguiente. Puesto que los dos niveles de polisulfuro de calcio aplicados prácticamente no mostraron diferencias significativas, bastaría con aplicar la dosis menor de polisulfuro de calcio para obtener el mismo resultado.

4.5. ESTABLECIMIENTO DE HALOFITAS

La evaluación del establecimiento de especies se llevó a cabo al final de un periodo de 105 días. La mayoría de las especies introducidas en los sitios experimentales no se establecieron, ya sea porque no germinaron, o bien, en el caso de las especies trasplantadas, porque no sobrevivieron. Tal fue el caso de las siguientes especies:

Hordeum jubatum

Eragrostis obtusiflora

Heliotropium curassavicum

Sesuvium portulacastrum

Spergularia marina

Bassia hyssopifolia

Atriplex semibaccata

Atriplex muricata

En el caso particular de *Bassia hyssopifolia*, se observó germinación y emergencia, pero las plántulas no crecieron y murieron al cabo de algunas semanas.

Cuando las plantas fueron sembradas, después de los tratamientos de lavado y aplicación de mejoradores, los valores originales de CE y PSI del suelo (87 dS m⁻¹ y 96%) se redujeron a los valores promedio que se presentan en el cuadro 4.5.1. Debe recordarse que no se presentó diferencia significativa entre los tratamientos para CE y PSI.

Cuadro 4.5.1. Valores promedio de CE y PSI en las parcelas experimentales al momento de la siembra (CE = dS m⁻¹).

Tratamiento	CE	pH	PSI
O	34	10.1	87
I	46	9.8	85
II	61	9.7	88

Con base en estos resultados, puede asumirse que la tolerancia a la salinidad de las especies que no prosperaron es menor a los valores presentes en los suelos al momento de la siembra, lo cual evitó su establecimiento. Aronson (1989) reporta los siguientes valores de conductividad eléctrica máxima que han sido observados para algunas de estas especies:

Sesuvium portulacastrum, 56 dS m⁻¹; *Spergularia marina*, 30 dS m⁻¹, y *Atriplex semibaccata*, 15 dS m⁻¹. Adicionalmente, Garzón (1986) señala que *Atriplex muricata* se desarrolla en suelos con 12 dS m⁻¹. Estos datos efectivamente concuerdan con los resultados; no se tiene información sobre las otras especies.

Las siguientes especies sí se establecieron, aún cuando la producción de biomasa, tasa de germinación o supervivencia hayan sido reducidas (cuadro 4.5.2.):

Sporobolus pyramidatus

Distichlis spicata

Suaeda torreyana 1

Suaeda torreyana 2

Kochia scoparia

Tamarix chinensis

Tamarix aphylla

Cuadro 4.5.2. Resultados obtenidos para las especies establecidas (% de supervivencia para las especies de *Tamarix*, g 105 día⁻¹ m⁻² de peso seco para las demás).

Especie	O1	O2	O3	I1	I2	I3	II1	II2	II3
<i>Sporobolus pyramidatus</i>	0	0	0	0	0.12	0.09	0.07	0	0.04
<i>Distichlis spicata</i>	0	0	0	0.42	0.82	0.95	1.27	1.75	1.88
<i>Suaeda torreyana 1</i>	0	0	0	24.6	3.4	5.8	7.6	8.3	1.4
<i>Suaeda torreyana 2</i>	0	0	0	11.3	16.5	13.6	14.3	19.7	29.1
<i>Kochia scoparia</i>	0	0	0	0.65	0	0.57	0.78	0	1.41
<i>Tamarix chinensis</i>	0	0	0	40	60	60	100	80	60
<i>Tamarix aphylla</i>	0	0	0	20	20	0	0	0	0

Aronson (1989) reporta que *Distichlis spicata* tolera hasta 70 dS m⁻¹, y que *Tamarix aphylla* y *Suaeda torreyana* toleran 56 dS m⁻¹, lo cual explica en parte su supervivencia en este caso. Sin embargo, este mismo autor reporta una tolerancia de sólo 8 dS m⁻¹ para *T. chinensis*, que es obviamente mucho menor que la que tiene esta especie.

Es evidente que a pesar de que las diferencias entre los tratamientos no resultaron significativas en cuanto a la mayoría de las variables de salinidad (excepto el pH), para el establecimiento de especies se requiere de añadir mejoradores al suelo para favorecer este establecimiento, ya que en las parcelas O, que sólo recibieron lavados, sin mejorador, el

establecimiento vegetal fue de cero para todos los casos. El análisis estadístico confirma lo anterior; los cuadros E19 a E25 del apéndice E presentan los análisis de varianza para las especies que se establecieron. De acuerdo con estos análisis, las especies donde se presentaron diferencias significativas (95%) debidas a los tratamientos, fueron *Suaeda torreyana* y *Tamarix chinensis*, mientras que *Distichlis spicata* presentó diferencias altamente significativas (99%). Las otras especies no presentaron diferencias significativas.

El cuadro 4.5.3. presenta los valores de las medias y la diferencia significativa mínima (DSM) para los tratamientos de las especies donde el análisis de varianza mostró la presencia de diferencias significativas.

Cuadro 4.5.3. Valores medios y diferencia significativa mínima (DSM) para *Distichlis spicata*, *Suaeda torreyana* (2) y *Tamarix chinensis*

Tratamiento	<i>Distichlis spicata</i> g m ⁻² 105día ⁻¹	<i>Suaeda torreyana</i> (2) g m ⁻² 105día ⁻¹	<i>Tamarix chinensis</i> %
O	0	0	0
I	0.73	13.8	53.3
II	1.63	21.0	80.0
DSM	1.13	12.7	52.3

En este cuadro se puede observar que para *Distichlis spicata* existe diferencia significativa entre el tratamiento II y el O; para *Suaeda torreyana* (2), y para *Tamarix chinensis*, entre el O y los tratamientos I y II, pero no entre los tratamientos I y II.

De las especies utilizadas, *Sporobolus pyramidatus*, *Tamarix aphylla* y *Kochia scoparia* pueden consierarse como especies menos tolerantes, con escaso establecimiento y/o producción de biomasa *Distichlis spicata* presentó buen establecimiento, pero la producción de biomasa durante el periodo de observación fue muy reducida, aunque las plantas continúan vivas; se ha visto que es importante que esta especie reciba riegos periódicos para garantizar su supervivencia (Llerena, 1992). Algunos individuos de *Kochia scoparia* lograron establecerse, pero su desarrollo fue muy reducido debido a la alta salinidad, ya que M. Anaya (com. pers.) indica que en suelos con CE de 10 dS m⁻¹ puede producir hasta 124 ton ha⁻¹ año⁻¹ de forraje verde. El mayor éxito se obtuvo con *Tamarix chinensis*, que presentó un alto índice de supervivencia, sobre todo tomando en cuenta que el área donde se ubica el sitio experimental

ha estado sujeta en el pasado a la introducción de esta especie sin ningún éxito, por lo cual los tratamientos utilizados, en particular el I, por su menor dosis y por tanto costo, pueden considerarse como necesarios para que se pueda lograr establecer esta especie en el área y en otros sitios con condiciones similares.

Tamarix chinensis ha sido conocido en la zona incorrectamente como *T. plumosa* (sinónimo) y *T. parviflora*, mientras que *T. aphylla* ha sido confundido con *T. articulata*, que es una especie distinta (Llerena, 1995). Se ha observado que ambas especies pueden desarrollarse a lo largo de bordos de canales de riego, donde disponen de abundante humedad, en suelos con CE de hasta 55 dS m^{-1} ; sin embargo, sin riego sólo prosperan en suelos con CE de 18 dS m^{-1} (Garzón, 1986). Una evaluación de la supervivencia de las especies de *Tamarix* que han sido plantadas en el área, ha sido realizada por Pedraza (1988), quien encontró porcentajes de supervivencia de 0 a 100% con medias de 38 a 51%, que atribuye tanto a la ubicación (con los mayores porcentajes a lo largo de canales), salinidad del suelo y al manejo (fundamentalmente riego, aunque nunca se han aplicado mejoradores), y que son menores a los obtenidos en el presente trabajo usando mejoradores.

4.6. ANALISIS DE DIFRACCION DE RAYOS X Y MICROSCOPIA ELECTRONICA

Los resultados obtenidos a través de difracción de rayos X se presentan en las figuras 4.6.1. a 4.6.18. En estas figuras se presentan los difractogramas correspondientes a las muestras analizadas. El cuadro 4.6.1. muestra las claves correspondientes de cada muestra.

Cuadro 4.6.1. Claves para la identificación de muestras en los difractogramas.

Clave	Tratamiento o muestra
MP	Suelo total (polvo desorientado)
MM	Arcillas saturadas con magnesio
ME	Arcillas saturadas con etilenglicol
MB	Arcillas calcinadas a 450°C
MA	Arcillas calcinadas a 550°C
1	Perfil, costra superficial
2	Perfil, prof. 0-3 cm
3	Perfil, prof. 3-10 cm
4	Perfil, prof. 10-13 cm
5	Perfil, prof. 13-32 cm
6	Perfil, prof. 32-80 cm
7	Perfil, prof. 80-90 cm
8	Perfil, prof. 90-92 cm
9	Perfil, prof. 92-102 cm
10	Perfil, prof. 102-135 cm
11	Perfil, prof. 135-154 cm
12	Perfil, prof. 154-159 cm
13	Perfil, prof. 159-170 cm
14	Perfil, prof. 170-180 cm
15	Perfil, prof. 180-200 cm
16	Area bajo recuperación, prof. 0-30 cm

En los difractogramas se muestran los valores de intensidad de los rayos X difractados contra el valor 2θ (donde θ es el ángulo de difracción). El método de difracción de rayos X permite identificar minerales a través de conocer las distancias entre planos de átomos de los cristales del mineral en cuestión. Conociendo el valor 2θ , es posible determinar esta distancia a partir de la conocida ley de Bragg:

$$n\lambda = 2d \text{ seno } \theta$$

Donde λ es la longitud de onda de los rayos X (comúnmente se utiliza un valor de 1.54 Å, que es el producido por un ánodo (anticátodo de cobre); n es el orden de difracción

(número de longitudes de onda entre rayos difundidos por planos atómicos adyacentes y puede valer 1, 2, 3, etc.); d es la distancia interplanar, y θ el ángulo de difracción.

Cuadro 4.6.2. Equivalencias entre 2θ y d para los difractogramas.

2θ	d (Å)		2θ	d (Å)
2	44.1		31	2.9
3	29.4		32	2.8
4	22.1		33	2.7
5	17.7		34	2.6
6	14.7		35	2.6
7	12.6		36	2.5
8	11.0		37	2.4
9	9.8		38	2.4
10	8.8		39	2.3
11	8.0		40	2.3
12	7.4		41	2.2
13	6.8		42	2.1
14	6.3		43	2.1
15	5.9		44	2.1
16	5.5		45	2.0
17	5.2		46	2.0
18	4.9		47	1.9
19	4.7		48	1.9
20	4.4		49	1.9
21	4.2		50	1.8
22	4.0		51	1.8
23	3.9		52	1.8
24	3.7		53	1.7
25	3.6		54	1.7
26	3.4		55	1.7
27	3.3		56	1.6
28	3.2		57	1.6
29	3.1		58	1.6
30	3.0		59	1.6
			60	1.5

En virtud de que el valor d es característico de cada mineral, su conocimiento es útil para la identificación de los minerales; se obtiene de la forma

$$d/n = \lambda / (2 \text{ seno } \theta)$$

Como el orden de difracción n no siempre es conocido, comúnmente se considera como 1, y el valor d/n se hace igual a d .

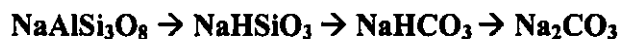
En el difractograma, surgen una serie de señales; conociendo los valores d correspondientes, es posible determinar a qué mineral corresponden, comparando estos valores contra tablas existentes. El valor 2θ puede no ser suficiente para este fin, ya que si se utilizan diferentes longitudes de onda de los rayos X, los valores de θ serán diferentes, de modo que los valores de θ sólo son comparables si las longitudes de onda λ son las mismas; en cambio, el cálculo de los valores d permite comparar las líneas o señales de difracción sin importar las longitudes de onda.

En la actualidad, sin embargo, los difractómetros de rayos X están integrados a bases de datos computarizadas que permiten interpretar de forma automatizada los difractogramas, haciendo el cálculo de d y comparándolo contra los datos almacenados en la base de datos, pudiendo identificar los minerales presentes de manera directa. Por este motivo, los difractogramas que se presentan en las figuras siguientes sólo contienen los datos de intensidad y 2θ , pero con líneas superpuestas donde se identifican los minerales presentes. Sin embargo, para auxiliar en la interpretación de los resultados, el cuadro 4.6.2. muestra una tabla de conversión de los valores 2θ a valores de d en angstroms; en la discusión siguiente se hablará de los valores d , ya que son éstos los que comúnmente se reportan.

4.6.1. Suelo total (polvo desorientado).

Los difractogramas correspondientes a las muestras de suelo total en polvo se presentan en las figuras 4.6.1 y 4.6.2, para el rango 2θ de 2 a 60, y una ampliación de 2 a 32 se muestra acompañando los difractogramas de las figuras 4.6.3 a 4.6.18. En estos difractogramas se observa que los minerales no arcillosos que se presentan en mayor proporción en el suelo, son la halita (NaCl), calcita (CaCO_3), y albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), cuya presencia en la región también han sido señalada por Del Valle (1983). De ellos, la halita presenta señales a $d = 2.8$ y 1.9 \AA . Se encuentra abundantemente en la costra superficial, y a partir de los 90 cm de profundidad, coincidiendo con las áreas de mayor concentración de sales en el perfil (ver capítulo 4.1), lo que probablemente lleva a la precipitación del cloruro de sodio. Igualmente, la calcita se encuentra a lo largo de todo el perfil, con señales intensas a $d = 3.0 \text{ \AA}$; su presencia puede ser debida en parte a su baja solubilidad, y a que se

ha formado de la reacción entre calcio intercambiable y carbonato de sodio durante el proceso de sodificación del suelo (Ortega, 1993; Santana, 1989). Esta calcita permite que los suelos del área puedan ser mejorados o recuperados utilizando mejoradores como azufre, ácido sulfúrico o polisulfuro de calcio, los cuales requieren de la presencia de carbonato de calcio para poder actuar en los suelos (Aceves, 1979). La albita es con mucho el mineral más común; su presencia en la zona proviene del acarreo de productos del intemperismo de las sierras que rodean al lago de Texcoco, así como de cenizas volcánicas, y se presenta en todo el perfil, con señales a $d = 3.18 \text{ \AA}$ particularmente intensas a partir de los 92 cm de profundidad; en gran medida, este feldespató a base de sodio es responsable de la aparición de carbonato de sodio y del alto grado de sodicidad del suelo, a través de reacciones de intemperismo como las siguientes (Koshevnikov, 1974), en donde pierde óxidos de Si y Al formando hidrosilicato de sodio, el cual posteriormente sufre carbonatación:



También se observa en los difractogramas la presencia de cristobalita, un polimorfismo de sílice, caracterizada por presentar señales a $d = 4.4$ y 4.0 \AA . La presencia de este mineral ha sido reportada para la zona por Rivera (1975).

4.6.2. Fracción arcillosa orientada.

Las figuras 4.6.3 a 4.6.18 muestran los difractogramas obtenidos para la fracción arcillosa orientada. Es particularmente notable la presencia de montmorillonita como arcilla dominante, presentan señales de intensidad considerable a $d = 15 \text{ \AA}$ sin tratamiento (saturada con magnesio), desplazándose a $d = 18 \text{ \AA}$ al saturarse con etilenglicol, lo que provoca su expansión, y colapsándose a $d = 10 \text{ \AA}$ al ser calcinada a 450 y $550 \text{ }^\circ\text{C}$. Se observa someramente su presencia en la costra superficial, pero se incrementa notablemente la intensidad de las señales en el resto del perfil, particularmente en las capas a partir de los 92 cm de profundidad. La presencia de esta arcilla en la zona ha sido reportada por Rivera (1975) y es de esperarse ya que la montmorillonita, como todas las esmectitas, es común en sitios mal drenados, con condiciones mínimas de lavado, y puede formarse de vidrio volcánico en un medio alcalino (Millot, 1970; Borchardt, 1989). Esta arcilla constituye el material comúnmente conocido en la zona como "jaboncillo" (Ramírez, 1985), y es

responsable de los problemas de baja permeabilidad del área, debido a sus características de expansión, y a la saturación con sodio que la aumenta (Shainberg, 1975). Presenta una alta capacidad de intercambio catiónico, saturada en su mayor proporción con sodio.

En los difractogramas se observa también la presencia de caolinita, la cual es reconocible por presentar señales a $d = 7.1 \text{ \AA}$ que se detectan al presentarse en las preparaciones sin tratamiento, con tratamiento de etilenglicol y con la calcinación a 450°C , pero desapareciendo en la calcinación a 550°C . Su presencia en estas condiciones edáficas es más difícil de explicar, porque la caolinita se presenta más comúnmente en zonas con buen drenaje, sujetas a lavado que disminuya los contenidos de cationes alcalinos, alcalinotérreos y hierro. Sin embargo, a pesar del mal drenaje, en la zona los contenidos de calcio y magnesio son muy bajos, lo que podría favorecer la formación de caolinita. Asimismo, el alto pH prevaleciente aumenta la solubilidad del silicio, el cual podría recristalizar en forma de caolinita a través de un proceso de diagénesis. Además, la caolinita puede formarse a partir de feldespatos provenientes de cenizas volcánicas (Besoain, 1985). En el perfil evaluado, es particularmente notable la presencia de caolinita en las capas de 0 a 90 cm, y de 135 a 180 cm. También se detectó la presencia de Illita, aunque sólo en la costra y la capa superficial (0-30 cm), con señales a $d = 10 \text{ \AA}$.

La fracción arcillosa también presenta una constante presencia de albita, con señales a $d = 3.18$ y 3.20 \AA que son más intensos en la capa superficial y en las partes bajas del perfil.

La muestra del área donde se efectuó el estudio sobre recuperación es muy similar a las anteriores, excepto por la muy elevada intensidad de las señales de albita.

4.6.3. Microscopía electrónica.

A través del uso de un microscopio electrónico de barrido, fue posible obtener imágenes de la arcilla que se presenta en mayor abundancia en estos suelos, la montmorillonita. La figura 4.6.19. presenta una imagen que corresponde a agregados de esta arcilla, con la forma típica de hojuelas que presentan. Esta imagen procede de la profundidad 102-135 cm del perfil que fue sujeto a muestreo mensual (capítulo 4.1). La figura 4.6.20. muestra una imagen de las partículas de arcilla separadas, el tamaño de cada partícula es menor de $2 \mu\text{m}$ de diámetro. Esta muestra corresponde a un pozo excavado en el área experimental donde se efectuó recuperación del suelo y siembra de halófitas, a la profundidad de 30 a 60 cm.

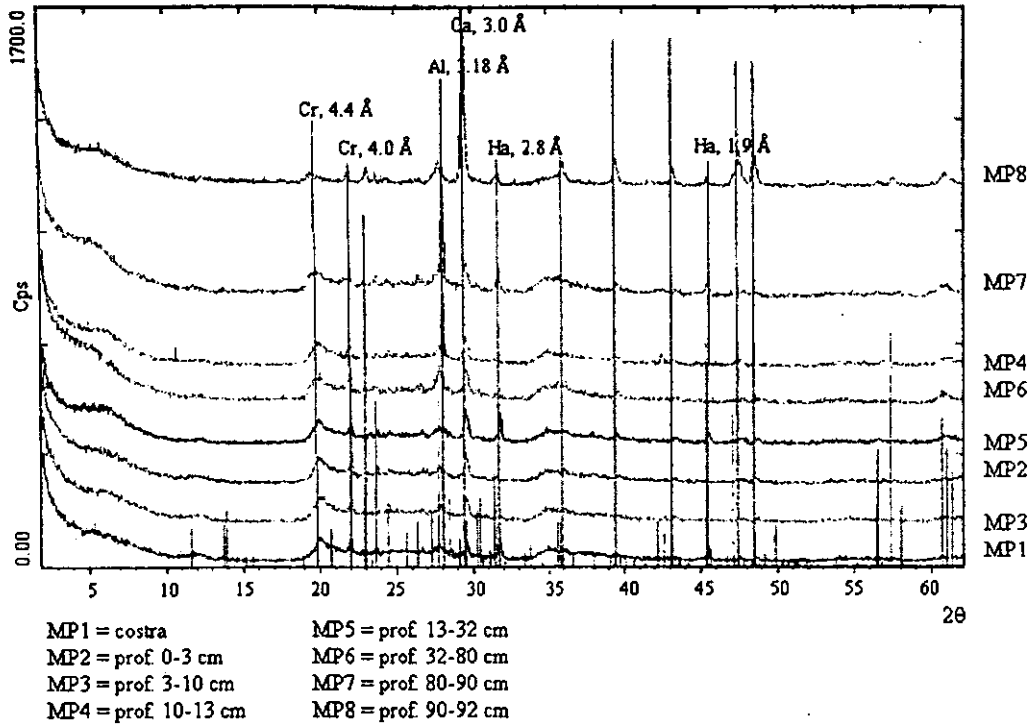


Figura 4.6.1. Difractogramas del suelo completo (polvo desorientado). Al= albita; Ca= calcita; Cr= cristobalita; Ha = halita.

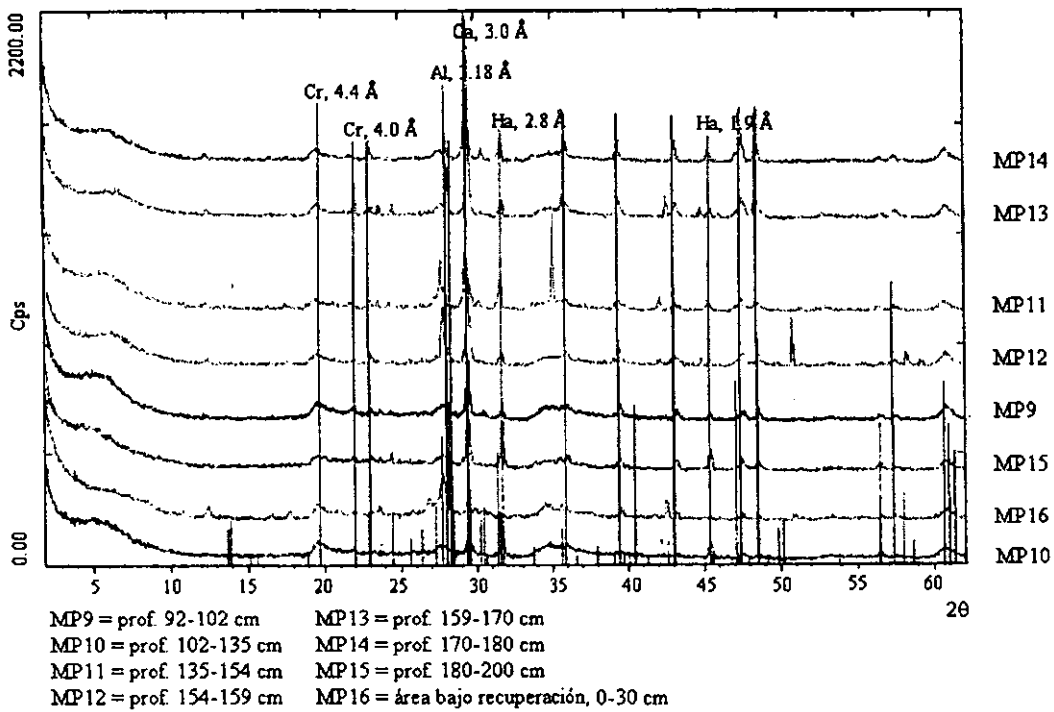
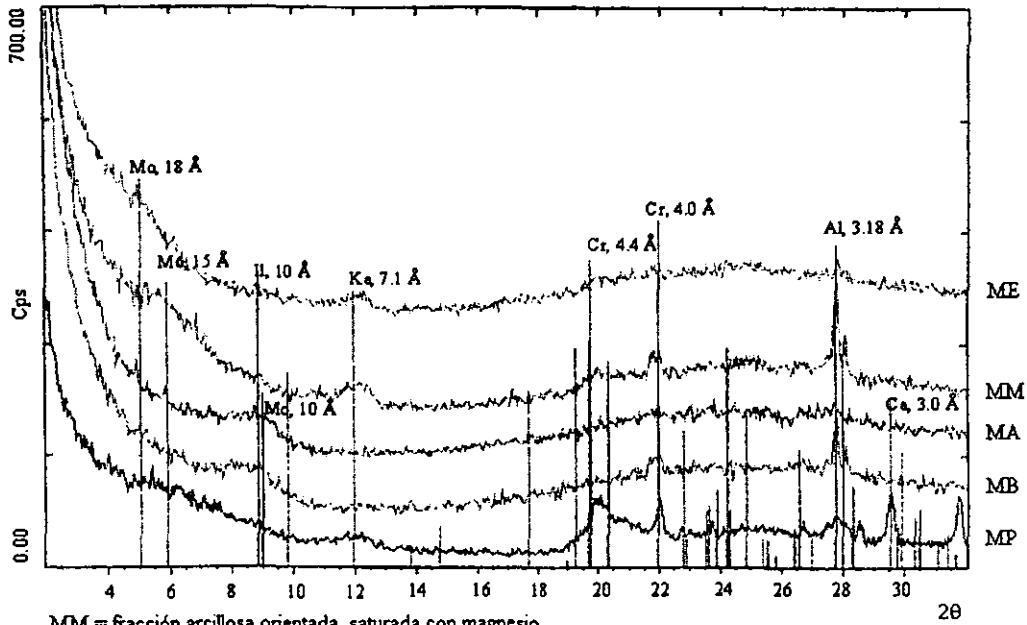
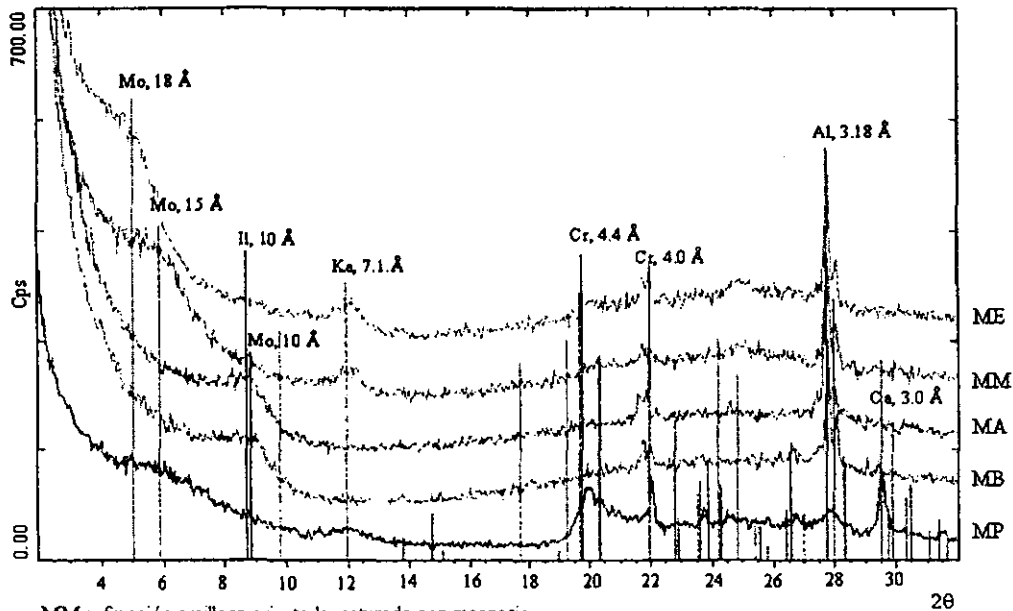


Figura 4.6.2. Difractogramas del suelo completo (polvo desorientado). Al= albita; Ca= calcita; Cr= cristobalita; Ha = halita.



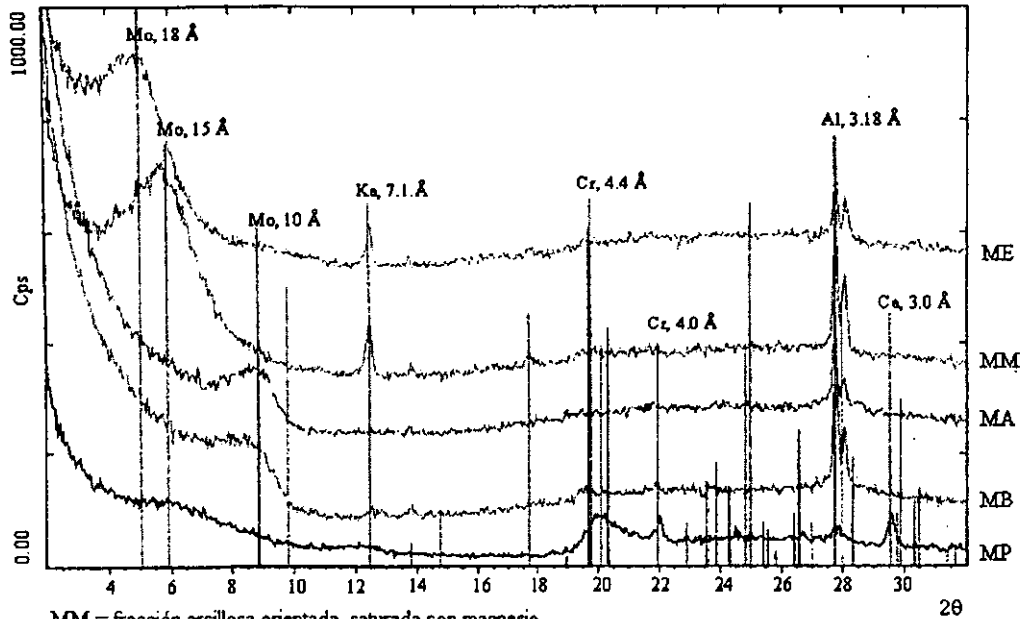
MM = fracción arcillosa orientada, saturada con magnesio.
 ME = fracción arcillosa orientada, saturada con magnesio y etilenglicol
 MB = fracción arcillosa orientada, calcinada a 450°C
 MA = fracción arcillosa orientada, calcinada a 550°C
 MP = suelo completo, polvo desorientado

Figura 4.6.3. Difractogramas para la fracción arcillosa, costra superficial. Mo = montmorillonita; Il = illita; Ka = caolinita; Al= albita; Ca= calcita; Cr= cristobalita.



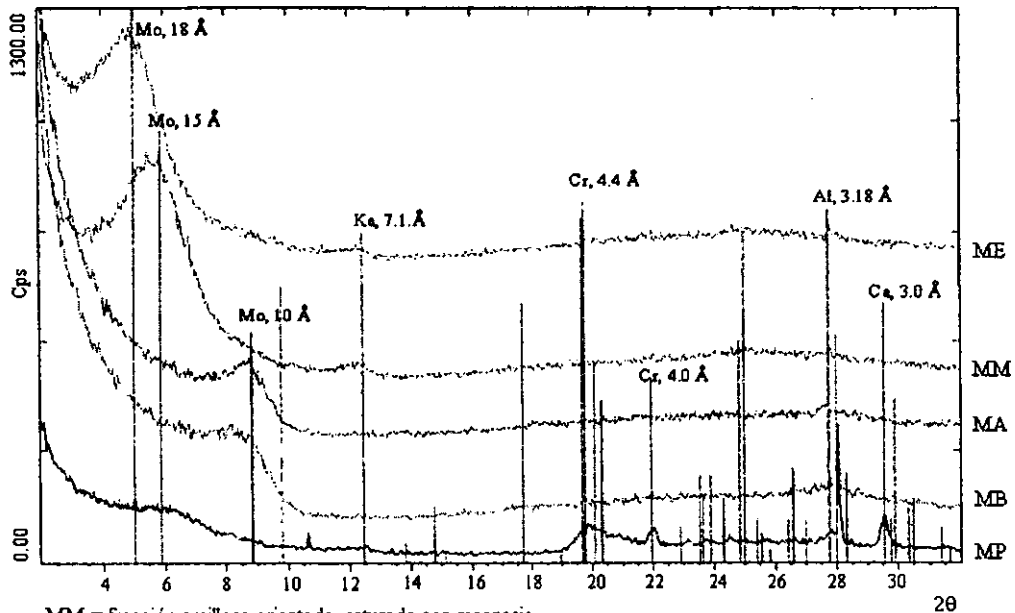
MM = fracción arcillosa orientada, saturada con magnesio.
 ME = fracción arcillosa orientada, saturada con magnesio y etilenglicol
 MB = fracción arcillosa orientada, calcinada a 450°C
 MA = fracción arcillosa orientada, calcinada a 550°C
 MP = suelo completo, polvo desorientado

Figura 4.6.4. Difractogramas para la fracción arcillosa, prof. 0-3 cm. Mo = montmorillonita; Il = illita; Ka = caolinita; Al= albita; Ca= calcita; Cr= cristobalita.



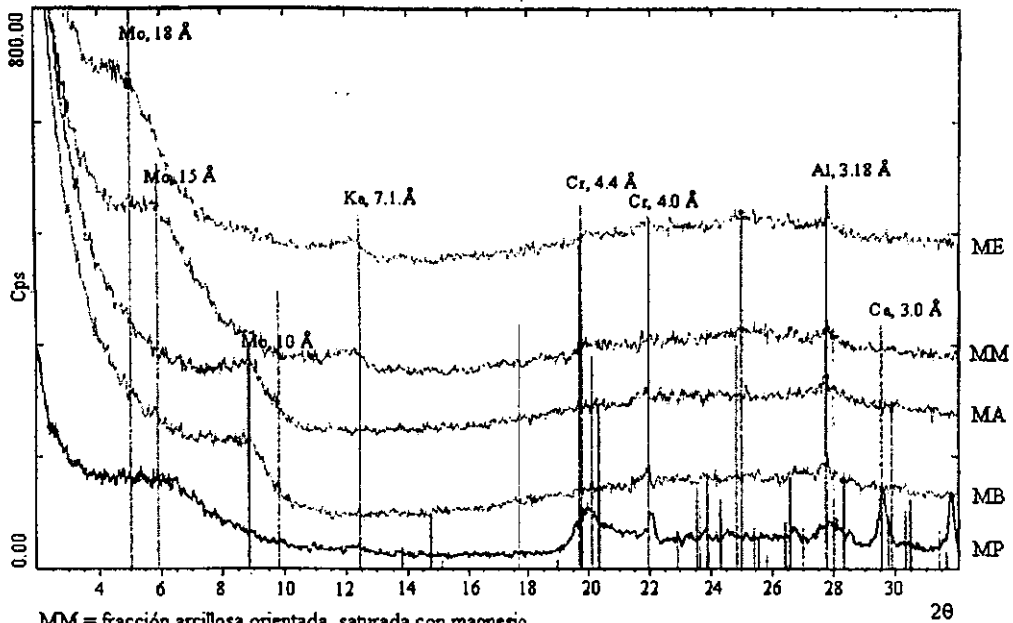
MM = fracción arcillosa orientada, saturada con magnesio.
 ME = fracción arcillosa orientada, saturada con magnesio y etilenglicol
 MB = fracción arcillosa orientada, calcinada a 450°C
 MA = fracción arcillosa orientada, calcinada a 550°C
 MP = suelo completo, polvo desorientado

Figura 4.6.5. Difractogramas para la fracción arcillosa, prof. 3-10 cm. Mo= montmorillonita; Ka = caolinita; Al= albita; Ca= calcita; Cr= cristobalita.



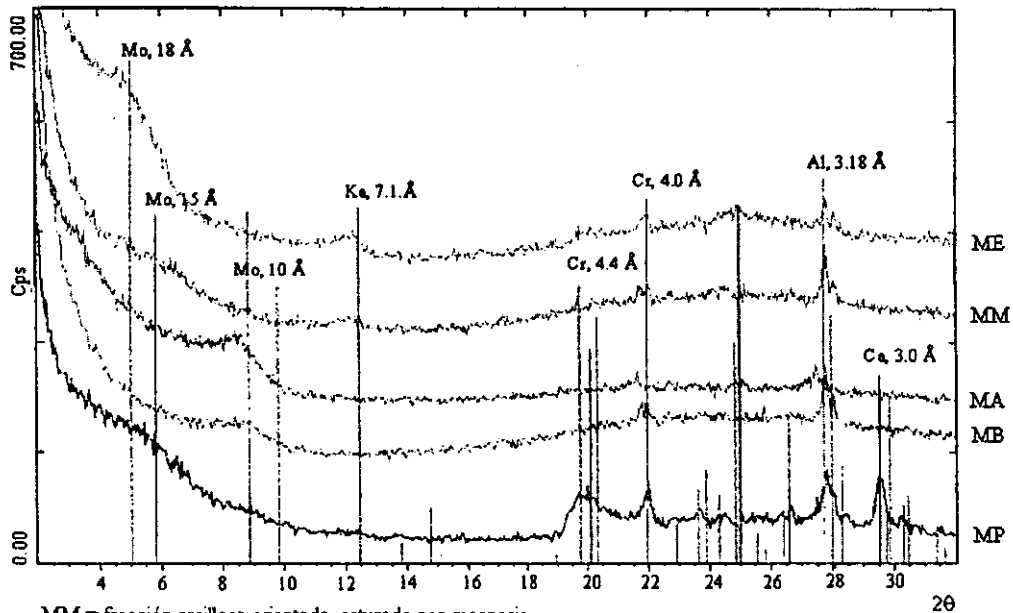
MM = fracción arcillosa orientada, saturada con magnesio.
 ME = fracción arcillosa orientada, saturada con magnesio y etilenglicol
 MB = fracción arcillosa orientada, calcinada a 450°C
 MA = fracción arcillosa orientada, calcinada a 550°C
 MP = suelo completo, polvo desorientado

Figura 4.6.6. Difractogramas para la fracción arcillosa, prof. 10-13 cm. Mo= montmorillonita; Ka = caolinita; Al= albita; Ca= calcita; Cr= cristobalita.



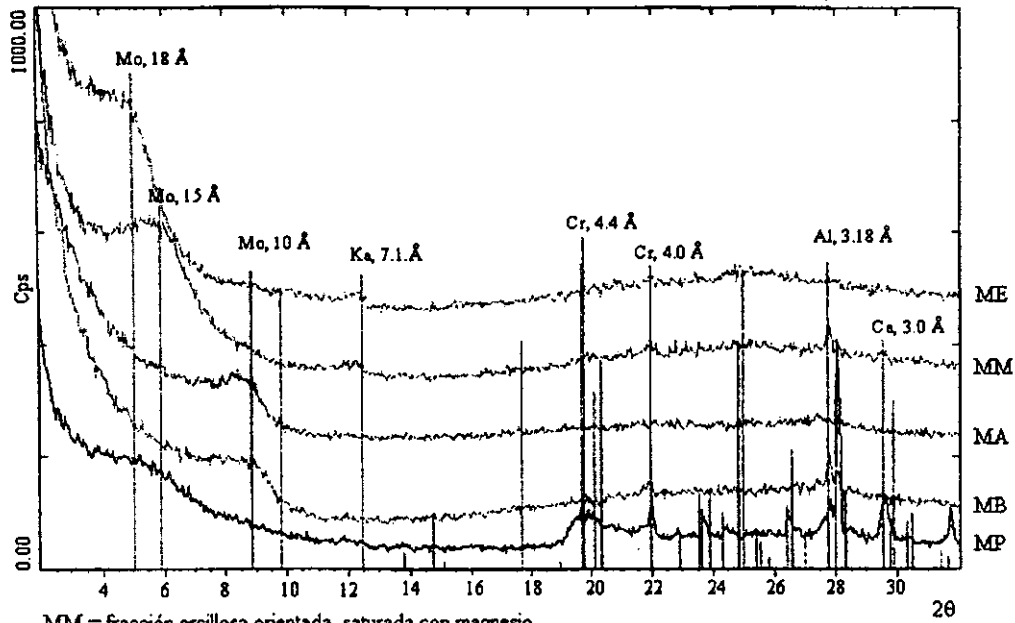
MM = fracción arcillosa orientada, saturada con magnesio.
 ME = fracción arcillosa orientada, saturada con magnesio y etilenglicol
 MB = fracción arcillosa orientada, calcinada a 450°C
 MA = fracción arcillosa orientada, calcinada a 550°C
 MP = suelo completo, polvo desorientado

Figura 4.6.7. Difractogramas para la fracción arcillosa, prof. 13-32 cm. Mo= montmorillonita; Ka = caolinita; Al= albita; Ca= calcita; Cr= cristobalita.



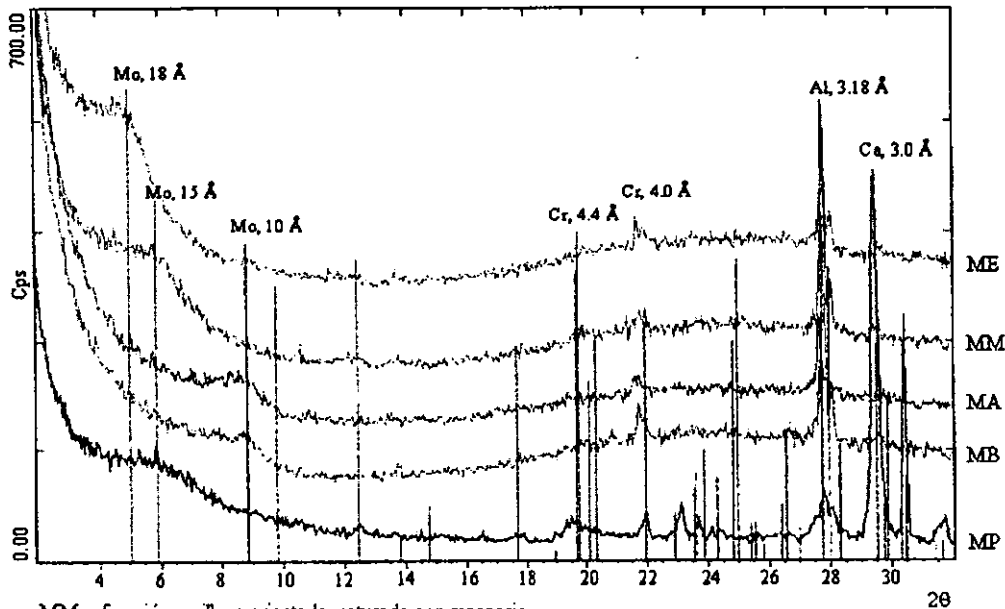
MM = fracción arcillosa orientada, saturada con magnesio.
 ME = fracción arcillosa orientada, saturada con magnesio y etilenglicol
 MB = fracción arcillosa orientada, calcinada a 450°C
 MA = fracción arcillosa orientada, calcinada a 550°C
 MP = suelo completo, polvo desorientado

Figura 4.6.8. Difractogramas para la fracción arcillosa, prof. 32-80 cm. Mo= montmorillonita; Ka = caolinita; Al= albita; Ca= calcita; Cr= cristobalita.



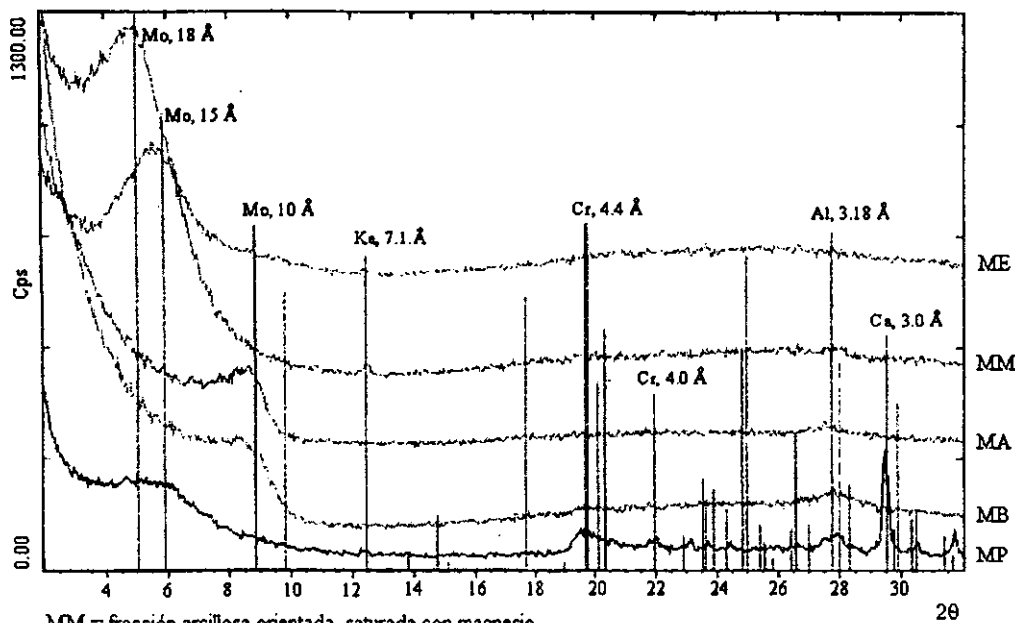
MM = fracción arcillosa orientada, saturada con magnesio.
 ME = fracción arcillosa orientada, saturada con magnesio y etilenglicol
 MB = fracción arcillosa orientada, calcinada a 450°C
 MA = fracción arcillosa orientada, calcinada a 550°C
 MP = suelo completo, polvo desorientado

Figura 4.6.9. Difractogramas para la fracción arcillosa, prof. 80-90 cm. Mo= montmorillonita; Ka = caolinita; Al= albita; Ca= calcita; Cr= cristobalita.



MM = fracción arcillosa orientada, saturada con magnesio.
 ME = fracción arcillosa orientada, saturada con magnesio y etilenglicol
 MB = fracción arcillosa orientada, calcinada a 450°C
 MA = fracción arcillosa orientada, calcinada a 550°C
 MP = suelo completo, polvo desorientado

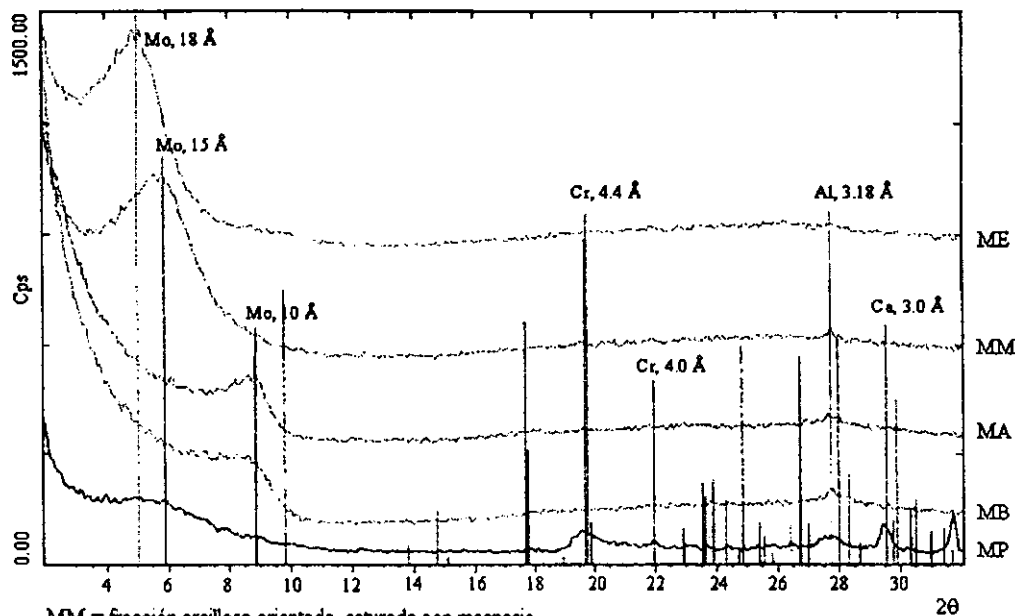
Figura 4.6.10. Difractogramas para la fracción arcillosa, prof. 90-92 cm. Mo= montmorillonita; Ka = caolinita; Al= albita; Ca= calcita; Cr= cristobalita.



MM = fracción arcillosa orientada, saturada con magnesio.
 ME = fracción arcillosa orientada, saturada con magnesio y etilenglicol
 MB = fracción arcillosa orientada, calcinada a 490°C
 MA = fracción arcillosa orientada, calcinada a 550°C
 MP = suelo completo, polvo desorientado

29

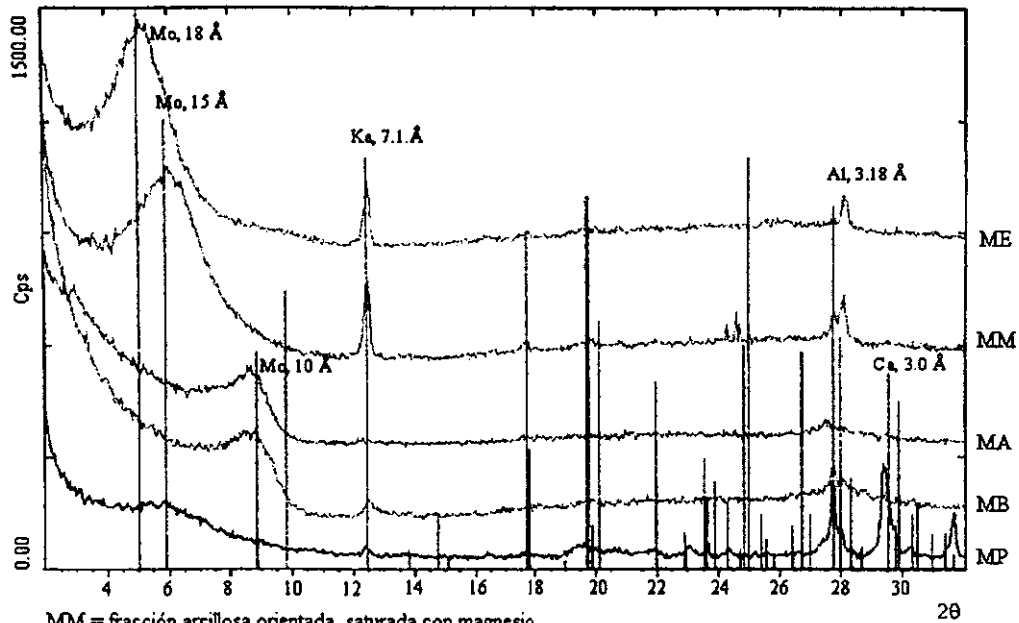
Figura 4.6.11. Difractogramas para la fracción arcillosa, prof. 92-102 cm. Mo= montmorillonita; Ka = caolinita; Al= albita; Ca= calcita; Cr= cristobalita.



MM = fracción arcillosa orientada, saturada con magnesio.
 ME = fracción arcillosa orientada, saturada con magnesio y etilenglicol
 MB = fracción arcillosa orientada, calcinada a 490°C
 MA = fracción arcillosa orientada, calcinada a 550°C
 MP = suelo completo, polvo desorientado

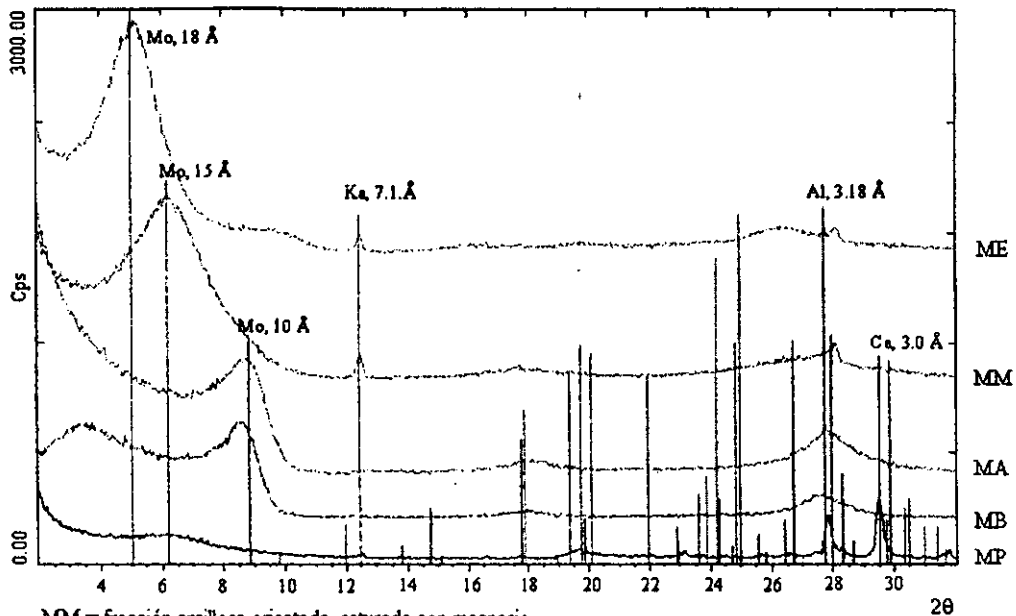
29

Figura 4.6.12. Difractogramas para la fracción arcillosa, prof. 102-135 cm. Mo= montmorillonita; Ka = caolinita; Al= albita; Ca= calcita; Cr= cristobalita.



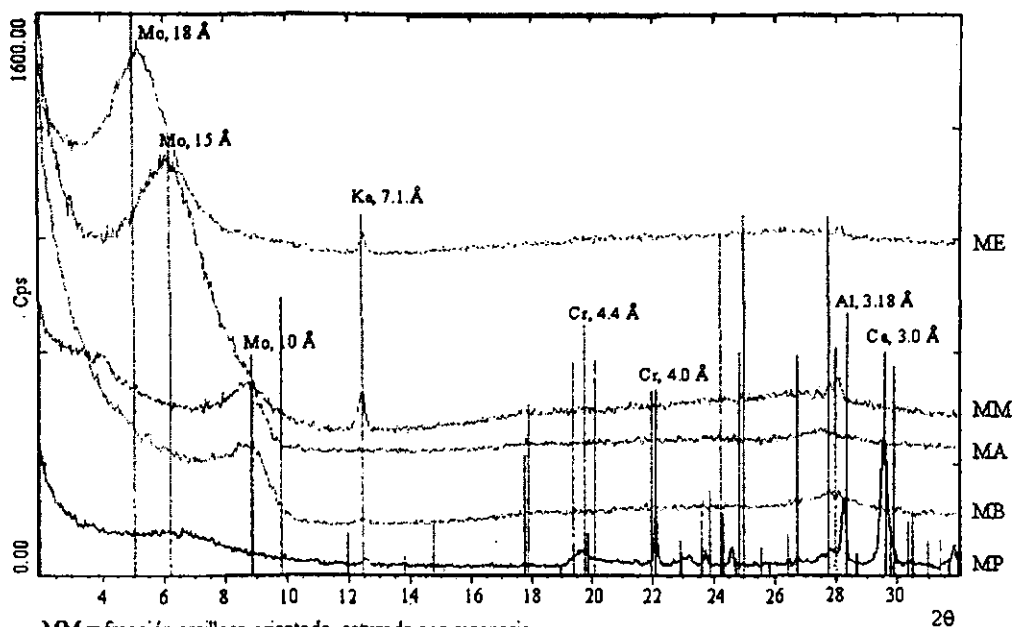
MM = fracción arcillosa orientada, saturada con magnesio.
 ME = fracción arcillosa orientada, saturada con magnesio y etilenglicol
 MB = fracción arcillosa orientada, calcinada a 450°C
 MA = fracción arcillosa orientada, calcinada a 550°C
 MP = suelo completo, polvo desorientado

Figura 4.6.13. Difractogramas para la fracción arcillosa, prof. 135-154 cm. Mo= montmorillonita; Ka = caolinita; Al= albita; Ca= calcita; Cr= cristobalita.



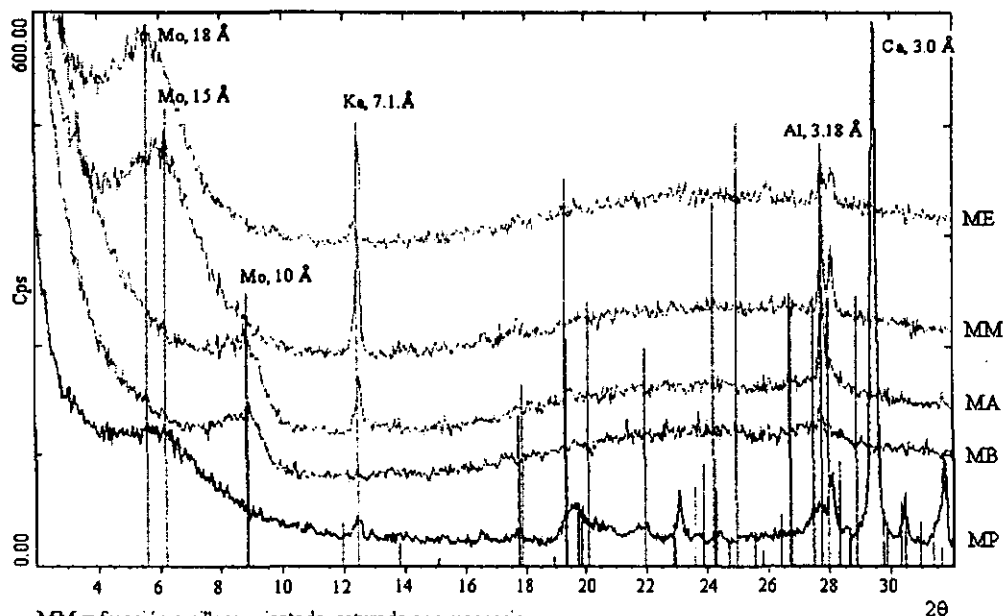
MM = fracción arcillosa orientada, saturada con magnesio.
 ME = fracción arcillosa orientada, saturada con magnesio y etilenglicol
 MB = fracción arcillosa orientada, calcinada a 450°C
 MA = fracción arcillosa orientada, calcinada a 550°C
 MP = suelo completo, polvo desorientado

Figura 4.6.14. Difractogramas para la fracción arcillosa, prof. 154-159 cm. Mo= montmorillonita; Ka = caolinita; Al= albita; Ca= calcita; Cr= cristobalita.



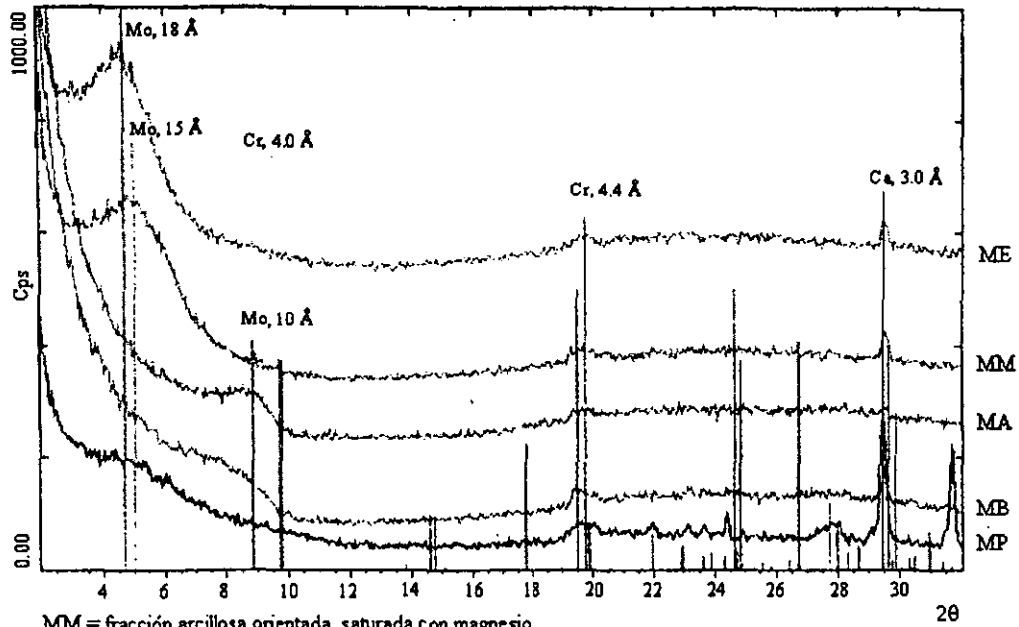
MM = fracción arcillosa orientada, saturada con magnesio.
 ME = fracción arcillosa orientada, saturada con magnesio y etilenglicol
 MB = fracción arcillosa orientada, calcinada a 450°C
 MA = fracción arcillosa orientada, calcinada a 550°C
 MP = suelo completo, polvo desorientado

Figura 4.6.15. Difractogramas para la fracción arcillosa, prof. 159-170 cm. Mo= montmorillonita; Ka = caolinita; Al= albita; Ca= calcita; Cr= cristobalita.



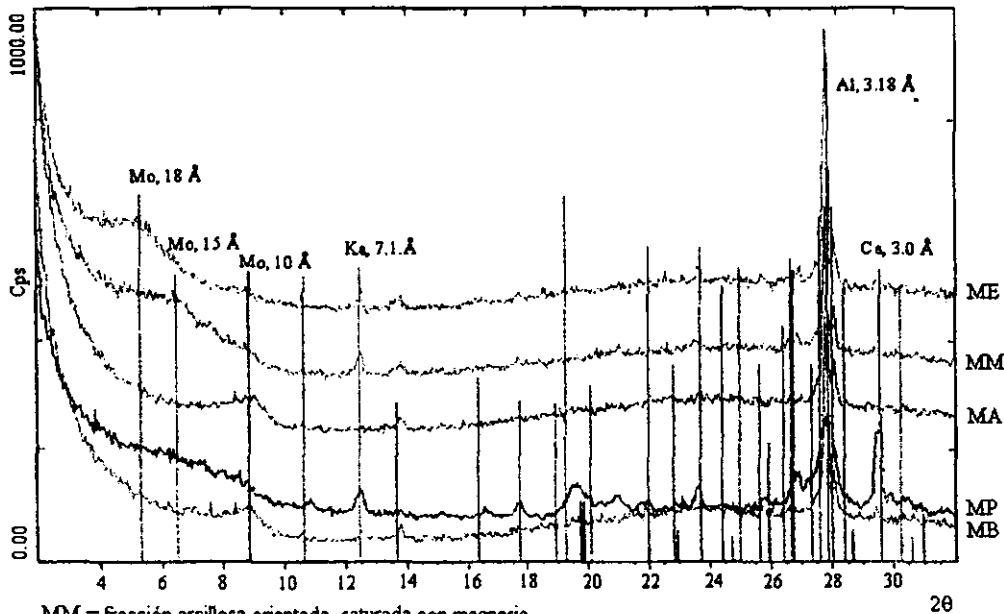
MM = fracción arcillosa orientada, saturada con magnesio.
 ME = fracción arcillosa orientada, saturada con magnesio y etilenglicol
 MB = fracción arcillosa orientada, calcinada a 450°C
 MA = fracción arcillosa orientada, calcinada a 550°C
 MP = suelo completo, polvo desorientado

Figura 4.6.16. Difractogramas para la fracción arcillosa, prof. 170-180 cm. Mo= montmorillonita; Ka = caolinita; Al= albita; Ca= calcita; Cr= cristobalita.



MM = fracción arcillosa orientada, saturada con magnesio.
 ME = fracción arcillosa orientada, saturada con magnesio y etilenglicol
 MB = fracción arcillosa orientada, calcinada a 450°C
 MA = fracción arcillosa orientada, calcinada a 550°C
 MP = suelo completo, polvo desorientado

Figura 4.6.17. Difractogramas para la fracción arcillosa, prof. 180-200 cm. Mo= montmorillonita; Ka = caolinita; Al= albita; Ca= calcita; Cr= cristobalita.



MM = fracción arcillosa orientada, saturada con magnesio.
 ME = fracción arcillosa orientada, saturada con magnesio y etilenglicol
 MB = fracción arcillosa orientada, calcinada a 450°C
 MA = fracción arcillosa orientada, calcinada a 550°C
 MP = suelo completo, polvo desorientado

Figura 4.6.18. Difractogramas para la fracción arcillosa, área bajo recuperación, prof. 0-30 cm. Mo= montmorillonita; Ka = caolinita; Al= albita; Ca= calcita; Cr= cristobalita.

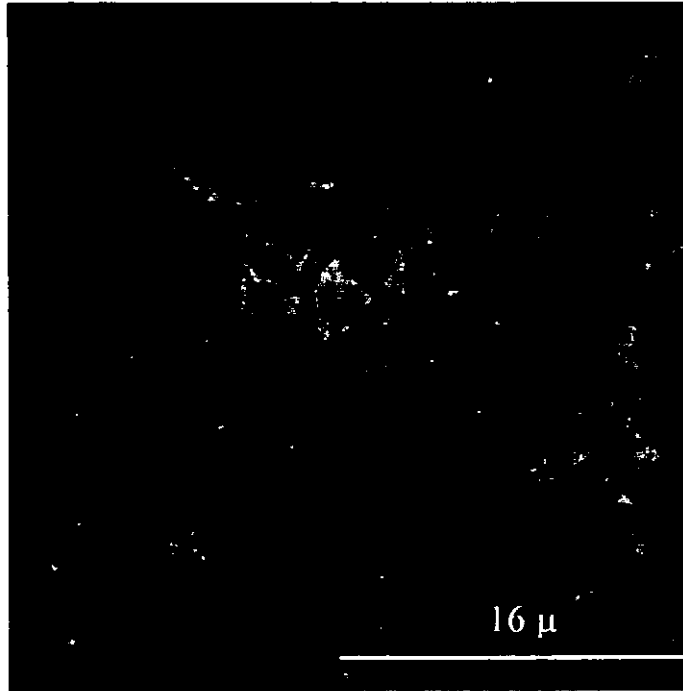


Figura 4.6.19. Agregados de arcilla (montmorillonita). Suelo del ex-lago de Texcoco.

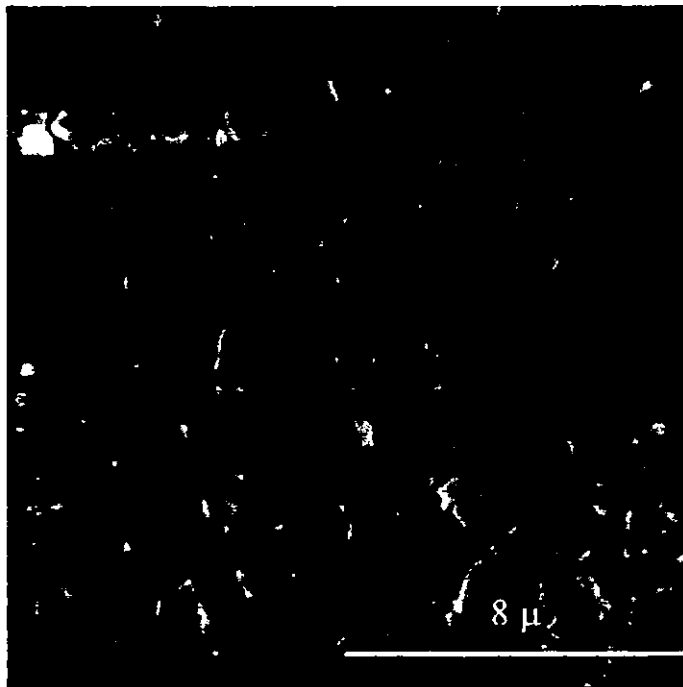


Figura 4.6.20. Partículas de arcilla separadas (montmorillonita). Suelo del ex-lago de Texcoco.

5. CONCLUSIONES

Características del suelo y variación mensual de la salinidad

1. El perfil estudiado corresponde a un suelo con vegetación altamente salino-sódico, con dominancia de cloruros, carbonatos y sulfatos de sodio, en ese orden, con textura arcillosa, y presencia de condiciones de anaerobiosis y reducción y un manto freático a 1.50 m de profundidad la mayor parte del año.
2. En el perfil, la conductividad eléctrica presenta los valores más altos tanto en la superficie como en la profundidad de 160-170 cm, con los valores más bajos en la profundidad de 40-50 cm. Este patrón también lo presentan en general las concentraciones de sodio, potasio, cloruros, carbonatos y sulfatos solubles, así como la RAS y el PSI, y el patrón del pH es algo semejante, aunque su rango es muy estrecho. El calcio, magnesio y bicarbonatos solubles no siguieron este patrón.
3. A lo largo del año, se dan cambios en la distribución de sales en el perfil que se comprueban a través de un incremento en la conductividad eléctrica y concentraciones de los iones más móviles en la capa superficial durante los meses de febrero a julio, y una disminución de tales valores durante los meses de agosto a enero. A mayores profundidades la variación a lo largo del año es menor.
4. El calcio y magnesio solubles se presentan en una concentración muy baja y con variaciones irregulares con la profundidad y a lo largo del año, pero contribuyendo a la presencia de valores sumamente elevados de la RAS y el PSI.

Análisis geoestadístico de la variabilidad espacial de la salinidad

5. Existe una amplia variabilidad en los niveles de salinidad y sodicidad de los suelos del área estudiada a la profundidad de 0-30 cm, que se atribuye a la presencia/ausencia de vegetación, que a su vez se asocia a agrietamientos, y su efecto sobre las propiedades del suelo.

separación 100 m

6. A la distancia de separación de 100 m entre sitios de muestreo, los modelos que se ajustaron mejor a los semivariogramas fueron el esférico y el linear, no mostrando anisotropía en ningún caso.

7. A esta distancia, para todas las variables el efecto nugget representa un alto porcentaje de la meseta, generando una baja dependencia espacial, en general menor de 50 %. Las únicas variables que presentaron mayor dependencia espacial, encima de 50 %, fueron el calcio y el magnesio, para el primer muestreo, y el PSI, para el segundo muestreo.
8. Para el primer muestreo, en la época seca, los semivariogramas de Na^+ , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} y RAS se ajustaron mejor al modelo esférico, presentando estas variables un rango menor a la distancia máxima de muestreo. En cambio, los semivariogramas de CE, pH, PSI, Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y CO_3^{2-} tuvieron un mejor ajuste al modelo lineal, y el rango resulta ser mayor que la mayor distancia; los modelos pueden corresponder a una transición hacia la meseta. Los menores rangos corresponden a distancias de entre 360 y 410 m.
9. Para el segundo muestreo, en la época húmeda, aumenta la variabilidad en la mayoría de los parámetros estudiados. Los semivariogramas son similares, con excepción de Ca^{2+} , K^+ y CO_3^{2-} , que ahora se ajustan mejor al modelo esférico.
10. En las áreas con vegetación se observa una disminución en la salinidad de la capa 0-30 cm durante la época húmeda, mientras que en las áreas sin vegetación la salinidad no disminuye e incluso aumenta. Esto provoca una disminución de la continuidad y pendientes más pronunciadas en los semivariogramas. de algunas de las variables como CE y pH..
11. Los mapas generados mediante kriging muestran áreas de distintos grados de salinidad y sodicidad, con una tendencia a disminuir estos valores hacia la parte sur, donde también se da un incremento en los contenidos de Ca^{2+} y Mg^{2+} , aparentemente por la influencia de un dren. Estos mapas presentan desviaciones estándar de bajas a medias, en éste último caso debidas a los altos coeficientes de variación de algunos de los parámetros estudiados.
12. Los cambios que se observan entre los dos periodos de muestreo señalan una alta variabilidad espacial y temporal en la distribución de la salinidad.

separación 10 m

13. A la distancia de separación de 10 m entre sitios de muestreo, los semivariogramas de CE, Na^+ , RAS, PSI y Cl^- se ajustaron mejor al modelo esférico; los de pH, K^+ , Ca^{2+} , HCO_3^- , CO_3^{2-} y SO_4^{2-} se ajustaron mejor al modelo exponencial y el de Mg^{2+} se ajustó

mejor al modelo lineal. La dependencia espacial aumentó considerablemente, sólo Ca^{2+} , Mg^{2+} y pH presentando valores menores de 50 %, el pH con dependencia espacial prácticamente de 0.

14. A excepción del pH y Ca^{2+} , los rangos fueron menores que la distancia máxima de muestreo, con valores de entre 25 y 48 metros, los cuales representan las distancias mínimas de muestreo a las cuales los valores de las variables ya no están correlacionados. Los porcentajes del efecto nugget con respecto a la meseta fueron bajos, lo que lleva a preferir a los rangos señalados aquí con respecto a los obtenidos al usar distancias de 100 m de separación entre sitios de muestreo.
15. La alta variabilidad para los parámetros evaluados se mantiene aún a la distancia de 10 m de separación, lo que muestra una alta variación espacial de la salinidad, con cambios muy abruptos aun a distancias muy cortas.
16. El uso de la geoestadística constituye una herramienta útil para conocer los patrones de distribución de la salinidad y poder elaborar mapas de distintos grados de precisión, para separar áreas con distintos grados de afectación y planear estrategias de mejoramiento de las mismas.

Producción de biomasa y acumulación de sodio y potasio de halófitas

17. En la época de crecimiento activo de las plantas, la salinidad del suelo se mantiene en niveles muy bajos, sobre todo si se considera que las especies presentes se consideran como halófitas.
18. De las tres especies presentes en el área de estudio, *Suaeda torreyana* es la que posee la mayor tolerancia a la salinidad, siendo una especie acumuladora de sales, seguida por *Sporobolus pyramidatus* y la menos tolerante a la salinidad es *Distichlis spicata*; estas dos últimas especies se comportan como no acumuladoras de sales.
19. No se observó correlación entre la producción de biomasa por especie y el grado de salinidad y sodicidad del suelo, lo que se atribuye a los bajos niveles de sales y sodio intercambiable presentes durante la época de crecimiento, por debajo de los niveles máximos de tolerancia de las especies; sin embargo, sí se observa correlación entre la producción global de biomasa (suma de las tres especies) y la salinidad y sodicidad.

20. Los contenidos de ceniza, Na* y relación Na/K para *Suaeda torreyana* mostraron relación directa con varios parámetros de salinidad del suelo, lo que se explica considerando el carácter acumulador de sales de esta especie; no se observaron este tipo de relaciones con las otras dos especies.

Mejoramiento del suelo

21. La aplicación de los tratamientos de mejoramiento al suelo produjo una disminución temporal de su salinidad y sodicidad. El lavado disminuyó la conductividad eléctrica a un nivel mayor que el planeado, mientras que las aplicaciones de mejorador disminuyeron el PSI aunque sin alcanzar el nivel deseado. Sin embargo, cuatro meses después de finalizado el proceso de mejoramiento, el PSI casi había regresado a su valor inicial.
22. El efecto de los mejoradores consistió básicamente en disminuir el pH e incrementar la concentración de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ solubles, en comparación con el tratamiento en que sólo se aplicó agua de lavado. Sin embargo, prácticamente no se observó diferencia entre los dos tratamientos de mejoradores, por lo que para obtener estos resultados se recomienda hacer uso del tratamiento de dosis menor, que es menos costoso.

Establecimiento de halófitas

23. De las especies introducidas, las que se establecieron fueron: *Sporobolus pyramidatus*, *Distichlis spicata*, *Suaeda torreyana*, *Kochia scoparia*, *Tamarix chinensis* y *T. aphylla*.
24. Se observó una relación positiva entre el establecimiento de las especies y los tratamientos que incluyeron aplicación de mejorador, con *Suaeda torreyana*, *Tamarix chinensis* y *Distichlis spicata* siendo las especies que presentaron efectos significativos debidos a estos tratamientos.
25. Es posible lograr el establecimiento de especies en sitios carentes de vegetación a través del mejoramiento limitado propuesto, el cual es esencial para lograr dicho establecimiento.

Análisis de difracción de rayos X y microscopía electrónica

26. Los análisis de rayos X de suelo íntegro muestran la presencia de minerales de sodio en los suelos del área, con dominancia de halita y el feldespato albita. También se muestra la presencia abundante de cristobalita y de calcita, lo que permite el uso de mejoradores de tipo ácido en estos suelos.
27. Los análisis de rayos X de la fracción arcillosa del perfil estudiado muestran una clara dominancia de montmorillonita a lo largo de todo el perfil, la cual constituye el llamado “jaboncillo”. También es notable la presencia de caolinita en algunas capas del perfil. La albita también se manifiesta en esta fracción.
28. El uso de microscopía electrónica permitió confirmar visualmente la presencia de montmorillonita.

LITERATURA CITADA

- Abdel, M.G. y T.M. Mounir. 1964. Electric Conductivity of the saturation extract as an index of soil salinity. Proc. 8th Intern. Congress of Soil Science, Bucharest.
- Aceves, E. 1979. El ensalitramiento de los suelos bajo riego. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- Aceves, L. 1981. Los terrenos ensalitrados y los métodos para su recuperación. UACH. Chapingo, México.
- Alarcon, J.J., M.J. Sanchez-Blanco, M.C. Bolarin y A. Torrecillas. 1994. Growth and osmotic adjustment of two tomato cultivars during and after saline stress. *Plant and Soil* 166: 75-82.
- Alcántara, I. 1986. La labranza, una opción en la recuperación de suelos ensalitrados: revisión. Tesis profesional. UACH, Chapingo, México.
- Anguiano, J. 1984. Evaluación de la metodología de diluciones sucesivas de aguas freáticas y aguas negras en los suelos salino sódicos del ex-lago de Texcoco, Tesis Profesional. UACH, Chapingo, Méx.
- Barragán, M.M. 1913. Proyecto de bonificación de las tierras del vaso del lago de Texcoco. Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas. México.
- Barret-Lennard, E.G., C.V. Malcolm, W.R. Stern y S.M. Wilkins. 1986. Forage and fuel production from salt affected wasteland. *Reclamation and Revegetation Research*, V. 5.
- Basilevich, N.I. 1970. The geochemistry of soda soils. Israel program for Scientific Translations. Jerusalem.
- Becerra, A. 1983. Uso del azufre para recuperar suelos salino-sódicos del ex-lago de Texcoco. Tesis Profesional. UACH, Chapingo, Méx.
- Besoain, E. 1985. Mineralogía de arcillas de suelos: IICA, San José.
- Bernstein, L. 1964. Salt tolerance of plants. *USDA Agr. Inf. Bull.* 283.
- Bernstein, L. y H.E. Hayward. 1958. Physiology of salt tolerance. *Ann. Rev. Pl. Physiol.* 9: 25-46.
- Bresler, E., B.L. McNeal y D.L. Carter. 1982. Saline and sodic soils. Springer-Verlag, Berlin.
- Borchardt, G. 1989. Smectites. En: Soil Science Society of America (ed.), *Minerals in soil environments*. Madison.
- Bourgault, G., A.G. Journel, J.D. Rhoades, D.L. Corwin y S.M. Lesch. 1997. Geostatistical analysis of a soil salinity data set. *Adv. Agron.* 58:241-292.
- Burgess, T.M. y R. Webster. 1980a. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semivariogram and punctual kriging. *J. Soil Sci.* 31: 315-331.
- Burgess, T.M. y R. Webster. 1980b. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties.

- II. Block kriging. *J. Soil Sci.* 31: 333-341.
- Burgess, T.M. y R. Webster. 1980c. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties.
- III. Changing drift and universal kriging. *J. Soil Sci.* 31: 505-524.
- Burgess, T.M. y R. Webster. 1981. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties.
- IV. Sampling strategy. *J. Soil Sci.* 31: 643-659.
- Cabrera, P. 1988. Respuesta de *Distichlis spicata* (L.) Greene var. *mexicana* Beetle, "zacate salado", al fuego en el ex-lago de Texcoco. Tesis profesional. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán.
- Caraveo, F.J. 1984. Efectos de la aplicación de ácido sulfúrico en diferentes concentraciones sobre los procesos de mejoramiento de un suelo salino-sódico del predio Montecillos. Tesis profesional. UACH, Chapingo, Méx.
- Campbell, L.C. y M.G. Pitman. 1971. Salinity and plant cells. En: T. Talsma y J.R. Philip, Salinity and water use. Macmillan, London.
- Chien, Y.J., D.Y. Lee, H.Y. Guo y K.H.Houng. 1997. Geostatistical analysis of soil properties of mid-west Taiwan soils. *Soil Science* 162(4): 291-298.
- Comisión del Lago de Texcoco. 1982. Origen, caracterización y situación actual del ex -lago de Texcoco. SARH.
- Contreras, G. 1983. Rompimiento de latencia y determinación de la tolerancia a salinidad durante la fase de germinación en pasto salado (*Distichlis spicata* (L) Greene). Tesis profesional. UACH, Chapingo, México.
- Crawford, R.M.M. 1989. Studies in plant survival. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Croughan, T.P. y D.W. Rains. 1988. Terrestrial halophytes: habitats, productivity, and uses. En: CRC Handbook of biosolar resources. CRC Press, Boca Raton.
- Dagar, J.C., N.T. Singh y A.D. Mongia. 1993. Characteristics of mangrove soils and vegetation of Bay Islands in India. En: Lieth, H. y A. Al Masoom (eds.), Towards the rational use of high salinity tolerant plants, V.I. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- David, M. 1975. Geostatistical ore reserve estimation. Elsevier, Amsterdam.
- Delfiner, P. 1979. Basic introduction to geostatistics. Battelle Seattle Research Center. Seattle.
- Delgado, R. 1985. Estudio de suelo-vegetación halófito en la cuenca endorreica Zocoalco de Torres - Sayula. *Terra* 3: 45-47.
- De La Peña, I. 1982. Salinidad de los suelos agrícolas. Boletín Técnico 10. SARH, México.
- Del Valle, H.F. 1983. Los procesos de acumulación de sales e intemperismo en cubetas lacustres, en una zona de transición del ex-lago de Texcoco. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de

- Postgraduados. Chapingo, México.
- Díaz, J.N. 1982. Oxidación del azufre elemental en suelos del ex-lago de Texcoco que presentan exceso de sodio intercambiable. Tesis Profesional. UACH, Chapingo, Méx.
- Doering, E.J. y R.C. Reeve. 1965. Engineering aspects of the reclamation of sodic soils with high-salt waters. *J. Irrigation and Drainage Division, ASCE* 91: 59-72.
- Elgabali, M. M. 1971. Reclamation and management of salt affected soils. En: FAO (ed.), *Salinity seminar Baghdad*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 7. Rome.
- Elsam, O.E. y E. Epstein. 1969. Salt relations of two grass species differing in salt tolerance. *Agrochimica* 8: 187-195.
- Evans, M. 1978. Factores limitantes para la colonización vegetal del lecho del ex-lago de Texcoco, México. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- FAO/UNESCO. 1973. *Irrigation, Drainage and Salinity*. FAO, Rome.
- Fahn, A. 1979. *Secretory tissues in plants*. Academic Press, London.
- Flores, E.A., E.A. Morales y F.A. Llerena. 1994. Utilización de minivaretas para la propagación intensiva de *Tamarix* spp. en el ex-lago de Texcoco. Memoria de la III Reunión Nacional de Halófitas y Manejo de Aguas y Suelos Salinos. SARH. Montecillos, México.
- Flowers, T.J. 1985. Physiology of halophytes. *Pl. Soil.* 89: 41-56.
- Flowers, T.J., P.F. Troke y A.R. Yeo. 1977. The mechanisms of salt tolerance in halophytes. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 28:89-121.
- Gale, J. 1975. Water balance and gas exchange of plants under saline conditions. En: A. Poljakoff-Mayber y J. Gale (eds.) *Plants in saline environments*. Springer-Verlag, New York.
- Galicia, M.S. 1990. Efecto de un mejorador mineral en suelos de chinampa de Tláhuac, D.F. cultivando *Brassica oleracea*. Tesis de Maestría en Ciencias. Facultad de Ciencias, UNAM. México.
- Gandhi, A.P. y K.V. Paliwal. 1976. Mineralization and gaseous losses of nitrogen from ureaa and ammonium sulphate in salt-affected soils. *Pl. Soil* 45: 247-255.
- García, E. Y P. Montanez. 1992. Saline grassland near Mexico City. En: S.P. Long, M.B. Jones y M.J. Roberts (eds.) *Primary productivity of grass ecosystems of the tropics and sub-tropics*. Chapman and Hall, London.
- Garzón, C.E. 1986. Estudios para la adaptación de especies forestales en el área del ex-lago de Texcoco. Tesis Profesional. UACH. Chapingo, México.
- Gee, G.W. y J.W. Bauder. 1986. Particle-size analysis. En: ASA-SSSA (ed.) *Methods of soil analysys, Part I. Physical and mineralogical methods*. Agronomy Monograph 9 (2nd edition).

- Ghassemi, F., A.J. Jakeman y H.A. Nix. 1995. Salinisation of land and water resources. CAB International, Canberra.
- González, R.C. 1982. Establecimiento de relaciones funcionales entre láminas de lavado, sales desplazadas y sales residuales en los suelos salinos. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Chapingo.
- González, A. 1997. Problemas de salinización en el acuífero litoral del occidente de Huelva. Universidad de Huelva. Huelva, España.
- González, O. Y D.R. Zak. 1994. Geostatistical analysis of soil properties in a secondary tropical dry forest, St. Lucia, West Indies. *Plant and Soil* 163: 45-54.
- Gorham, 1996. Mechanisms of salt tolerance of halophytes. En: R. Choukr-Allah, C.V. Malcolm y A. Hamdy (eds.) *Halophytes and biosaline agriculture*. Marcel Dekker, Inc., New York.
- Grattan, S.R. y C.M. Grieve. 1994. Mineral nutrient acquisition and response by plants grown in saline environments. En: M. Pessarakli (ed.), *Handbook of plant and crop stress*. Marcel Dekker, Inc., New York.
- Greenway, H. y R. Munns. 1980. Mechanisms of salt tolerance in non-halophytes. *Annu. Rev. Pl. Physiol.* 31:149-190.
- Gurria, J. 1978. El desagüe del Valle de México durante la época novohispana. UNAM, México.
- Hajrasuliha, S., N. Baniabbassi, J. Matthey y D.R. Nielsen. 1980. Spatial variability of soil sampling for salinity studies in southwest Iran. *Irrig. Sci.* 1: 197-208.
- Hansen, D.J., P. Dayanandan, P.B. Kaufman y J.D. Grotherson. 1976. Ecological adaptations of salt marsh grass, *Distichlis spicata* (gramineae) and environmental factors affecting its growth and distribution. *Am. J. Bot.* 63:635-650.
- Harborne, J.B., 1985. Introducción a la bioquímica ecológica. Alhambra, Madrid.
- Hassan-Porath, E. Y A. Poljakoff-Mayber. 1969. The effect of salinity on the malic dehydrogenase of pea roots. *Plant Physiol.* 44:103-104.
- Henrickson, J. 1978. Saline habitats and halophytic vegetation of the Chihuahuan Desert region. *Transactions of the symposium on the biological resources of the Chihuahuan desert regio*. Riskind & Wuauer. New York.
- Herrera, I., J. Alberro y J.L. León. 1972. Análisis de asentamiento y optimización del sistema de bombeo para la construcción de los lagos del proyecto Texcoco, Méx. SRH, México.
- Hilgard, E.W. 1930. *Soils*. The Macmillan Co. New York.
- Ho, T.H.D. y M.M. Sachs. 1989. Stress-induced proteins: characterization and the regulation of their synthesis. En: Marcus, A. (ed.), *The biochemistry of plants*, V. 15. Academic Press, Inc., San

Diego.

- Hollaender, A. (ed.). 1979. The biosaline concept. Plenum Press, New York.
- Huez, M.A., M. Ortega, C. Ramírez y J.L. Rone. 1989. Caracterización de algunas propiedades fisicoquímicas de los suelos y espesores subyacentes del predio Montecillo. *Agrociencia* 78: 231-247.
- Hurkman, W.J. 1992. Effect of salt stress on plant gene expression: a review. *Plant and Soil* 146: 145-151.
- Jacoby, B. 1994. Mechanisms involved in salt tolerance by plants. En: M. Pessarakli (ed.), *Handbook of plant and crop stress*. Marcel Dekker, Inc., New York.
- Jaime, J.R. 1985. Estudio sobre recuperación de suelos salino-sódicos mediante el uso de azufre y cloruro de calcio. Tesis Profesional. UACH, Chapingo, Méx.
- Jarvinen, E., J.T., J.Hokkanen y T. Kuuluvainen. 1993. Spatial heterogeneity and relationships of mineral soil properties in a boreal *Pinus sylvestris* stand. *Scand. J. For. Res.* 8: 435-445.
- Jefferies, R.L. 1980. The role of organic solutes in osmoregulation in halophytic higher plants. En: Rains, D.W., R.C. Valentine y A. Hollaender (eds.), *Genetic engineering of osmoregulation*, Plenum Press, New York.
- Jefferies, R.L. 1981. Osmotic adjustment and the response of halophytic plants to salinity. *Bioscience* 31: 42-46.
- Jefferies, R.L., A.J. Davy y T. Rudmik, 1979. The growth strategies of coastal halophytes. En: Jefferies, R.L. y A.J. Davy (eds.), *Ecological processes in coastal environments*. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Jeffrey, D.W. 1987. *Soil-plant relationships: an ecological approach*. Timber Press, Portland.
- Jeschke, W.D. 1984. K^+ - Na^+ exchange at celular membranes, intracellular compartmentation of cations, and salt tolerance. En: R.C. Staples y G.H. Toenniessen (eds.), *Salinity tolerance in plants*. John Wiley & Sons, New York.
- Jiménez, G.A., L. Flores y I.M. Sommer. 1995. Suelos de marismas de la costa tropical del Pacífico Mexicano y su relación con la vegetación. En: N.E. García y R.M. Ramírez (eds.), *Simposio Universitario de Edafología*. Facultad de Ciencias, UNAM. México.
- Joffe, J.S. 1949. *Pedology*. Pedology Publications, New Jersey.
- Juárez, C.M. 1967. Prácticas de lavado de suelos salino-sódicos del ex-lago de Texcoco. Tesis Profesional. ENA, Chapingo, Méx.
- Kafkafi, U. 1987. Plant nutrition under saline conditions. *Fertil. Agric.* 95: 3-17.
- Koshevnikov, K.Y. 1974. Factors responsible for sodium-carbonate formation in soils and parent

- materials. *Soviet Soil Sci.* 6 (2): 180-189.
- Knudsen, H.P y Y.C. Kim. 1977. A short course on geostatistical ore reserve estimation. University of Arizona. Tucson.
- Kylin, A. y R.S. Quatrano. 1975. Metabolic and biochemical aspects of salt tolerance. En: Poljakoff-Mayber, A. y J. Gale (eds.), *Plants in saline environments*. Springer-Verlag, Berlin.
- Laura, 1979. Salinity and nitrogen mineralization in soil. *Soil Biol. Biochem.* 9: 333-336.
- Legendre, P. y M.J. Fortin. 1989. Spatial pattern and ecological analysis. *Vegetatio* 80: 107-138.
- Lemoine, E. 1978. El desagüe del valle de México durante la época independiente. UNAM, México.
- Le Rudulier, D. 1993. Elucidation of the role of osmoprotective compounds and osmoregulatory genes: the key role of bacteria. En: Lieth, H. y A. Al Masoom (eds.), *Towards the rational use of high salinity tolerant plants*, V.I. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Levitt, J. 1980. Responses of plants to environmental stress. 2nd ed. V. I y II. Academic Press, New York.
- Levy, G.J. 1989. Soil stabilizers. En: M. Agassi (ed.) *Soil erosion, conservation and rehabilitation*. Marcel Dekker, Inc. New York.
- Lindsay, W. 1979. *Chemical equilibria in soils*. John Wiley & Sons, New York.
- Llerena, F.A. 1992. Massive propagation of halophytes (*Distichlis spicata* and *Tamarix* spp.) on the high saline-alkaline soils in the ex-lake of Texcoco, Mexico. Proceedings of the International workshop on halophytes for reclamation of saline wastelands and as a resource for livestock. UNEP-ONU. Nairobi, Kenya.
- Llerena, F.A. 1995. Reclamation of highly saline-alkaline soils in the ex-lake of Texcoco, Mexico. En: J. Batlle-Sales (ed.), *International symposium on salt affected lagoon ecosystems ISSALE-95*. universidad de Valencia. Valencia, España.
- López, J.G. 1988. El proceso de lavado de un suelo salino sulfático clorhídrico del área de influencia del ingenio azucarero de Calipan, Estado de Puebla. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Montecillos.
- Lugo, J.A. 1984. Suelos sódicos salinos del ejido Xochimilco. Tesis Profesional. Facultad de Ciencias, UNAM. México.
- Malcolm, C.V. 1986. Production from salt affected soils. *Reclam. Reveg. Res.* 5: 343-361.
- Marschner, H. 1986. *Mineral nutrition of higher plants*. Academic Press, London.
- Maas, E.V. 1986. Salt tolerance of plants. *App. Agr. Res.* 1 (1): 12-26.
- Maas, E.V. y R.H. Nieman, 1978. Physiology of plant tolerance to salinity. En: ASA (ed.), *Crop tolerance to suboptimal land conditions*. American Society of Agronomy, Madison.

- Marschner, H. 1986. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, London.
- Massoud, F.I. 1971. A note on the need for accepted definitions and methods of characterization of salt-affected soils. IRYDA: información. Salt affected soils subcommission meeting, Sevilla.
- Mattioni, C., N.G. Lacerenza, A. Trocoli, A.M. De Leonardis y N. Di Fonzo. 1997. Water and salt stress-induced alterations in proline metabolism of *Triticum durum* seedlings. *Physiol. Plant.* 101: 787-792.
- McKersie, B.D. y Y.Y. Leshem. 1994. Stress and stress coping in cultivated plants. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht.
- Millot, G. 1970. Geology of clays. Springer-Verlag, New York.
- Mízquez, V.C.A. 1973. Estudio comparativo sobre la eficiencia de tres mejoradores químicos en la recuperación de un suelo salino-sódico. Tesis Profesional. ITESM, Monterrey, N.L.
- Montaño, S., M. Ortega, C. Ramírez y J.L. Rone. 1985. Estudio de tres yesos agrícolas y el yeso puro bajo dos formas de aplicación en el mejoramiento de la capa arable de un suelo sódico. *Agrociencia* 59: 169-186.
- Mudie, P.J. 1974. The potential economic uses of halophytes. En: R.J. Reimold y W.H. Queen (eds.), *Ecology of halophytes*. Academic Press, New York.
- National Research Council. 1990. Saline Agriculture. National Academic Press, Washington.
- Odum, E.P. 1974. Halophytes, energetics and ecosystems. En: R.J. Reimold y W.H. Queen (eds.), *Ecology of halophytes*. Academic Press, New York.
- Orduña, M.A., C.Zárraga, R. Flores y C. Torres. 1994. Micropropagación de una especie arbórea para suelos salinos (*Tamarix* sp.). FIRA boletín Informativo No. 257.
- Ortega, M. 1976. Cambios físico-químicos de suelos del vaso del ex-lago de Texcoco, sujetos a lavado con diferentes diluciones. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Chapingo, Méx.
- Ortega, M. 1993. Causas del ensalitramiento y su efecto sobre los suelos. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Ortiz, M. 1980. Aridisoles de Illescas, S.L.P. y sus relaciones con *Phaseolus vulgaris*. Tesis Profesional, Facultad de Ciencias, UNAM. México.
- Ortiz, M. 1988a. Factores edáficos asociados al desarrollo de poblaciones naturales de *Distichlis spicata* (L.) Greene. Memorias de la Segunda Reunión Nacional sobre Halófitas. SARH. Cd. Obregón, Sonora, México.
- Ortiz, M. 1988b. Algunos aspectos edáficos del matorral de *Allenrolfea occidentalis* (S.Wats.) Ktze. en la región de Illescas, S.L.P. UACH Chapingo, México.
- Ortiz, M. 1988c. Factores edáficos asociados al desarrollo de *Salicornia europaea* en la costa de

- Nayarit. Memorias del XXI Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo, Cd. Juárez, México.
- Ortiz, M. 1991a, M. *Suaeda torreyana*, a halophyte for food production from Central Mexico. Proceedings of the International Conference on Agricultural Management in Salt-Affected Areas. ISESCO e Institut Agronomique et Veterinaire Hassan II. Agadir, Maroc.
- Ortiz, M. 1991b. Los tipos de sales de los suelos salinos y sódicos. UACH. Chapingo, México.
- Ortiz, M. 1994a. La vegetación halófila y los suelos de marismas en los Estados de Nayarit y Sinaloa. Memoria de la III Reunión Nacional de Halófitas y Manejo de Aguas y Suelos Salinos. SARH. Montecillos, México.
- Ortiz, M. 1994b. Distribución y características de la vegetación en las áreas ocupadas por suelos salinos en La Pesca, Tamaulipas. Memoria de la III Reunión Nacional de Halófitas y Manejo de Aguas y Suelos Salinos. SARH. Montecillos, México.
- Ortiz, M., V. Juárez y J. Cervantes. 1994. Características y posibilidades de uso ornamental de la vegetación halófila nativa en el área de Cancún, Quintana Roo. Memoria de la III Reunión Nacional de Halófitas y Manejo de Aguas y Suelos Salinos. SARH. Montecillos, México.
- Oster, J.D., I. Shainberg y I.P. Abrol. 1989. Reclamation of salt-affected soil. En: M. Agassi (ed.) Soil erosion, conservation and rehabilitation. Marcel Dekker, Inc. New York.
- Oviedo de León, A. 1970. El conglomerado Texcoco y el posible origen de la cuenca de México. Rev. Inst. Mex. Petról. 2(3): 5-20.
- Palacio-Prieto, J.L. y C. Siebe-Grabach. 1994. Variabilidad y distribución espaciales de algunos parámetros físicos y químicos del suelo en el distrito de riego 03, Estado de Hidalgo, México; parte 2, cartografía. Rev. Mex. C. Geól. 11(1): 68-78.
- Palacio-Prieto, J.L., C. Siebe-Grabach y A. Cortés-Anaya. 1994. Variabilidad y distribución espaciales de algunos parámetros físicos y químicos del suelo en el distrito de riego 03, Estado de Hidalgo, México; parte 1, semivariogramas. Rev. Mex. C. Geól. 11(1): 62-67.
- Palmer, M.W. 1988. Fractal geometry: a tool for describing spatial patterns of plant communities. Vegetatio 75: 91-102.
- Pedraza, A. 1988. Establecimiento y evaluación de barreras arboladas con *Tamarix* sp. en suelos salino-sódicos del ex-lago de Texcoco. Tesis Profesional. UACH. Chapingo, México.
- Pepioli, E. 1997. Cartografía de suelos sódico-salinos por métodos geoestadísticos. Tesis de licenciatura. Universitat de Valencia. Valencia, España.
- Petrusa, L.M. y I. Winicov. 1997. Proline status in salt-tolerant and salt-sensitive alfalfa cell lines and plants in response to NaCl. Plant Physiol. Biochem. 35: 303-310.
- Pizarro, F. 1978. Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos. Editorial Agrícola Española,

Madrid.

- Poljakoff-Mayber, A. 1975. Morphological and anatomical changes in plants as a response to salinity stress. En: Poljakoff-Mayber, A. y J. Gale (eds.), *Plants in saline environments*. Springer-Verlag, Berlin.
- Porcelli, C.A., F.H. Gutierrez y R.S. Lavado. 1995. The K/Na and Ca/Na ratios and rapeseed yield, under soil salinity or sodicity. *Pl. Soil* 175: 251-255.
- Rajpurohit, K.S. y D.N. Sen. 1979. Seasonal variation in chloride ion percentage of plants and soils of Pachpadra salt basin in Indian desert. *Ind. J. Bot.* 2: 17-23.
- Rajpurohit, K.S. y D.N. Sen. 1980. Osmotic potentials of plants and soils of Pachpadra salt basin in Thar desert. En: H.S. Mann, *Arid zone research and development*. Scientific Publications. Jodhpur, India.
- Ramírez, C. 1985. Comportamiento de la conductividad eléctrica y parámetros físicos y químicos en el "jaboncillo" de Montecillos. Reporte Técnico No.1. Centro de Hidrociencias, Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- Ramos, G. 1979. Factores que afectan la distribución de la vegetación halófila en los llanos de San Juan, Tlaxcala-Puebla, México. Tesis Profesional. Facultad de Ciencias, UNAM, México.
- Rankov, 1964. The salinization of the soil and the development of the nitrogen fixation microorganisms. *Agrochimica* 8: 331-342.
- Reeve, R.E. y C.A. Bower. 1960. Use of high-salt waters as a flocculant and source of divalent cations for reclaiming sodic soils. *Soil Sci.* 90: 130-144.
- Richards, L.A. (ed.) 1954. *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. USDA Agr. Handbook No. 60. Washington, D.C.
- Riehl, T.E. y I.A. Ungar. 1982. Growth and ion accumulation in *Salicornia europaea* under saline field conditions. *Oecologia* 54: 193-199.
- Rivera, J.M. 1975. Estudio de las propiedades mineralógicas y termodinámicas de los sedimentos superficiales del ex-lago de Texcoco". Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- Rossi, R.E., D.J. Mulla, A.G. Journel y E.H. Franz. 1992. Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence. *Ecol. Mon.* 6(2): 277-314.
- Ryel, R.J., M.M. Caldwell y J.H. Manwaring. 1996. Temporal dynamics of soil spatial heterogeneity in sagebrush-wheatgrass steppe during a growing season. *Plant and Soil* 184: 299-309.
- Rzedowski, J. 1957. Algunas asociaciones vegetales de los terrenos del Lago de Texcoco. *Bol. Soc. Bot. Méx.* 21: 19-33.

- Rzedowsky, J. 1978. Vegetación de México. Limusa, México.
- Samper, F.J. y J. Carrera. 1990. Geoestadística. Aplicaciones a la hidrología subterránea. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. Barcelona.
- Sandoval, A. 1993. Influencia del lavado y la aplicación de yeso en la distribución de sales en las capas inferiores de un suelo salino-sódico en un proceso de recuperación. Tesis Profesional. UACH. Chapingo, Méx.
- Santana, R., M. Ortega, C. Ramírez y J.L. Rone. 1989. Determinación experimental de la formación de soda mediante el camino biológico en espesores subyacentes de tres cuencas endorreicas: Cuitzeo, Texcoco y El Carmen. *Agrociencia* 78: 281-295.
- Santa-Cruz, A., M. Acosta, F. Pérez y M.C. Bolarin. 1997. Changes in free polyamine levels induced by salt stress in leaves of cultivated and wild tomato species. *Physiol. Plant.* 101: 341-346.
- Sejas, A.J. 1978. Comportamiento físico y químico de suelos ensalitrados sometidos a lavado con diluciones graduales. Tesis de Maestría, CP, Chapingo, Méx.
- Shainberg, I. 1975. Salinity of soils- effects of salinity on the physics and chemistry of soils. En : Poljakoff-Mayber, A. y J. Gale (eds.), *Plants in saline environments*. Springer-Verlag, Berlin.
- Sharma, M.L. 1982. Aspects of salinity and water relations of Australian chenopods. En: D.N. Sen y K.S. Rajpurohit (eds.), *Contributions to the ecology of halophytes*. Dr. W. Junk Publishers. The Hague.
- Sigmond, A.A.J. 1938. *The principles of soil science*. Thomas Murby and Co., London.
- Singh, N.K., A.K. Handa, P.M. Hasegawa y R.A. Bressan. 1985. Proteins associated with adaptation of cultured tobacco cells to NaCl. *Plant Physiol.* 79: 126-137.
- Solano, M.A., E. Carrillo y F.A. Llerena. 1994. Propagación de *Tamarix plumosa* por semilla en el ex-lago de Texcoco. Memoria de la III Reunión Nacional de Halófitas y Manejo de Aguas y Suelos Salinos. SARH. Montecillos, México.
- SRH. 1971. Estudio agrológico especial del ex-lago de Texcoco, Edo. de México. SRH, México.
- Stewart, G.R. e I. Ahmad. 1983. Adaptation to salinity in angiosperm halophytes. En: G.R. Stewart (ed.) *Metals and micronutrients: uptake and utilization by plants*. Academic Press, London.
- Stewart, G.R. y J.A. Lee. 1974. The role of proline accumulation in halophytes. *Planta* 120: 279.
- Stewart, G.R., F. Larher, I. Ahmad y J.A. Lee. 1979. Nitrogen metabolism and salt-tolerance in higher plant halophytes. En: Jefferies, R.L. y A.J. Davy (eds.), *Ecological processes in coastal environments*. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Storey, R. y R.G. Wyn Jones. 1979. Responses of *Atriplex spongiosa* and *Suaeda monoica* to salinity. *Plant Physiol.* 65: 156.

- Strogonov, B.P. 1964. Physiological basis of salt tolerance of plants. Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem.
- Sumner, M.E. 1993. Sodic soils: new perspectives. *Aust. J. Soil Res.* 31 (6): 683-750.
- Szabolcs, I. 1989. Salt-affected soils. CRC Press, Boca Raton.
- Tanji, K.K. (ed.) 1990. Agricultural salinity assessment and management. ASCE, New York.
- Teas, H.J. 1979. Silviculture with saline water. En: A. Hollaender (ed.), *The biosaline concept*. Plenum Press, New York.
- Thomas, J.C. y H.J. Bohnert. 1993. Salt stress perception and plant growth regulators in the halophyte *Mesembryanthemum crystallinum*. *Plant Physiol.* 103: 1299-1304.
- Thomson, W.W. The structure and function of salt glands. En: Poljakoff-Mayber, A. y J. Gale (eds.), *Plants in saline environments*. Springer-Verlag, Berlin.
- Tyurin, I.V., I.N. Antipov-Karataev y M.G. Chizhevskii (eds.) 1967. Reclamation of solonets soils in the USSR. Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem.
- Ureña, C.C.F. 1975. Estudio preliminar para la utilización de diversos mejoradores y láminas de lavado para la recuperación de los suelos salino-sódicos del ex-lago de Texcoco. Tesis Profesional. ENA, Chapingo, Méx.
- Utset, A. 1993. Aplicación de técnicas geoestadísticas a la caracterización de la variabilidad espacial de la conductividad eléctrica de los suelos. Tesis doctoral. Instituto Superior de Ciencias Agropecuarias de La Habana, Cuba.
- Valenzuela, M. 1991. Evaluación de la forma de aplicación de láminas de lavado en la recuperación de un suelo salino-sódico. Tesis Profesional. UACH, Chapingo, Méx.
- Van Genuchten, M.Th. 1983. Analyzing crop salt tolerance data: model description and user's manual. USDA research report No. 120. Riverside.
- Van Genuchten, M.Th. y G.J. Hoffman. 1984. Analysis of crop salt tolerance data. En: I. Shainberg y J. Shalhevet, *Soil salinity under irrigation*. Springer-Verlag, Berlin.
- Vargas, M.A. y M. Ortiz O. 1993. Cambios en la distribución vertical de un suelo salino-sódico durante el proceso de recuperación. Memorias de la Tercera reunión Nacional de Halófitas y Manejo de Aguas y Suelos Salinos. Montecillos, Méx.
- Vela, G. y D. Flores. 1995. Estudio edafológico de la zona lacustre de Tláhuac. En: N.E. García y R.M. Ramírez (eds.), *Simposio Universitario de Edafología*. Facultad de Ciencias, UNAM. México.
- Velázquez, A. y P. Luna. 1981. Estudio agrológico detallado del ex-lago de Texcoco, Edo. de México. SARH, México.
- Velázquez, C.L. y M. Ortiz O. 1990. Comparación de los mejoradores del grupo del cloruro de calcio

- con sus equivalentes del grupo del yeso para la recuperación de un suelo fuertemente salino-sódico. *Chapingo* 69-70: 54-56.
- Velázquez, L.A. y O.P. Luna, 1981. Estudio agrológico detalado del ex-lago de Texcoco. SARH, México.
- Villalba, A.I. 1989. Factores edáficos asociados al desarrollo y distribución de las halofitas en la laguna La Cruz, Sonora, México. Tesis de Maestría. Escuela Superior de Agricultura "Hermanos Escobar", Cd. Juárez, Chih.
- Villaseñor, R. 1973. Estudio preliminar para la recuperación de los suelos salino-sódicos del ex-Lago de Texcoco. Tesis Profesional, ESAAN, Saltillo, Coah.
- Volobúyev, V.R. 1959. La determinación de láminas de lavado en la recuperación de suelos salinos. *Hidrotécnica y Recuperación* No. 12. (Traducción del ruso por el Dr. Manuel Ortega Escobar).
- Waisel, Y. 1972. *Biology of halophytes*. Academic Press, New York.
- Warrick, A.W., E.D. Myers y D.R. Nielsen. 1986. Geostatistical methods applied to soil science. En: ASA-SSSA (ed.) *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*. Agronomy Monograph 9 (2nd edition).
- Whittig, L.D. y W.R. Allardice. 1986. X-ray diffraction techniques. En: ASA-SSSA (ed.) *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*. Agronomy Monograph 9 (2nd edition).
- Whittig, L.D. y P. Janitzky. 1963. Mechanisms of formation of sodium carbonate in soils. *J. Soil Sci.* 14: 322-333.
- Wilcox, J.C. 1947. Determination of electrical conductivity of soil solution. *Soil Sci.* 63: 107-117.
- Wyn Jones, G. 1980. An assessment of quaternary ammonium and related compounds as osmotic effectors in crop plants. En: Rains, D.W., R.C. Valentine y A. Hollaender (eds.), *Genetic engineering of osmoregulation*, p. 135-154. Plenum Press, New York.
- Wyn Jones, R.G. y R. Storey. 1981. Betaines. En: Paleg, L.G. y D. Aspinall (eds.), *The physiology and biochemistry of drought resistance in plants*, p. 172-205. Academic Press, Sydney.
- Wyn Jones, R.G. y J. Gorham. 1983. Osmoregulation. En: O.L. Longe, P.S. Nabel, C.B. Osmond y H. Ziegler (eds.) *Encyclopedia of plant physiology*, Vol. 12C: *Physiological plant ecology*. Springer-Verlag, Berlin.
- Xu, J. Y R. Webster. 1984. A geostatistical study of topsoil properties in Zhangwu county, China. *Catena* 11: 13-26.
- Yates, S.R. y M.V. Yates. 1990. *Geostatistics for waste management: a user's manual for the GEOPACK geostatistical software system*. U.S. Environmental Protection Agency. Ada, Oklahoma.
- Yeo, A.R. 1983. Salinity resistance: physiologies and prices. *Physiol. Plant.* 58: 214-222.

- Yen, H.E., G.E. Edwards, H.D. Grimes. 1994. Characterization of a salt-responsive 24-kilodalton glycoprotein in *Mesembryanthemum crystallinum*. *Plant Physiol.* 105: 1179-1187.
- Yost, R.S., G. Uehara y R.L. Fox. 1982a. Geostatistical analysis of soil chemical properties of large land areas. I. Semivariograms. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46: 1028-1032.
- Yost, R.S., G. Uehara y R.L. Fox. 1982b. Geostatistical analysis of soil chemical properties of large land areas. II. Kriging. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46: 1033-1037.

ANEXOS

ANEXO A. Resultados de los análisis mensuales de salinidad en el perfil

Cuadros A1 – A12

ANEXO B. Resultados de los análisis de salinidad en el área ecológica

Cuadros B1 – B12 (100 m de separación entre sitios de muestreo)

Cuadros B13 – B18 (10 m de separación entre sitios de muestreo)

ANEXO C. Resultados de los análisis del material vegetal

Cuadros C1 – C3

Cuadro A1. Variación mensual de la conductividad eléctrica (dS m⁻¹).

prof. (cm)	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembr	octubre	noviembre	diciembre
0-10	60.0	67.3	71.1	89.8	91.3	92.8	77.4	55.1	46.4	47.6	51.3	53.8
10-20	53.1	71.1	49.4	48.6	43.8	41.9	42.7	46.5	50.0	53.2	54.5	56.5
20-30	43.7	41.0	39.8	37.5	35.4	35.6	34.2	36.1	36.3	38.3	40.0	43.2
30-40	30.1	30.2	29.4	30.4	31.0	30.6	29.8	30.2	28.5	29.0	29.3	29.8
40-50	27.5	28.7	29.2	27.6	29.8	27.6	28.4	26.0	26.2	27.3	29.1	28.3
50-60	29.6	30.7	31.2	29.5	31.2	31.7	31.0	29.4	27.2	28.4	30.0	31.4
60-70	36.1	33.3	31.8	32.4	29.6	28.5	30.2	31.4	33.9	35.8	37.6	35.6
70-80	39.0	37.3	34.1	33.0	32.7	33.2	32.9	34.6	40.8	42.3	42.8	39.5
80-90	39.7	36.2	32.1	31.3	33.1	32.7	33.6	37.8	39.9	39.8	40.2	42.1
90-100	41.7	37.3	38.5	34.8	34.0	34.6	35.8	36.1	38.2	38.4	39.1	43.0
100-110	45.2	43.1	44.7	43.2	41.3	42.6	43.9	47.1	48.4	47.9	48.3	45.4
110-120	48.7	50.2	48.1	49.5	48.4	47.2	49.1	50.0	50.3	50.1	50.6	51.5
120-130	50.3	49.1	51.8	51.4	53.6	51.0	52.4	49.8	51.3	52.3	52.0	52.6
130-140	55.1	52.4	53.9	53.6	52.1	53.2	54.1	52.5	56.5	56.2	57.0	58.0
140-150	58.7	54.2	57.1	52.5	56.4	57.2	58.0	56.2	58.7	58.5	58.2	60.1
150-160	66.2	59.4	58.6	55.6	56.7	59.3	61.0	61.2	67.0	64.2	69.1	68.6
160-170	69.7	72.3	67.8	63.2	69.8	74.5	76.0	78.4	82.2	75.3	79.8	75.4
170-180	71.2	69.6	62.0	59.6	62.5	68.7	66.2	61.4	58.2	60.1	62.0	63.0
180-190	59.8	56.5	58.6	57.8	59.6	62.0	58.7	60.6	58.8	57.5	58.4	61.0
190-200	58.5	57.3	57.8	58.5	59.1	57.4	53.6	55.8	54.5	56.0	57.5	59.4

Cuadro A2. Variación mensual del pH.

prof. (cm)	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembr	octubre	noviembre	diciembre
0-10	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8
10-20	9.7	9.7	9.9	9.8	9.8	9.8	9.8	9.7	9.7	9.8	9.8	9.8
20-30	9.8	9.8	9.8	9.7	9.7	9.8	9.8	9.8	9.6	9.7	9.7	9.8
30-40	9.8	9.8	9.8	9.7	9.8	9.8	9.8	9.7	9.6	9.7	9.6	9.7
40-50	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	9.8	9.8	9.7	9.7	9.7	9.7
50-60	9.7	9.8	9.7	9.8	9.8	9.8	9.8	9.7	9.6	9.6	9.6	9.6
60-70	9.6	9.8	9.7	9.7	9.8	9.8	9.8	9.8	9.7	9.6	9.7	9.7
70-80	9.7	9.7	9.8	9.7	9.8	9.8	9.8	9.7	9.7	9.7	9.6	9.7
80-90	9.8	9.7	9.7	9.8	9.7	9.8	9.8	9.7	9.6	9.7	9.7	9.7
90-100	9.7	9.8	9.8	9.8	9.7	9.7	9.7	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8
100-110	9.7	9.8	9.8	9.8	9.8	9.7	9.7	9.7	9.8	9.8	9.8	9.8
110-120	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.7	9.7	9.8	9.7	9.7
120-130	9.8	9.8	9.7	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8
130-140	9.7	9.7	9.7	9.9	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8
140-150	9.7	9.7	9.8	9.9	9.8	9.8	9.8	9.8	9.7	9.7	9.8	9.7
150-160	9.8	9.8	9.8	9.9	9.7	9.7	9.7	9.8	9.7	9.7	9.8	9.7
160-170	9.8	9.8	9.9	9.8	9.8	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	9.8
170-180	9.8	9.9	9.8	9.9	9.8	9.7	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8
180-190	9.7	9.8	9.8	9.8	9.7	9.8	9.8	9.8	9.9	9.8	9.9	9.9
190-200	9.8	9.9	9.8	9.9	9.7	9.8	9.8	9.8	9.8	9.9	9.9	9.9

Cuadro A3. Variación mensual del sodio (mmol L⁻¹).

prof. (cm)	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembr	octubre	noviembre	diciembre
0-10	1532	1621	1786	1960	2064	2125	1526	1361	1130	1186	1194	1255
10-20	1080	1466	1232	1176	1104	1022	1137	976	1086	1100	1150	1320
20-30	708	680	789	725	695	704	687	755	804	850	863	1086
30-40	529	544	550	624	670	620	585	532	434	485	490	585
40-50	516	502	526	480	518	496	534	549	543	560	563	536
50-60	531	600	622	538	615	632	627	578	565	569	573	594
60-70	687	730	667	655	546	538	597	646	782	790	806	645
70-80	785	858	725	700	714	765	729	624	565	586	601	798
80-90	627	821	689	670	690	681	712	740	739	726	798	636
90-100	695	785	932	879	840	835	871	896	913	964	989	728
100-110	858	825	947	896	867	906	929	1025	1195	1127	1201	849
110-120	1033	1250	1186	1226	1180	1115	1212	1240	1282	1220	1264	1112
120-130	1180	1245	1268	1230	1274	1218	1286	1275	1326	1330	1341	1226
130-140	1287	1298	1355	1328	1336	1341	1372	1320	1347	1307	1368	1415
140-150	1386	1320	1426	1368	1394	1416	1475	1426	1456	1407	1431	1439
150-160	1580	1465	1450	1410	1466	1535	1584	1529	1652	1589	1676	1625
160-170	1745	1798	1690	1606	1684	1750	1795	1864	2043	1868	1956	1787
170-180	1768	1686	1526	1454	1528	1596	1570	1485	1326	1389	1435	1510
180-190	1350	1285	1344	1302	1330	1384	1412	1398	1478	1432	1476	1387
190-200	1310	1312	1369	1390	1417	1365	1296	1344	1217	1286	1303	1346

Cuadro A4. Variación mensual del potasio (mmol L⁻¹).

prof. (cm)	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembr	octubre	noviembre	diciembre
0-10	73	84	95	123	168	194	77	71	61	64	63	72
10-20	65	76	80	91	102	106	80	82	70	71	68	68
20-30	52	63	73	85	88	92	86	60	54	56	59	54
30-40	48	52	59	48	56	59	45	40	42	44	53	49
40-50	32	39	43	38	42	39	42	36	38	39	44	35
50-60	34	38	41	42	37	35	36	30	33	34	38	36
60-70	33	30	33	36	38	32	31	29	35	33	34	39
70-80	58	55	59	48	46	42	57	56	61	59	62	55
80-90	63	59	65	60	59	62	67	61	61	58	59	68
90-100	75	69	78	71	66	72	64	66	57	61	63	72
100-110	76	77	76	70	69	70	73	73	76	74	73	71
110-120	72	73	78	75	77	81	76	78	84	80	79	69
120-130	79	85	83	83	84	82	79	86	86	84	81	86
130-140	82	89	86	84	82	80	79	82	84	89	83	79
140-150	89	94	90	93	89	87	93	91	95	90	93	88
150-160	125	129	118	123	127	121	116	120	109	116	121	119
160-170	130	128	132	126	125	127	131	131	139	135	130	126
170-180	110	118	122	113	108	111	106	98	97	106	117	93
180-190	91	94	89	96	97	90	88	91	93	99	106	86
190-200	86	79	81	83	81	79	80	79	72	75	89	82

Cuadro A5. Variación mensual del calcio (mmol L⁻¹).

prof. (cm)	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembr	octubre	noviembre	diciembre
0-10	0.4	0.4	0.5	0.4	0.4	0.5	0.4	0.4	0.5	0.4	0.4	0.5
10-20	0.5	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.5	0.6	0.7	0.5	0.6	0.6
20-30	0.6	0.5	0.7	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.7	0.6	0.7
30-40	0.6	0.5	0.6	0.5	0.6	0.5	0.5	0.5	0.6	0.8	0.8	0.8
40-50	0.5	0.4	0.5	0.6	0.5	0.5	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.5
50-60	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.1	0.6	0.7	0.4	0.6	0.4
60-70	0.5	0.6	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6	0.6	0.6	0.4	0.4	0.4
70-80	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.4	0.5	0.5
80-90	0.5	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.5	0.6	0.6
90-100	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.4	0.6	0.6	0.7
100-110	0.5	0.4	0.4	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.4	0.4	0.5	0.6
110-120	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.6
120-130	0.5	0.6	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.5	0.7	0.7	0.4	0.7
130-140	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.5	0.6
140-150	0.5	0.4	0.4	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.4	0.5	0.5
150-160	0.4	0.6	0.6	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.2	0.6	0.6
160-170	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.6	0.7	0.3	0.6
170-180	0.5	0.6	0.5	0.5	0.4	0.5	0.6	0.5	0.5	0.4	0.8	0.5
180-190	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.9
190-200	0.9	0.9	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	0.9	0.9	0.9

Cuadro A6. Variación mensual del magnesio (mmol L⁻¹).

prof. (cm)	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembr	octubre	noviembre	diciembre
0-10	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
10-20	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3	0.5	0.3	0.4	0.2
20-30	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	0.4	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3
30-40	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.4	0.4
40-50	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.4	0.2	0.4
50-60	0.5	0.4	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.5	0.4	0.5	0.4
60-70	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4	0.4	0.3	0.4	0.5	0.5	0.5	0.3
70-80	0.3	0.5	0.4	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.6	0.4	0.3
80-90	0.2	0.3	0.3	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.4	0.4	0.3
90-100	0.4	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.3	0.3	0.3
100-110	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.3	0.4	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2
110-120	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4	0.4	0.3
120-130	0.5	0.4	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.2	0.3	0.5
130-140	0.4	0.3	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.5	0.4	0.5
140-150	0.4	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.5	0.2	0.3	0.5
150-160	0.5	0.4	0.4	0.3	0.4	0.5	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.4
160-170	0.5	0.3	0.4	0.3	0.4	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3	0.4	0.5
170-180	0.4	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.3
180-190	0.6	0.6	0.5	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6
190-200	0.5	0.6	0.5	0.5	0.6	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6

Cuadro A7. Variación mensual de la RAS

prof. (cm)	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembr	octubre	noviembre	diciembre
0-10	1831.1	1812.3	1996.8	2263.2	2383.3	2453.7	1823.9	1688.1	1263.4	1531.1	1427.1	1500.0
10-20	1339.6	1752.2	1472.5	1357.9	1274.8	1077.3	1312.9	1058.6	1035.5	1314.8	1212.2	1524.2
20-30	746.3	760.3	809.5	810.6	732.6	763.6	687.0	774.6	804.0	829.5	936.1	1144.7
30-40	529.0	590.1	596.6	676.8	706.2	693.2	616.6	577.0	445.3	433.8	456.9	557.8
40-50	516.0	544.5	570.5	506.0	546.0	538.0	616.6	595.5	627.0	574.5	650.1	581.4
50-60	559.7	650.8	695.4	583.5	648.3	685.5	991.4	626.9	538.7	657.0	573.0	685.9
60-70	852.1	816.2	797.2	710.4	630.5	601.5	647.5	662.8	745.6	832.7	901.1	770.9
70-80	877.7	858.0	764.2	782.6	798.3	784.9	747.9	595.0	538.7	617.7	651.9	953.8
80-90	749.4	890.5	747.3	800.8	796.7	814.0	772.3	854.5	826.2	787.5	841.2	689.8
90-100	695.0	766.1	909.5	901.8	885.4	856.7	944.7	971.8	962.4	1045.6	1072.7	767.4
100-110	959.3	986.1	1093.5	944.5	913.9	982.7	979.3	1146.0	1482.2	1519.6	1435.5	980.3
110-120	1033.0	1282.5	1186.0	1257.8	1210.7	1115.0	1314.6	1431.8	1390.5	1364.0	1459.5	1206.1
120-130	1243.8	1312.3	1417.7	1375.2	1381.8	1283.9	1319.4	1425.5	1264.3	1442.6	1602.8	1168.9
130-140	1356.6	1498.8	1428.3	1362.5	1408.3	1413.5	1407.6	1391.4	1461.0	1246.2	1442.0	1349.1
140-150	1503.3	1577.7	1646.6	1442.0	1666.1	1583.1	1703.2	1768.7	1740.3	1816.4	1652.4	1516.8
150-160	1713.8	1544.2	1528.4	1576.4	1692.8	1716.2	1829.0	1827.5	2336.3	2685.9	1935.3	1625.0
160-170	1745.0	1895.3	1781.4	1795.6	1775.1	1956.6	1947.0	2152.4	2215.9	1916.5	2426.1	1787.0
170-180	1917.7	1828.7	1823.9	1577.1	1708.4	1784.4	1755.3	1660.3	1438.2	1552.9	1283.5	1743.6
180-190	1161.9	1106.0	1226.9	1120.6	1124.1	1213.8	1215.3	1203.2	1249.1	1210.3	1294.5	1172.2
190-200	1127.5	1108.8	1224.5	1219.1	1176.8	1174.8	1115.4	1135.9	993.7	1086.9	1101.2	1137.6

Cuadro A8. Variación mensual del PSI.

prof. (cm)	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembr	octubre	noviembre	diciembre
0-10	96.4	96.4	96.7	97.1	97.2	97.3	96.4	96.1	94.9	95.8	95.5	95.7
10-20	95.2	96.3	95.6	95.2	94.9	94.1	95.1	94.0	93.9	95.1	94.7	95.7
20-30	91.7	91.8	92.3	92.3	91.5	91.8	91.0	91.9	92.2	92.4	93.2	94.4
30-40	88.6	89.7	89.8	90.9	91.2	91.1	90.1	89.5	86.8	86.5	87.1	89.1
40-50	88.4	88.9	89.4	88.2	88.9	88.8	90.1	89.8	90.2	89.4	90.5	89.5
50-60	89.2	90.6	91.1	89.6	90.5	91.0	93.6	90.2	88.8	90.6	89.4	91.0
60-70	92.6	92.3	92.2	91.3	90.3	89.9	90.5	90.7	91.7	92.5	93.0	91.9
70-80	92.8	92.7	91.8	92.0	92.2	92.0	91.7	89.8	88.8	90.1	90.6	93.4
80-90	91.7	92.9	91.7	92.2	92.2	92.3	91.9	92.6	92.4	92.1	92.5	91.0
90-100	91.1	91.9	93.1	93.0	92.9	92.7	93.3	93.5	93.4	93.9	94.1	91.9
100-110	93.4	93.6	94.2	93.3	93.1	93.5	93.5	94.4	95.6	95.7	95.5	93.5
110-120	93.8	95.0	94.6	94.9	94.7	94.3	95.1	95.5	95.3	95.3	95.6	94.7
120-130	94.8	95.1	95.4	95.3	95.3	95.0	95.1	95.5	94.9	95.5	95.9	94.5
130-140	95.2	95.7	95.5	95.3	95.4	95.4	95.4	95.4	95.6	94.8	95.5	95.2
140-150	95.7	95.9	96.0	95.5	96.1	95.9	96.2	96.3	96.2	96.4	96.1	95.7
150-160	96.2	95.8	95.8	95.9	96.1	96.2	96.4	96.4	97.2	97.5	96.6	96.0
160-170	96.3	96.5	96.3	96.4	96.3	96.6	96.6	96.9	97.0	96.6	97.3	96.3
170-180	96.6	96.4	96.4	95.9	96.2	96.3	96.3	96.1	95.5	95.8	95.0	96.3
180-190	94.5	94.2	94.8	94.3	94.3	94.7	94.7	94.7	94.8	94.7	95.0	94.5
190-200	94.3	94.2	94.8	94.7	94.5	94.5	94.3	94.4	93.6	94.1	94.2	94.4

Cuadro A9. Variación mensual de los cloruros (mmol L⁻¹).

prof. (cm)	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembr	octubre	noviembre	diciembre
0-10	978	1038	1324	1522	1617	1629	1380	872	794	808	836	827
10-20	836	1016	810	821	796	775	803	840	710	741	786	969
20-30	534	495	462	480	462	459	426	494	530	539	568	626
30-40	397	402	368	395	408	380	352	366	287	303	355	364
40-50	334	346	379	358	373	351	356	329	350	378	399	316
50-60	389	418	464	402	436	441	419	397	347	391	427	385
60-70	462	439	459	488	402	385	439	455	507	530	566	436
70-80	470	521	485	467	435	460	441	480	384	397	418	488
80-90	408	555	466	439	444	426	450	473	460	456	490	425
90-100	495	525	602	549	532	538	570	593	620	609	616	544
100-110	612	590	638	585	496	520	597	675	828	837	829	636
110-120	725	834	789	838	807	784	825	867	884	865	850	868
120-130	788	836	796	750	887	842	865	816	931	956	928	921
130-140	980	920	885	826	895	917	946	920	980	994	1009	1030
140-150	1010	936	1062	942	1074	1116	1189	1138	1027	998	1026	1085
150-160	1135	1037	1119	968	1019	1121	1178	1196	1138	1113	1165	1110
160-170	1284	1376	1245	1139	1248	1326	1385	1410	1460	1415	1400	1322
170-180	1318	1259	1087	987	1130	1192	1165	1034	922	989	1080	1134
180-190	988	965	1024	936	1067	1110	1065	1056	970	986	995	1102
190-200	954	922	945	969	1076	1032	975	929	864	898	922	1066

Cuadro A10. Variación mensual de los carbonatos (mmol L⁻¹).

prof. (cm)	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembr	octubre	noviembre	diciembre
0-10	198	261	233	163	149	213	184	174	116	122	125	143
10-20	61	171	168	112	138	116	143	123	93	99	110	137
20-30	48	52	104	82	109	111	124	112	97	104	108	130
30-40	42	36	58	63	120	113	108	85	43	55	75	93
40-50	48	45	43	36	62	68	77	98	58	60	55	72
50-60	38	49	52	34	71	73	76	66	69	70	60	69
60-70	69	95	63	51	58	64	61	78	96	94	93	63
70-80	98	112	82	73	130	132	139	73	48	55	56	134
80-90	39	69	79	61	111	119	126	118	80	90	77	51
90-100	28	62	93	109	132	125	119	108	85	83	75	42
100-110	56	47	100	88	154	163	138	153	102	75	79	48
110-120	99	132	139	122	158	139	162	149	112	98	90	54
120-130	111	109	140	135	133	124	145	174	138	107	100	69
130-140	72	105	154	148	144	161	168	158	107	125	115	123
140-150	123	117	94	144	138	124	111	107	137	110	108	91
150-160	135	119	74	127	191	168	159	125	143	126	132	163
160-170	130	110	116	137	171	163	166	163	145	130	135	124
170-180	139	143	123	145	162	149	156	183	124	128	134	93
180-190	93	82	87	106	114	110	148	137	133	135	125	70
190-200	88	101	119	132	118	111	140	163	105	118	125	59

Cuadro A11. Variación mensual de los bicarbonatos (mmol L⁻¹).

prof. (cm)	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembr	octubre	noviembre	diciembre
0-10	19.6	22.1	19.5	16.4	15.2	13.0	12.9	13.6	13.2	15.5	18.3	14.8
10-20	15.4	18.4	16.6	18.3	17.4	15.6	15.9	17.1	15.1	17.5	16.5	17.2
20-30	17.6	16.8	17.8	20.3	18.0	17.0	18.7	19.2	23.3	21.2	23.7	21.0
30-40	12.5	17.0	19.5	22.1	19.1	22.0	19.8	20.0	24.3	20.0	24.5	14.3
40-50	13.7	15.0	21.2	19.4	17.6	18.4	20.4	20.7	22.4	23.5	19.4	15.7
50-60	14.5	14.8	17.6	16.8	17.5	17.8	15.2	21.4	27.3	16.2	20.6	17.6
60-70	19.8	19.2	19.4	17.7	17.9	18.5	18.3	17.2	18.7	15.4	22.2	19.5
70-80	18.6	17.5	21.0	20.0	19.4	18.5	15.7	17.6	14.9	18.7	18.7	19.0
80-90	17.5	20.0	17.6	17.5	18.2	19.0	19.5	18.4	19.0	15.6	19.4	22.0
90-100	17.1	19.2	14.5	16.0	17.4	18.5	14.2	15.7	13.2	23.8	20.0	17.5
100-110	19.4	18.7	18.4	14.8	15.9	17.6	18.5	19.4	25.7	22.4	18.6	13.0
110-120	22.0	20.4	19.3	19.7	18.6	20.1	17.9	19.8	24.5	23.0	23.2	14.2
120-130	20.1	19.6	16.1	17.2	19.2	21.0	20.7	19.4	23.4	20.0	21.0	17.5
130-140	20.4	17.4	17.3	18.1	19.1	18.7	19.6	18.5	19.5	16.5	15.7	18.4
140-150	19.5	18.6	16.6	18.6	18.4	17.7	18.6	19.5	17.3	13.5	17.6	21.3
150-160	16.8	17.0	15.3	17.2	17.3	16.8	17.5	18.6	10.6	18.8	18.9	17.5
160-170	17.7	15.4	16.9	17.4	16.8	17.5	18.4	18.7	18.2	17.0	17.8	16.2
170-180	14.3	13.6	15.2	13.0	12.2	13.1	14.4	13.7	14.1	13.5	13.0	13.4
180-190	12.9	11.9	12.4	14.2	13.1	12.6	13.8	11.9	13.1	12.9	13.2	13.2
190-200	13.1	11.6	12.0	13.1	11.3	11.7	11.6	12.0	10.0	11.0	12.2	11.0

Cuadro A12. Variación mensual de los sulfatos (mmol L⁻¹).

prof. (cm)	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembr	octubre	noviembre	diciembre
0-10	51	65	68	73	76	79	70	49	42	38	41	46
10-20	43	50	58	60	59	53	56	57	39	37	39	39
20-30	40	39	48	51	49	48	44	39	32	34	35	37
30-40	39	38	32	39	41	38	33	27	20	24	27	33
40-50	38	35	33	35	37	33	32	29	27	22	24	31
50-60	34	36	30	38	39	37	36	30	24	22	28	39
60-70	40	37	37	33	29	28	31	32	32	28	32	41
70-80	58	43	35	37	35	36	34	32	27	29	39	52
80-90	62	55	44	49	43	36	39	38	34	32	42	53
90-100	59	54	51	61	54	56	57	61	43	39	44	57
100-110	60	68	62	58	55	57	61	60	51	49	50	64
110-120	65	60	64	66	61	60	63	64	55	51	60	67
120-130	74	73	78	71	75	69	72	64	69	74	70	76
130-140	75	70	68	76	70	74	75	69	80	76	73	72
140-150	70	67	76	65	70	72	74	73	86	82	80	85
150-160	93	73	88	92	90	94	97	95	91	92	90	89
160-170	104	93	101	94	98	102	106	123	144	125	108	98
170-180	81	78	75	81	84	89	85	77	70	74	68	70
180-190	70	68	61	60	65	66	63	69	74	62	66	68
190-200	71	68	72	73	78	71	69	70	63	67	69	73

Cuadro B1. Valores de conductividad eléctrica (dS m⁻¹), separación 100 m

Primer muestreo

X\Y	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
0.0	6.7	2.4	6.0	39.8	6.4	17.8	95.3	95.1	71.2	64.8	68.5	47.0
0.1	8.4	85.9	134.8	123.2	119.9	109.2	109.8	69.6	92.3	96.2	80.9	12.8
0.2	103.9	17.1	112.9	118.8	110.2	108.4	71.3	23.6	111.0	29.0	123.8	2.3
0.3	100.5	23.9	121.5	93.1	109.8	134.7	22.9	12.2	99.9	134.3	22.9	118.9
0.4	147.6	18.7	118.4	58.8	120.2	104.9	85.0	22.7	140.9	21.5	122.2	137.2
0.5	41.3	92.4	8.3	98.3	157.8	93.0	131.5	63.5	73.7	2.2	107.5	86.7
0.6	29.1	105.9	108.9	50.9	132.1	104.8	75.8	137.5	113.2	78.3	105.1	6.2
0.7	77.6	14.2	94.2	76.2	124.0	31.4	62.0	48.4	89.8	114.2	117.0	119.6
0.8	10.3	100.1	7.9	88.1	130.0	64.1	144.0	78.0	15.6	61.3	99.3	79.0
0.9	21.3	80.6	79.9	132.4	117.2	103.9	4.5	147.3	72.6	11.9	8.3	48.2
1.0	53.4	88.1	124.6	115.1	124.2	64.2	5.5	43.4	81.3	55.9	12.0	112.0
1.1	63.6	14.6	107.6	120.4	2.2	29.8	35.0	63.1	58.8	15.2	44.5	124.7
1.2	3.1	61.2	3.6	49.1	33.5	19.5	24.7	84.6	64.4	6.7	115.7	65.7
1.3	15.3	93.4	33.7	9.5	15.2	63.1	122.5	23.6	90.9	104.3	24.6	4.9
1.4	10.6	97.5	75.0	13.7	40.6	6.0	26.6	4.4	4.0	46.0	9.3	35.7

Segundo muestreo

X\Y	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
0.0	1.3	1.0	2.4	25.2	3.0	1.2	102.4	104.4	87.5	76.3	84.1	33.9
0.1	2.7	98.3	155.1	140.0	129.2	120.1	116.3	78.7	101.2	107.5	103.4	3.1
0.2	120.8	4.6	131.4	127.6	114.5	131.6	87.4	45.2	130.0	16.5	150.4	1.3
0.3	116.1	61.1	142.4	113.5	124.1	163.7	8.2	3.5	120.6	158.5	13.1	124.9
0.4	169.2	9.2	131.0	77.5	138.3	129.8	120.8	12.5	161.0	11.5	138.4	160.0
0.5	66.8	110.0	3.0	114.3	116.1	119.3	124.0	78.2	84.1	1.5	115.4	100.2
0.6	4.1	121.2	119.7	26.4	128.5	111.2	96.4	130.4	125.0	99.2	121.3	2.0
0.7	89.4	3.7	103.6	77.1	141.3	58.1	27.0	23.1	97.6	131.2	139.0	134.5
0.8	4.1	120.6	2.4	97.5	144.2	88.4	137.1	97.4	5.1	87.5	93.2	87.6
0.9	7.4	94.4	96.1	155.2	131.1	117.8	1.6	164.0	70.3	4.8	2.7	6.5
1.0	7.1	94.7	145.5	123.2	137.5	25.0	1.7	9.4	97.9	9.7	3.0	116.5
1.1	10.9	2.7	126.2	131.0	1.4	6.1	8.3	9.4	10.1	2.8	5.9	138.6
1.2	5.3	93.7	2.6	10.8	7.5	6.4	3.7	19.2	13.7	1.8	134.4	11.6
1.3	6.9	137.1	10.4	2.0	3.0	8.7	136.0	5.1	78.5	111.9	4.5	2.3
1.4	4.3	116.7	94.2	3.3	9.7	4.2	7.5	3.8	1.9	10.3	4.5	7.6

Cuadro B2. Valores de pH, separación 100 m

Primer muestreo

X\Y	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
0.0	9.0	8.6	9.4	9.6	8.3	9.7	9.9	9.7	9.4	9.9	9.6	9.9
0.1	9.2	9.9	9.5	9.5	9.8	9.7	9.7	9.7	9.3	9.7	9.4	9.0
0.2	9.8	9.2	9.8	9.5	9.7	9.7	9.7	9.6	9.5	10.0	9.3	8.0
0.3	9.9	9.2	9.8	9.8	9.8	9.7	9.8	9.1	9.6	9.6	9.7	9.4
0.4	9.7	9.5	9.9	9.8	9.7	9.9	9.9	9.8	9.4	9.8	9.5	9.5
0.5	9.8	9.8	9.3	9.7	9.6	9.8	9.7	9.8	9.5	9.4	9.5	9.6
0.6	9.5	9.7	9.5	9.8	9.8	9.7	9.7	9.6	9.4	9.7	9.4	9.0
0.7	9.9	9.1	9.9	9.9	9.8	9.5	9.9	9.9	9.4	9.7	9.4	9.4
0.8	9.4	9.7	9.3	9.5	9.7	9.9	9.7	9.8	9.4	9.9	9.5	9.6
0.9	9.2	9.6	9.6	9.7	9.6	9.7	9.0	9.5	9.6	9.3	8.8	9.7
1.0	9.9	9.9	9.9	9.8	9.7	9.9	9.2	9.9	9.6	9.6	9.3	9.5
1.1	10.1	9.4	9.9	9.9	8.4	9.7	9.7	9.9	9.6	9.6	9.5	9.5
1.2	8.8	9.9	9.3	9.9	9.8	9.6	9.7	9.9	9.7	9.4	9.5	9.8
1.3	9.0	9.8	9.6	9.4	9.4	9.9	9.7	9.4	9.7	9.8	8.7	8.0
1.4	8.8	9.8	9.7	9.5	10.0	9.2	9.8	8.9	8.8	9.7	8.3	9.2

Segundo muestreo

X\Y	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
0.0	9.6	9.5	9.7	10.4	9.8	9.6	10.7	10.8	10.6	10.3	10.3	10.6
0.1	9.7	10.5	10.8	10.9	10.7	10.7	10.7	10.4	10.6	10.7	10.5	9.8
0.2	10.7	9.6	10.5	10.7	10.7	10.8	10.6	10.3	10.6	10.1	10.7	9.8
0.3	10.8	10.9	10.7	10.6	10.7	10.8	9.9	9.7	10.4	10.8	10.1	10.6
0.4	10.8	9.8	10.5	10.4	10.6	10.7	10.7	10.3	10.6	10.0	10.6	10.6
0.5	10.5	10.6	9.8	10.8	10.7	10.7	10.8	10.6	10.8	9.6	10.6	10.8
0.6	9.6	10.8	10.7	10.4	10.8	10.7	10.8	10.6	10.5	10.6	10.7	9.8
0.7	10.4	10.2	10.6	10.5	10.7	10.5	10.6	10.5	10.8	10.8	10.8	10.8
0.8	9.6	10.6	9.7	10.7	10.8	10.7	10.7	10.6	9.8	10.3	10.4	10.3
0.9	9.7	10.6	10.3	10.8	10.7	10.6	9.6	10.6	10.7	9.7	9.6	9.7
1.0	9.9	10.6	10.6	10.7	10.8	10.4	9.7	9.9	10.7	9.8	9.6	10.8
1.1	9.7	9.6	10.6	10.7	9.6	9.7	9.9	9.9	9.9	9.6	9.8	10.6
1.2	9.2	10.8	9.7	9.9	9.8	9.6	9.6	10.2	10.1	9.6	10.8	10.0
1.3	9.7	10.7	10.0	9.8	9.6	9.8	10.7	9.8	10.6	10.7	9.8	9.6
1.4	10.0	10.6	10.7	9.8	9.8	9.6	9.8	9.7	9.5	9.9	9.9	9.8

Cuadro B3. Valores de sodio (mmol L⁻¹), separación 100 m

Primer muestreo

X\Y	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
0.0	60	36	61	487	57	291	2740	2523	1044	1087	1218	622
0.1	43	1609	5002	2175	1914	2740	2740	1914	2392	2088	1348	117
0.2	1870	244	2305	2088	1783	3262	1522	365	3784	105	2827	17
0.3	1783	283	2218	1740	2305	3480	439	174	2479	3393	378	3175
0.4	2827	200	2305	735	2088	2827	2175	413	6089	283	3001	3567
0.5	722	1653	78	1609	5480	2175	3784	1653	1783	65	2827	2088
0.6	283	1783	1740	665	2740	2479	2175	4654	3175	1348	2305	28
0.7	1740	148	1914	1392	2305	583	1522	748	2305	2523	2740	2914
0.8	104	1740	78	1305	2479	1479	5219	1870	231	1174	2479	1609
0.9	212	1174	1044	2827	4654	2523	52	5437	1783	148	85	735
1.0	761	1522	2653	2218	3175	1522	64	522	1783	1044	174	2305
1.1	1044	161	1914	2218	22	544	278	1218	1044	187	583	3088
1.2	27	1044	35	652	457	326	422	2001	1305	67	3262	1348
1.3	161	1609	405	96	209	1609	3001	274	2218	2479	318	44
1.4	104	1609	1174	148	696	67	413	54	40	722	104	478

Segundo muestreo

X\Y	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
0.0	15	11	18	387	39	13	2697	2762	1414	1109	1392	326
0.1	20	2566	5633	5176	3306	2914	2610	1870	1783	1914	1688	37
0.2	3110	65	3523	3219	2414	3980	1762	609	4176	283	4328	10
0.3	2327	1783	4154	2327	3132	6198	109	67	3110	6329	170	3415
0.4	6873	98	3219	1501	3610	3154	2914	131	6481	152	3415	6133
0.5	1718	2827	38	2392	3871	2523	4219	1870	1914	17	3067	2349
0.6	48	2719	2545	370	3806	2871	2327	4132	3480	2131	3110	14
0.7	2371	54	2218	1457	3415	761	631	392	2719	3828	4306	3915
0.8	48	2914	17	2632	5067	1979	4850	2479	63	1653	2131	1718
0.9	87	2218	2175	6068	5415	3806	15	7221	1218	52	20	74
1.0	81	2371	5916	3241	4415	522	17	104	2088	122	36	2740
1.1	135	24	3415	3850	13	78	89	102	135	17	70	4328
1.2	61	1870	16	139	83	74	42	235	196	19	4241	135
1.3	78	4480	144	16	34	96	4524	57	1631	2610	50	20
1.4	48	2914	1631	29	122	48	91	4	24	126	52	91

Cuadro B4. Valores de potasio (mmol L⁻¹), separación 100 m

Primer muestreo

X\Y	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
0.0	7.3	20.4	3.5	40.8	6.8	10.3	125.8	129.9	98.2	137.0	132.9	60.3
0.1	6.1	95.1	380.5	230.1	197.4	137.0	167.7	86.0	152.4	156.5	104.3	8.5
0.2	136.0	11.4	129.9	11.8	217.9	159.5	169.8	15.2	188.2	31.7	248.5	4.0
0.3	101.2	15.3	148.3	169.8	181.0	239.3	29.6	6.7	175.9	280.0	17.3	217.9
0.4	94.1	14.0	160.6	5.2	175.9	134.0	169.8	14.5	243.4	14.2	206.0	248.5
0.5	36.8	114.5	4.7	125.8	260.8	156.5	19.4	86.0	125.8	5.2	159.5	137.0
0.6	20.4	152.4	159.5	57.2	213.8	137.0	114.5	214.0	206.0	129.9	175.9	5.0
0.7	67.0	79.7	169.8	101.2	210.7	34.7	72.6	51.1	159.5	19.4	204.0	230.1
0.8	6.3	118.6	5.1	141.1	171.8	73.6	280.0	152.4	11.7	169.8	159.5	101.2
0.9	22.5	104.3	95.1	150.3	167.7	129.9	2.8	247.5	104.3	9.6	5.5	70.0
1.0	55.2	83.8	169.8	125.8	170.4	80.8	3.2	51.1	137.0	86.9	8.8	202.4
1.1	68.5	10.2	104.3	137.0	2.5	32.7	34.7	72.6	83.8	12.6	53.1	230.1
1.2	2.6	60.3	2.5	48.0	34.7	10.7	17.4	125.8	95.1	4.7	159.5	73.6
1.3	9.6	86.9	33.7	6.3	11.3	73.6	189.2	14.5	148.3	185.1	31.7	3.6
1.4	5.9	98.2	63.4	6.8	50.0	4.3	20.2	2.5	3.4	50.0	12.4	40.8

Segundo muestreo

X\Y	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
0.0	1.5	1.3	1.9	5.1	4.1	1.3	136.8	148.3	95.9	167.5	189.3	35.8
0.1	2.0	124.0	189.3	209.7	175.2	168.8	135.5	87.0	120.2	135.5	127.9	4.6
0.2	158.6	7.4	176.5	194.4	248.1	194.4	189.3	63.9	229.4	22.5	268.5	1.7
0.3	149.4	78.5	206.1	189.3	215.3	324.8	12.3	4.1	205.9	314.6	15.3	235.3
0.4	278.8	8.4	194.4	87.0	217.4	185.4	236.6	9.2	319.7	7.4	249.4	319.7
0.5	74.2	134.3	2.3	176.5	194.4	207.2	89.5	106.1	144.5	2.0	173.9	167.5
0.6	4.9	185.4	194.4	32.0	185.4	161.1	144.5	190.5	217.4	158.6	190.5	2.0
0.7	107.4	3.3	175.2	147.1	278.8	79.3	34.5	29.4	165.0	108.7	263.4	296.7
0.8	4.3	135.5	2.8	159.8	301.8	103.6	271.1	168.8	5.1	211.0	163.7	121.5
0.9	9.0	143.2	159.8	245.5	216.1	168.8	1.2	347.8	95.9	5.1	2.3	7.7
1.0	9.2	118.9	268.5	189.3	214.8	29.4	1.9	8.4	148.3	15.3	4.1	195.7
1.1	7.2	3.3	184.1	209.7	1.2	5.4	7.4	10.2	12.8	1.9	4.3	260.9
1.2	4.3	116.4	2.0	13.0	7.7	5.6	3.1	89.5	25.6	2.0	248.1	26.9
1.3	5.4	225.1	6.9	2.6	1.8	9.5	294.1	4.3	99.7	202.0	0.4	2.0
1.4	0.3	139.4	115.1	3.8	9.0	3.3	5.1	2.0	1.3	9.0	3.8	7.7

Cuadro B5. Valores de calcio (mmol L⁻¹), separación 100 m

Primer muestreo

X\Y	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
0.0	0.6	0.7	0.3	0.4	0.3	0.5	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1
0.1	0.4	0.2	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.1	0.1	0.1	1.0
0.2	0.3	0.4	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3	0.1	0.3	0.1	0.1
0.3	0.3	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.4	0.1	0.1	0.1	0.1
0.4	0.2	0.8	0.1	0.6	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
0.5	0.2	0.3	0.7	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1
0.6	0.4	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.3	0.1	0.1	0.2	0.1	0.6
0.7	0.4	0.4	0.2	0.3	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2
0.8	1.1	0.3	0.3	0.2	0.1	0.4	0.1	0.2	0.3	0.2	0.4	0.2
0.9	1.1	0.3	0.3	0.1	0.2	0.1	0.4	0.1	0.2	0.6	0.7	0.2
1.0	0.6	0.3	0.1	0.2	0.1	0.2	0.8	0.3	0.2	0.2	0.4	0.1
1.1	0.8	0.6	0.2	0.1	0.3	0.6	0.3	0.2	0.3	0.5	0.2	0.1
1.2	0.8	0.3	0.4	0.4	0.5	0.6	0.3	0.3	0.2	0.3	0.1	0.2
1.3	0.6	0.3	0.5	0.6	1.5	0.3	0.1	0.9	0.2	0.2	0.3	0.3
1.4	1.0	0.3	0.4	0.8	0.6	0.4	0.4	1.6	0.3	0.2	1.0	0.6

Segundo muestreo

X\Y	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
0.0	0.8	0.9	0.7	0.4	0.5	0.3	0.2	0.5	0.4	0.3	0.5	1.0
0.1	0.9	0.4	0.4	0.2	0.2	0.4	0.5	0.8	0.7	0.2	0.5	1.0
0.2	0.4	0.7	0.4	0.5	0.2	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0	0.4	0.8
0.3	0.5	1.2	0.6	0.9	0.5	0.4	0.8	0.8	0.9	0.3	0.4	0.3
0.4	0.6	1.5	0.8	0.8	0.5	0.7	0.8	1.5	0.6	0.7	0.3	0.3
0.5	0.3	0.5	1.0	0.4	0.8	0.6	0.9	0.3	0.5	1.0	0.9	0.7
0.6	0.8	0.4	0.4	1.1	0.4	0.3	0.5	0.7	0.5	0.5	0.4	0.7
0.7	0.5	0.7	0.9	1.2	0.8	0.4	0.3	0.5	0.7	0.4	0.2	0.4
0.8	1.3	0.5	0.4	0.5	0.4	0.3	0.5	0.7	0.9	0.4	0.7	0.4
0.9	0.9	0.4	0.5	0.3	0.4	0.3	0.7	0.5	0.8	0.8	0.6	1.0
1.0	0.7	0.8	0.5	0.4	0.6	0.7	1.0	1.2	0.5	0.4	0.6	0.6
1.1	1.5	1.3	0.5	0.4	0.5	1.3	0.5	0.4	0.6	1.2	0.8	0.3
1.2	1.2	1.5	1.0	0.8	0.7	1.2	0.9	0.7	1.0	1.0	0.3	0.4
1.3	1.1	0.8	0.8	0.9	1.3	1.0	1.0	1.1	1.0	0.4	1.1	1.0
1.4	1.2	0.4	0.8	0.9	1.2	0.7	1.0	1.5	0.9	0.9	1.3	1.4

Cuadro B6. Valores de magnesio (mmol L⁻¹), separación 100 m

Primer muestreo

X\Y	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
0.0	0.4	0.5	0.1	0.5	0.5	0.4	0.2	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1
0.1	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.5
0.2	0.2	0.3	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.2	0.2	0.1	0.2
0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1
0.4	0.1	0.5	0.1	0.3	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.2	0.1
0.5	0.3	0.2	0.4	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.3	0.1	0.1	0.1
0.6	0.5	0.4	0.3	0.1	0.1	0.2	0.4	0.1	0.1	0.2	0.2	0.4
0.7	0.4	0.2	0.2	0.4	0.1	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1	0.2
0.8	0.6	0.2	0.4	0.4	0.1	0.5	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2
0.9	0.7	0.3	0.4	0.2	0.1	0.4	0.5	0.1	0.4	0.5	0.4	0.2
1.0	0.5	0.4	0.2	0.2	0.2	0.1	0.5	0.4	0.3	0.3	0.4	0.1
1.1	0.5	0.5	0.4	0.3	0.2	0.6	0.4	0.3	0.4	0.6	0.3	0.1
1.2	0.6	0.4	0.5	0.3	0.4	0.6	0.4	0.3	0.1	0.4	0.2	0.1
1.3	0.4	0.3	0.5	0.7	0.7	0.4	0.3	0.7	0.3	0.4	0.2	0.2
1.4	0.7	0.2	0.4	0.6	0.4	0.5	0.5	0.8	0.4	0.1	0.6	0.4

Segundo muestreo

X\Y	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
0.0	0.3	0.2	0.3	0.4	0.3	0.2	0.3	1.0	0.5	0.5	0.3	1.0
0.1	0.8	0.5	0.3	0.2	0.3	0.5	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3	0.8
0.2	0.3	0.5	0.3	0.4	0.3	0.4	0.5	0.4	0.4	1.0	0.3	0.2
0.3	0.5	0.3	0.3	0.3	0.4	0.2	0.5	0.3	0.5	0.2	0.3	0.3
0.4	0.4	0.5	0.2	0.4	0.5	0.7	0.7	0.5	0.4	0.8	0.4	0.2
0.5	0.3	0.4	0.7	0.3	0.2	0.2	0.5	0.4	0.5	0.5	0.4	0.5
0.6	0.8	0.3	0.2	0.9	0.4	0.3	0.2	0.4	0.4	0.6	0.5	0.6
0.7	0.5	0.4	0.3	0.3	0.8	0.6	0.2	0.6	0.9	0.2	0.3	0.4
0.8	1.0	0.5	0.7	0.4	0.3	0.3	0.4	0.6	0.7	0.4	0.6	0.3
0.9	0.8	0.2	0.4	0.3	0.4	0.3	0.5	0.4	0.2	0.2	0.3	0.5
1.0	0.3	0.2	0.5	0.2	0.4	0.5	0.6	0.6	0.4	0.5	0.5	0.3
1.1	1.0	0.9	0.5	0.5	0.5	1.3	0.7	0.5	0.6	1.0	0.5	0.3
1.2	0.3	1.0	0.2	0.4	0.7	0.6	0.5	0.3	0.8	0.5	0.3	0.2
1.3	0.4	0.2	0.2	0.1	1.0	0.8	0.5	0.7	1.0	0.5	0.7	0.6
1.4	0.3	0.3	0.6	0.8	1.1	0.8	1.0	1.0	1.0	0.7	0.8	0.8

Cuadro B7. Valores de la RAS, separación 100 m

Primer muestreo

X\Y	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
0.0	61.5	33.9	102.7	513.0	65.1	307.1	5002.8	3760.6	2087.6	2807.3	3144.3	1966.6
0.1	55.5	2399.0	7908.6	4862.7	3493.9	5480.4	5480.4	2852.7	4784.4	5390.4	3481.2	99.2
0.2	2787.9	302.0	5952.0	4175.4	3255.8	6524.2	2406.9	453.0	7568.0	602.9	8940.0	34.6
0.3	2404.6	421.4	4960.0	3479.6	4610.4	8984.2	982.3	207.8	4526.3	7586.0	846.1	8198.0
0.4	5161.5	178.8	5952.0	797.2	5390.4	6321.5	3675.9	557.1	15722.5	565.4	6002.2	9208.9
0.5	1021.0	2463.8	78.2	2720.2	12254.5	3438.5	7568.0	2793.7	2658.3	168.3	7299.5	5390.4
0.6	297.9	2302.2	2750.8	1487.8	7075.1	4958.4	2807.5	12016.3	8198.0	2279.0	4610.4	29.3
0.7	1945.1	199.2	3493.9	1663.5	5952.0	868.7	2269.3	1057.9	3896.4	4605.7	6127.2	5320.3
0.8	82.4	2460.4	96.4	1759.3	7839.9	1558.7	11670.9	3161.2	310.8	1984.9	3342.9	2720.2
0.9	189.4	1516.0	1247.5	5654.2	9307.8	3760.6	56.5	14038.0	2404.6	144.2	81.2	1341.9
1.0	761.1	1888.1	5306.4	4049.8	6350.2	2779.3	55.6	647.3	2521.9	1650.3	200.8	5952.0
1.1	933.6	153.4	2706.3	3507.2	32.3	530.4	345.1	1815.3	1294.6	182.4	868.7	6905.2
1.2	23.2	1347.5	38.7	842.2	510.6	297.7	544.6	2697.7	2609.6	80.5	6524.2	3014.8
1.3	165.0	2077.5	404.5	87.2	142.3	1996.0	5072.7	223.7	3306.6	3506.1	449.0	65.4
1.4	81.1	2544.5	1516.0	124.9	713.9	72.0	435.5	35.4	51.5	1444.0	85.1	490.8

Segundo muestreo

X\Y	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
0.0	14.8	10.6	18.8	462.7	45.1	18.4	4020.2	2255.2	1533.4	1280.8	1607.2	230.7
0.1	15.6	2783.5	6732.6	8749.4	4928.0	3258.3	3013.5	1825.3	1783.4	2853.1	1948.8	28.3
0.2	3857.5	59.5	4370.1	3392.9	3414.1	4195.3	1679.6	594.3	3893.9	199.9	5368.2	10.0
0.3	2327.1	1456.1	4378.7	2218.8	3396.9	8357.8	97.2	65.8	2676.7	8950.3	219.0	4408.1
0.4	7051.1	69.2	3392.9	1369.9	3610.3	2714.1	2379.5	92.3	6649.5	124.3	4235.2	8673.5
0.5	2218.1	3066.6	30.3	2859.3	3871.2	2820.6	3631.3	2319.9	1963.6	14.2	2742.9	2190.3
0.6	39.0	3509.7	3431.1	261.4	4394.8	3871.0	2886.4	4032.6	3668.0	2032.2	3477.1	12.7
0.7	2432.2	54.4	2025.1	1189.8	2787.9	802.4	891.9	382.1	2219.7	4941.7	6089.9	4520.3
0.8	31.9	2914.3	16.6	2773.9	6285.3	2798.9	5112.2	2217.6	49.9	1908.6	1945.7	2131.0
0.9	66.7	2991.3	2292.5	7833.6	6253.2	5382.5	14.5	7831.7	1217.9	52.2	21.1	60.3
1.0	80.5	2432.2	5915.6	4582.8	4415.0	476.5	13.8	78.9	2264.6	128.4	35.2	2888.5
1.1	85.3	15.8	3414.5	4303.9	13.0	49.0	85.0	110.9	125.7	11.7	61.0	6120.7
1.2	49.7	1182.9	14.7	127.1	71.1	55.1	37.0	241.0	145.9	15.6	5475.1	181.8
1.3	63.9	4480.2	143.5	16.5	22.6	73.4	3693.6	42.1	1153.4	2830.7	38.3	15.7
1.4	39.0	3762.3	1430.6	22.7	80.3	39.7	64.6	2.7	17.9	101.3	36.9	62.3

Cuadro B8. Valores del PSI, separación 100 m

Primer muestreo

X\Y	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
0.0	47.2	32.7	60.0	88.3	48.6	81.8	98.6	98.2	96.8	98.6	97.8	96.6
0.1	44.6	97.2	99.1	98.6	98.0	98.7	98.7	97.6	98.6	98.7	98.0	59.1
0.2	97.6	81.6	98.8	98.4	97.9	98.9	97.2	86.9	99.1	89.8	99.2	33.2
0.3	97.2	86.1	98.6	98.0	98.5	99.2	93.5	75.3	98.5	99.1	92.5	99.1
0.4	98.7	72.4	98.8	92.1	98.7	98.9	98.1	89.1	99.5	89.2	98.8	99.2
0.5	93.7	97.3	53.2	97.5	99.4	98.0	99.1	97.6	97.5	71.1	99.0	98.7
0.6	81.4	97.1	97.5	95.6	99.0	98.6	97.6	99.4	99.1	97.1	98.5	29.5
0.7	96.6	74.5	98.0	96.0	98.8	92.7	97.0	93.9	98.1	98.5	98.9	98.7
0.8	54.6	97.3	58.5	96.2	99.1	95.8	99.4	97.8	82.0	96.6	98.0	97.5
0.9	73.5	95.1	94.8	98.8	99.2	98.2	45.0	99.5	97.2	67.8	54.2	95.1
1.0	91.8	96.5	98.7	98.3	98.9	97.6	44.7	90.5	97.3	96.0	74.6	98.8
1.1	93.2	69.2	97.5	98.1	31.7	88.6	83.5	96.3	95.0	72.8	92.7	99.0
1.2	24.8	95.2	35.8	92.5	88.2	91.4	88.9	97.5	97.4	54.0	98.9	97.8
1.3	70.7	96.8	85.6	56.0	67.6	96.7	98.6	76.6	97.9	98.1	86.8	48.7
1.4	54.2	97.4	95.7	64.6	91.3	51.2	86.5	33.7	42.7	95.5	55.4	87.8

Segundo muestreo

X\Y	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
0.0	17.1	12.6	20.9	87.2	39.5	20.5	98.3	97.1	95.8	95.0	96.0	77.2
0.1	17.8	97.6	99.0	99.2	98.6	98.0	97.8	96.4	96.3	97.7	96.6	28.8
0.2	98.3	46.4	98.5	98.0	98.1	98.4	96.1	89.7	98.3	74.6	98.8	11.9
0.3	97.2	95.5	98.5	97.0	98.0	99.2	58.7	48.9	97.5	99.2	76.3	98.5
0.4	99.0	50.2	98.0	95.3	98.2	97.6	97.2	57.4	99.0	64.5	98.4	99.2
0.5	97.0	97.8	30.3	97.7	98.3	97.7	98.2	97.2	96.7	16.5	97.6	97.0
0.6	36.0	98.1	98.1	79.4	98.5	98.3	97.7	98.3	98.2	96.8	98.1	14.9
0.7	97.3	44.1	96.8	94.6	97.6	92.2	92.9	84.9	97.0	98.6	98.9	98.5
0.8	31.4	97.7	18.8	97.6	98.9	97.6	98.7	97.0	42.0	96.6	96.6	96.9
0.9	49.3	97.8	97.1	99.1	98.9	98.8	16.7	99.1	94.7	43.1	23.0	46.7
1.0	54.0	97.3	98.9	98.5	98.5	87.5	16.0	53.5	97.1	65.3	33.6	97.7
1.1	55.5	18.1	98.1	98.4	15.2	41.5	55.4	61.9	64.8	13.8	47.0	98.9
1.2	41.9	94.6	17.0	65.1	50.9	44.4	34.8	78.0	68.1	17.9	98.8	72.7
1.3	48.2	98.5	67.8	18.8	24.3	51.7	98.2	37.8	94.4	97.7	35.6	18.0
1.4	36.0	98.2	95.5	24.3	54.0	36.4	48.4	2.7	20.1	59.7	34.7	47.5

Cuadro B9. Valores de cloruros del área (mmol L⁻¹), separación 100 m

Primer muestreo

X\Y	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
0.0	36	30	40	270	35	130	1280	1370	620	585	700	320
0.1	25	725	3240	1350	1200	1585	1540	865	1450	1180	860	110
0.2	1425	150	1130	1225	1100	1805	775	190	2030	175	1340	55
0.3	1050	170	1250	800	920	1830	170	90	1270	1820	125	1300
0.4	2100	155	1220	480	1180	1455	1200	150	3850	140	1805	1700
0.5	300	850	60	900	2970	1305	1925	990	865	35	1250	925
0.6	235	1080	1260	365	1385	1570	1925	2950	1890	784	1140	35
0.7	1000	120	930	530	1255	240	1310	270	1510	1665	1240	1255
0.8	85	970	70	865	1370	815	810	1090	90	575	1030	865
0.9	105	800	805	1440	3230	1315	2280	2660	960	80	65	340
1.0	420	825	1350	1150	1840	1740	40	300	970	620	70	1190
1.1	700	105	1340	1320	35	210	50	650	470	90	310	1440
1.2	25	470	20	375	210	140	175	1220	580	50	1240	675
1.3	110	880	325	70	110	390	185	190	1155	1360	210	30
1.4	113	900	680	70	260	50	1285	35	30	315	80	310

Segundo muestreo

X\Y	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
0.0	10	10	15	195	30	10	1585	1805	680	640	675	145
0.1	15	1350	3350	2975	1750	1470	1315	1190	1050	1275	1150	25
0.2	1220	40	1670	1540	1370	2350	970	375	2280	130	2560	7
0.3	1450	965	2365	1350	1700	3450	71	35	1890	3850	85	1925
0.4	3975	70	1850	620	1665	1455	1570	85	3970	70	1885	3550
0.5	1080	1510	25	1310	2280	1140	2180	1090	1140	10	1570	1260
0.6	35	1700	1510	235	2250	1510	1310	2320	2000	1070	1880	7
0.7	1370	30	1280	750	2100	356	335	280	1650	2225	2730	2180
0.8	30	1700	10	1305	2900	1080	2840	1255	42	1020	1250	1055
0.9	45	1105	1250	3885	3170	2240	10	4250	620	35	10	45
1.0	45	1270	3350	1440	2280	240	10	60	1160	70	28	1385
1.1	90	14	2000	2280	7	35	35	60	90	14	35	2460
1.2	30	1000	10	85	35	35	20	175	90	10	2780	90
1.3	35	2340	80	10	25	70	2800	35	970	1335	35	10
1.4	30	1490	930	10	84	25	50	7	14	80	30	70

Cuadro B10. Valores de carbonatos (mmol L⁻¹), separación 100 m

Primer muestreo

X\Y	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
0.0	7	0	4	108	4	40	292	264	148	154	142	152
0.1	5	268	780	356	297	300	282	206	208	284	144	18
0.2	210	9	356	280	243	392	164	44	384	86	544	4
0.3	253	62	392	295	360	404	55	22	342	496	76	624
0.4	292	29	358	128	285	296	199	44	640	36	380	484
0.5	148	192	12	252	520	182	335	128	242	10	490	278
0.6	32	182	159	144	348	204	128	512	328	144	332	8
0.7	230	12	356	324	332	58	149	200	226	292	328	364
0.8	8	185	3	166	308	93	372	208	36	162	344	226
0.9	26	109	136	412	473	280	6	488	250	20	8	160
1.0	148	211	476	320	268	245	6	138	250	144	36	300
1.1	223	20	150	330	0	75	25	188	154	38	126	412
1.2	0	158	4	146	84	45	47	216	222	10	480	228
1.3	9	208	78	16	24	240	266	16	408	368	12	4
1.4	8	229	172	33	100	3	66	10	4	128	4	32

Segundo muestreo

X\Y	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
0.0	2	1	2	55	4	1	384	282	188	162	226	47
0.1	3	473	570	640	428	380	480	280	242	230	188	6
0.2	496	7	404	490	408	476	250	93	520	44	580	3
0.3	328	292	440	348	384	690	18	9	328	630	36	520
0.4	825	10	380	230	490	424	493	12	692	29	432	790
0.5	242	324	5	380	520	440	490	296	308	3	440	296
0.6	7	356	332	32	496	447	335	520	484	332	380	2
0.7	335	7	408	199	392	128	94	44	348	512	556	484
0.8	7	380	3	408	630	335	570	433	8	242	342	192
0.9	10	278	226	690	562	490	2	890	230	8	3	10
1.0	12	356	690	480	675	78	3	12	278	12	3	435
1.1	16	3	484	490	3	16	12	9	12	3	7	563
1.2	12	278	3	16	12	10	7	33	36	3	484	16
1.3	10	640	16	3	4	8	530	8	172	442	4	4
1.4	4	380	264	3	12	6	6	2	3	12	10	6

Cuadro B11. Valores de bicarbonatos (mmol L⁻¹), separación 100 m

Primer muestreo

X\Y	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
0.0	8	14	16	48	28	22	87	76	46	42	14	6
0.1	6	105	280	140	115	83	98	26	64	34	20	8
0.2	65	51	144	90	155	186	78	24	106	10	40	8
0.3	91	41	104	100	190	101	25	28	86	126	6	72
0.4	230	44	22	56	149	64	59	36	224	28	98	60
0.5	133	92	4	100	254	51	141	36	66	18	168	94
0.6	36	91	19	80	144	70	57	200	88	2	114	18
0.7	112	60	126	130	120	46	46	68	64	66	74	126
0.8	17	125	23	91	180	103	136	28	8	18	88	40
0.9	49	55	68	146	111	138	27	166	46	28	16	4
1.0	87	95	150	108	104	137	32	26	46	74	4	106
1.1	107	43	32	105	14	43	3	52	22	26	36	100
1.2	10	92	14	64	63	30	22	44	56	20	134	56
1.3	52	126	41	27	46	101	107	8	126	44	26	2
1.4	24	111	56	33	66	24	37	10	10	28	16	28

Segundo muestreo

X\Y	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
0.0	0	0	0	20	4	0	105	76	49	46	74	27
0.1	0	137	254	200	120	92	105	84	65	58	52	4
0.2	104	4	166	149	111	149	49	19	230	28	254	0
0.3	57	126	141	134	125	280	4	6	64	254	18	220
0.4	385	4	92	114	126	180	118	4	268	8	254	295
0.5	36	141	4	158	200	136	276	112	74	0	130	94
0.6	0	103	92	26	135	105	46	111	74	94	57	0
0.7	25	2	57	57	114	46	18	8	64	180	236	207
0.8	2	46	0	114	286	35	228	137	4	46	40	36
0.9	8	66	36	268	278	138	0	325	28	2	0	4
1.0	4	41	226	146	270	37	0	6	66	23	4	56
1.1	6	4	224	254	0	8	19	16	10	4	6	268
1.2	6	68	0	6	6	8	2	28	16	0	250	8
1.3	6	256	27	0	2	6	186	6	66	146	6	0
1.4	4	56	66	4	6	4	8	0	0	8	6	14

Cuadro B12. Valores de sulfatos (mmol L⁻¹), separación 100 m

Primer muestreo

X\Y	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
0.0	4.3	8.6	4.3	47.1	4.3	38.6	441.3	342.7	98.5	149.9	162.8	85.7
0.1	4.3	175.6	158.5	111.4	102.8	291.3	329.9	338.4	291.3	231.3	132.8	4.3
0.2	107.1	17.1	214.2	120.0	137.1	317.0	261.3	34.3	449.8	42.8	308.4	4.3
0.3	128.5	8.6	239.9	218.5	317.0	449.8	68.5	8.6	312.7	364.1	55.7	377.0
0.4	55.7	13.8	261.3	13.8	175.6	398.4	304.2	60.0	496.9	30.0	265.6	501.2
0.5	38.6	209.9	8.6	124.2	621.2	312.7	501.2	209.9	244.2	4.3	269.9	329.9
0.6	8.6	197.1	145.7	47.1	355.6	287.0	338.4	355.6	389.8	192.8	291.3	0.0
0.7	107.1	13.8	162.8	90.0	231.3	111.4	209.9	42.8	201.3	120.0	415.5	475.5
0.8	4.3	192.8	0.0	85.7	244.2	120.0	556.9	231.3	34.3	197.1	398.4	179.9
0.9	17.1	98.5	141.4	304.2	287.0	317.0	0.0	424.1	261.3	8.6	0.0	81.4
1.0	38.6	141.4	209.9	231.3	402.7	154.2	0.0	17.1	192.8	81.4	17.1	299.9
1.1	47.1	4.3	162.8	162.8	0.0	77.1	38.6	115.7	162.8	21.4	17.1	449.8
1.2	0.0	115.7	0.0	13.8	34.3	42.8	64.3	218.5	167.1	4.3	496.9	124.2
1.3	4.3	149.9	21.4	4.3	8.6	197.1	458.4	30.0	145.7	269.9	42.8	0.0
1.4	0.0	128.5	94.2	8.6	102.8	0.0	42.8	0.0	0.0	94.2	4.3	51.4

Segundo muestreo

X\Y	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
0.0	2.1	0.0	2.1	51.4	2.1	2.1	111.4	107.1	248.5	72.8	64.3	85.7
0.1	0.0	81.4	407.0	389.8	287.0	321.3	90.0	145.7	205.6	77.1	51.4	4.3
0.2	599.8	4.3	419.8	287.0	222.8	252.8	162.8	34.3	359.9	21.4	359.9	0.0
0.3	124.2	72.8	334.2	214.2	419.8	856.8	4.3	4.3	441.3	492.7	13.8	312.7
0.4	411.3	4.3	248.5	154.2	642.6	578.3	329.9	8.6	685.4	17.1	317.0	664.0
0.5	128.5	209.9	4.1	274.2	347.0	359.9	308.4	128.5	188.5	4.3	257.0	205.6
0.6	2.1	257.0	158.5	30.0	419.8	355.6	321.3	599.8	419.8	274.2	411.3	4.3
0.7	342.7	4.3	167.1	192.8	295.6	111.4	47.1	38.6	162.8	359.9	441.3	621.2
0.8	4.3	377.0	4.3	381.3	578.3	227.1	359.9	265.6	4.3	72.8	244.2	239.9
0.9	8.6	231.3	274.2	556.9	415.5	428.4	0.0	749.7	201.3	4.3	4.3	13.8
1.0	13.8	402.7	454.1	535.5	496.9	102.8	2.1	17.1	252.8	13.8	0.0	377.0
1.1	13.8	4.3	368.4	381.3	0.0	13.8	13.8	13.8	8.6	0.0	8.6	467.0
1.2	4.3	209.9	0.0	8.6	8.6	8.6	4.3	21.4	17.1	4.3	312.7	17.1
1.3	8.6	501.2	8.6	0.0	4.3	4.3	471.2	4.3	269.9	287.0	4.3	0.0
1.4	4.3	471.2	214.2	8.6	13.8	8.6	17.1	0.0	4.3	17.1	4.3	8.6

Cuadro B13. Valores de conductividad eléctrica (dS m⁻¹) y pH, separación 10 m

Conductividad eléctrica

X\Y	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.0	171.1	150.1	175.6	159.9	153.1	102.0	1.6	130.0	160.6	135.2	103.3
0.1	71.5	123.5	4.5	167.1	112.1	55.6	122.0	104.1	63.9	6.3	3.4
0.2	62.2	26.1	17.6	17.5	32.9	108.5	10.6	67.6	9.2	136.4	89.1
0.3	89.9	143.7	138.3	134.3	5.1	6.8	79.8	6.1	4.9	79.1	106.5
0.4	176.4	156.5	179.2	145.9	108.9	95.4	3.3	128.5	15.0	19.5	32.8
0.5	122.0	131.1	101.9	104.4	81.5	23.2	105.5	71.4	53.6	86.8	70.4
0.6	138.8	128.0	144.1	115.8	43.5	3.3	1.0	79.2	152.5	102.8	144.5
0.7	90.5	103.4	146.8	79.6	39.0	5.4	38.2	83.3	133.7	151.5	126.5
0.8	61.8	3.2	76.8	60.9	60.8	78.8	101.6	72.0	82.6	131.2	132.4
0.9	13.5	3.2	8.9	84.8	124.0	156.5	156.8	116.5	124.4	140.4	104.1
1.0	19.6	13.6	82.0	88.9	105.9	153.2	181.9	135.5	51.6	79.2	39.8

pH

X\Y	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.0	10.11	10.32	10.30	10.33	10.39	10.50	9.60	10.04	9.90	9.98	10.66
0.1	10.31	10.40	9.07	9.64	10.41	10.50	10.31	9.92	10.06	9.45	8.82
0.2	10.46	9.00	9.61	9.77	10.19	10.52	9.90	10.50	9.17	10.37	10.49
0.3	10.49	10.29	10.38	10.35	9.74	9.49	9.93	9.71	9.05	10.03	9.77
0.4	10.17	10.35	10.29	10.39	10.42	9.70	9.09	10.46	9.54	9.95	10.21
0.5	9.87	10.39	9.77	9.64	10.07	9.52	9.84	10.00	9.91	9.96	9.74
0.6	10.35	9.68	9.57	9.67	9.77	9.07	8.88	9.66	9.75	10.47	10.31
0.7	9.92	10.27	9.86	9.86	9.62	9.57	10.06	9.71	9.74	9.62	9.62
0.8	9.92	10.27	9.86	9.86	9.62	9.57	10.06	9.71	9.74	9.62	9.62
0.9	9.34	8.62	9.30	9.59	9.63	9.85	9.85	9.84	10.00	9.96	10.10
1.0	9.66	9.52	10.19	10.21	9.51	10.20	9.54	9.41	9.72	10.21	9.71

Cuadro B14. Valores de sodio y potasio (mmol L⁻¹), separación 10 m

Sodio											
XY	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.0	6703	4659	6731	4532	4284	1618	13	3549	6340	3584	1563
0.1	1116	3381	40	6721	3135	540	3292	1665	942	62	28
0.2	642	253	174	155	255	1350	106	1698	113	3549	1925
0.3	1912	3701	3612	3227	77	84	1725	59	47	1798	1935
0.4	6955	5746	7227	3834	2210	1813	48	3921	267	299	338
0.5	3026	4350	1712	1737	1239	222	2037	1992	819	1350	1112
0.6	4034	3388	4174	3109	565	49	8	1514	5026	1985	4174
0.7	2140	1746	4388	2150	435	48	574	1446	3493	4493	3550
0.8	1269	28	1572	1305	1388	1640	2982	1397	1986	3537	3401
0.9	225	41	130	1572	3353	4803	4803	2525	3521	5013	1930
1.0	257	147	1461	1557	2821	4384	7215	4353	854	1908	531

Potasio											
XY	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.0	365	237	312	202	195	173	1	212	296	178	103
0.1	129	204	3	345	178	45	165	100	87	7	3
0.2	50	10	13	12	14	102	34	145	19	148	96
0.3	175	204	219	235	6	7	155	8	6	185	165
0.4	370	240	395	234	196	145	6	267	18	25	36
0.5	275	389	147	156	125	18	185	169	74	150	142
0.6	264	210	244	195	48	3	1	138	298	176	274
0.7	185	163	184	204	36	4	55	126	230	265	224
0.8	138	3	140	118	121	132	228	118	175	238	219
0.9	19	38	11	135	223	278	265	202	256	289	188
1.0	18	13	136	144	229	250	410	261	76	175	49

Cuadro B15. Valores de calcio y magnesio (mmol L⁻¹), separación 10 m

Calcio

X\Y	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.0	0.6	0.6	0.3	0.5	0.3	0.4	0.5	0.5	0.0	0.5	0.5
0.1	0.4	0.8	0.5	0.5	0.0	0.4	0.3	0.3	0.7	0.6	0.1
0.2	0.5	0.5	0.5	0.1	0.2	0.5	0.5	0.1	0.5	0.1	0.1
0.3	0.2	0.4	0.2	0.3	0.3	0.5	0.5	0.4	0.3	0.1	0.4
0.4	0.3	0.1	0.1	0.2	0.4	0.2	0.4	0.4	0.3	0.2	0.4
0.5	0.2	0.2	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.5	0.2	0.5	0.4
0.6	0.3	0.3	0.2	0.2	0.3	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1
0.7	0.2	0.1	0.2	0.1	0.4	0.3	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2
0.8	0.3	0.3	0.2	0.6	0.5	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.5
0.9	0.6	0.3	0.6	0.4	0.5	0.4	0.3	0.5	0.2	0.3	0.3
1.0	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2	0.6	0.3	0.6	0.3	0.2	0.4

Magnesio

X\Y	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.0	0.5	0.5	0.7	0.5	0.3	0.5	0.5	0.2	0.3	0.3	0.6
0.1	0.2	0.4	0.6	0.4	0.3	0.1	0.9	0.6	0.1	0.4	0.3
0.2	0.5	0.5	0.4	0.5	0.8	0.7	0.3	0.3	0.9	0.1	0.4
0.3	0.4	0.3	0.4	0.6	0.5	0.2	0.2	0.4	0.4	0.2	0.3
0.4	0.5	0.3	0.6	0.5	0.6	0.5	0.4	0.5	0.5	0.6	0.3
0.5	0.3	0.0	0.3	0.2	0.5	0.4	0.2	0.3	0.4	0.3	0.2
0.6	0.4	0.3	0.4	0.4	0.3	0.8	0.3	0.4	0.4	0.5	0.4
0.7	0.4	0.3	0.4	0.3	0.4	0.4	0.3	0.4	0.3	0.3	0.5
0.8	0.5	0.4	0.1	0.4	0.3	0.2	0.4	0.6	0.2	0.2	0.3
0.9	0.3	0.3	0.3	0.3	0.5	0.3	0.3	0.4	0.8	0.5	0.5
1.0	0.2	0.4	0.4	0.3	0.2	0.4	0.4	0.6	0.4	0.3	0.4

Cuadro B16. Valores de RAS y PSI, separación 10 m

RAS

X\Y	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.0	6464.9	4442.2	6905.9	4476.4	5530.6	1705.5	13.5	4098.0	11575.2	4138.4	1525.3
0.1	1406.0	3024.1	38.6	7399.6	5499.2	745.3	3037.0	1805.9	1037.1	63.6	45.7
0.2	658.7	256.2	186.0	219.2	258.2	1232.4	118.5	2531.2	99.1	7935.8	2910.3
0.3	2638.8	4590.5	4663.1	3500.2	88.4	102.2	2099.6	64.0	59.5	3428.7	2312.8
0.4	8312.8	9712.5	8964.0	4666.6	2238.2	2166.9	53.7	4383.8	303.3	339.6	411.4
0.5	4641.7	9726.9	2083.8	2936.1	1455.1	299.3	3326.4	2380.9	1036.0	1533.5	1499.4
0.6	5102.7	4675.9	5760.7	4290.8	799.0	45.7	11.6	2089.5	6488.5	2462.1	5760.7
0.7	2885.6	2851.2	5550.4	3510.9	494.1	59.5	811.8	1995.7	5207.1	6519.1	4403.2
0.8	1465.3	34.7	2757.5	1375.6	1616.2	2479.4	3849.7	1442.8	3483.7	5978.6	3960.3
0.9	244.0	56.6	139.0	1800.2	3440.1	6015.5	6792.5	2590.6	3565.9	5604.7	2124.9
1.0	394.2	175.7	1812.1	2259.1	4205.3	4330.2	8473.6	4059.2	1020.7	2698.3	613.1

PSI

X\Y	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.0	99.0	98.5	99.0	98.5	98.8	96.2	15.7	98.4	99.4	98.4	95.7
0.1	95.4	97.8	35.8	99.1	98.8	91.7	97.8	96.4	93.9	48.1	39.8
0.2	90.7	79.0	73.2	76.3	79.2	94.8	63.4	97.4	59.2	99.2	97.7
0.3	97.5	98.5	98.6	98.1	56.3	59.9	96.9	48.2	46.4	98.1	97.2
0.4	99.2	99.3	99.2	98.6	97.1	97.0	43.8	98.5	81.7	83.3	85.8
0.5	98.6	99.3	96.8	97.7	95.5	81.5	98.0	97.2	93.9	95.8	95.7
0.6	98.7	98.6	98.8	98.4	92.2	39.8	13.7	96.9	99.0	97.3	98.8
0.7	97.7	97.7	98.8	98.1	87.9	46.4	92.3	96.7	98.7	99.0	98.5
0.8	95.6	33.3	97.6	95.3	96.0	97.3	98.3	95.5	98.1	98.9	98.3
0.9	78.2	45.1	67.1	96.4	98.1	98.9	99.0	97.4	98.1	98.8	96.9
1.0	85.3	72.1	96.4	97.1	98.4	98.5	99.2	98.4	93.8	97.5	90.0

Cuadro B17. Valores de carbonatos y bicarbonatos (mmol L⁻¹), separación 10 m

Carbonatos

X\Y	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.0	305.0	280.0	320.0	327.5	306.0	193.5	0.5	291.5	335.5	226.0	157.0
0.1	80.5	223.0	1.0	345.0	206.5	57.0	196.0	134.5	75.5	7.0	2.0
0.2	117.0	86.5	20.0	18.5	23.0	147.0	12.0	166.0	10.5	192.0	100.0
0.3	106.5	327.5	315.0	210.5	2.0	2.5	140.0	3.0	2.5	108.0	144.0
0.4	355.0	302.5	360.5	47.0	166.5	210.5	1.0	211.0	18.5	21.5	26.5
0.5	185.5	203.0	124.0	127.0	81.0	25.5	144.5	74.0	59.5	122.0	136.5
0.6	240.0	206.0	235.5	230.0	120.0	29.0	0.5	105.0	303.5	200.5	328.0
0.7	222.0	211.0	341.5	150.5	31.5	2.0	29.5	104.0	215.0	266.5	254.5
0.8	135.5	2.0	85.0	150.5	152.0	81.0	178.0	78.5	87.0	211.5	216.0
0.9	20.0	2.0	11.0	82.0	204.5	296.0	294.0	240.0	231.5	296.0	202.0
1.0	56.5	31.0	86.5	79.5	198.5	281.5	367.0	215.5	80.5	137.5	63.0

Bicarbonatos

X\Y	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.0	265	224	248	265	258	140	0	265	274	138	126
0.1	45	118	4	254	149	32	128	119	42	6	4
0.2	72	42	26	18	27	126	10	128	10	104	76
0.3	58	255	230	180	4	4	140	4	4	72	130
0.4	288	264	278	42	136	156	0	162	28	28	20
0.5	124	149	74	130	49	20	126	38	32	78	130
0.6	137	140	146	137	82	18	0	65	248	162	280
0.7	120	108	280	128	30	0	20	49	149	245	226
0.8	126	0	49	134	134	42	98	42	49	163	470
0.9	28	0	10	49	164	258	240	188	165	226	149
1.0	32	26	49	42	140	254	296	165	46	118	40

Cuadro B18. Valores de cloruros y sulfatos (mmol L⁻¹), separación 10 m

Cloruros

X\Y	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.0	3650	3160	3625	3315	3295	1635	10	1565	3240	1710	1380
0.1	635	1740	30	3460	1280	785	1425	1820	970	50	30
0.2	920	180	125	120	150	1795	75	970	70	1740	700
0.3	695	2850	2660	2615	45	60	625	60	45	640	1795
0.4	3645	3265	3660	3100	1960	1220	30	125	90	125	155
0.5	1280	2280	1460	1775	700	180	1790	620	460	625	590
0.6	2210	1860	3110	1650	850	25	10	620	2455	1600	3025
0.7	1160	1580	2445	675	195	50	205	675	2260	3250	1345
0.8	485	30	660	510	500	640	1535	635	620	1650	1550
0.9	125	30	80	650	1650	3385	3400	1315	1380	1885	1875
1.0	175	130	655	710	1790	3410	3675	2290	785	1110	165

Sulfatos

X\Y	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.0	353.3	374.8	289.0	214.0	201.3	53.5	1.1	141.3	364.0	137.0	59.8
0.1	36.3	137.0	2.1	374.8	42.8	89.8	128.5	55.5	40.5	2.1	2.1
0.2	38.5	23.5	14.3	14.3	38.5	57.8	4.3	27.8	4.3	137.0	32.0
0.3	34.3	169.0	190.5	188.3	2.1	2.1	40.5	2.1	2.1	122.0	57.8
0.4	417.5	257.0	428.3	173.5	59.8	42.8	1.1	145.5	8.5	10.5	12.8
0.5	137.0	214.0	98.5	102.8	122.0	23.5	55.5	38.5	25.5	32.0	29.8
0.6	188.3	158.5	169.0	47.0	19.3	1.1	0.0	38.5	201.3	59.8	184.0
0.7	36.3	57.8	167.0	74.8	53.5	2.1	51.3	29.8	184.0	267.8	218.3
0.8	40.5	1.1	77.0	34.3	34.3	77.0	53.5	38.5	119.8	241.3	218.3
0.9	8.5	1.1	2.1	122.0	254.8	278.3	310.5	111.3	139.0	227.0	55.5
1.0	23.5	8.5	79.3	83.5	57.8	289.0	428.3	231.3	19.3	29.8	14.8

Cuadro C1. Variables evaluadas para *Distichlis spicata*

X	Y	Biomasa g m ⁻² 240día ⁻¹	Ceniza %	Na ⁺ mmol 100g ⁻¹	K ⁺ mmol 100g ⁻¹	Na ⁺ /K ⁺
0.0	0.0	437.6	11.63	11.60	17.96	0.65
0.0	0.1	286.4	9.06	18.76	30.82	0.61
0.0	0.2	332.2	9.30	19.40	17.60	1.10
0.0	0.4	548.5	6.32	15.18	14.53	1.05
0.1	0.0	416.2	10.20	24.50	13.20	1.85
0.1	1.1	378.5	8.82	30.39	10.47	2.90
0.2	0.1	177.8	5.87	12.82	15.04	0.85
0.2	1.1	487.4	18.82	8.14	11.93	0.68
0.3	0.7	370.2	10.78	45.21	17.95	2.52
0.3	1.0	270.1	11.54	45.09	12.10	3.73
0.4	0.1	309.6	7.87	10.53	18.69	0.56
0.5	0.9	476.5	12.40	30.73	33.83	0.91
0.6	1.1	440.3	9.32	16.39	15.61	1.05
0.7	0.1	258.9	8.17	8.91	12.27	0.73
0.7	0.7	167.8	12.30	40.19	10.93	3.68
0.8	0.0	314.4	8.44	5.86	13.94	0.42
0.8	0.2	365.4	22.41	31.10	10.95	2.84
0.8	0.8	271.4	9.94	35.10	20.00	1.76
0.9	0.0	286.2	14.60	33.00	19.40	1.70
0.9	0.6	422.3	10.98	16.70	17.99	0.93
0.9	0.9	247.7	11.47	37.92	23.00	1.65
0.9	1.0	438.3	8.90	24.40	18.10	1.34
1.0	0.8	389.4	6.36	13.81	17.01	0.81
1.0	1.0	125.8	10.70	25.41	17.30	1.47
1.1	0.5	256.4	7.61	48.59	20.79	2.34
1.1	0.6	276.5	9.82	37.44	27.13	1.38
1.1	0.9	233.5	17.24	78.06	17.05	4.58
1.2	0.0	345.0	7.78	8.98	21.07	0.43
1.2	0.2	224.8	7.85	6.41	16.20	0.40
1.2	0.6	264.8	12.66	26.94	25.62	1.05
1.2	0.9	386.4	11.61	56.31	12.06	4.67
1.3	0.0	183.6	10.73	39.50	15.39	2.57
1.3	0.3	217.0	9.21	47.40	17.49	2.71
1.3	0.4	289.3	13.46	45.62	14.68	3.11
1.3	0.7	265.4	7.81	29.84	24.09	1.24
1.3	1.0	324.9	11.36	38.76	30.93	1.25
1.4	0.0	308.4	11.96	11.65	22.45	0.52
1.4	0.5	364.2	8.86	17.92	20.47	0.88
1.4	0.6	281.0	8.30	22.30	24.20	0.92
1.4	0.7	197.6	7.93	7.50	6.41	1.17
1.4	0.8	386.7	10.37	12.01	8.17	1.47
1.4	1.1	177.3	5.92	17.34	16.18	1.07

Cuadro C2. Variables evaluadas para *Sporobolus pyramidatus*

X	Y	Biomasa g m ⁻² 240día ⁻¹	Ceniza %	Na ⁺ mmol 100g ⁻¹	K ⁺ mmol 100g ⁻¹	Na ⁺ /K ⁺
0.0	0.5	58.3	10.50	30.48	8.27	3.69
0.2	0.9	66.0	11.70	37.68	15.49	2.43
0.3	0.6	47.6	7.74	68.87	19.80	3.48
0.4	0.7	76.3	49.95	39.95	12.21	3.27
0.4	0.9	84.1	7.74	28.59	9.46	3.02
0.6	0.0	46.2	9.38	52.15	16.53	3.15
0.9	0.9	68.7	6.81	30.87	13.74	2.25
0.9	1.1	46.3	14.74	97.20	31.90	3.05
1.0	0.0	36.4	10.26	18.75	10.08	1.86
1.0	0.9	46.0	27.20	41.98	12.47	3.37
1.0	1.0	30.5	5.08	25.82	9.75	2.65
1.1	0.1	54.2	5.95	26.12	9.53	2.74
1.1	0.4	78.3	7.34	22.87	14.88	1.54
1.1	0.6	57.9	6.40	140.92	56.69	2.49
1.2	0.4	53.0	3.11	212.09	60.89	3.48
1.2	0.8	40.0	10.48	31.83	17.93	1.78
1.2	1.1	76.8	7.03	60.70	35.61	1.70
1.3	0.7	45.7	6.09	28.77	12.38	2.32
1.3	1.1	89.3	8.20	39.74	12.87	3.09
1.4	0.3	46.5	9.40	32.43	16.82	1.93
1.4	1.0	54.3	11.48	41.58	17.01	2.44

Cuadro C3. Variables evaluadas para *Suadea torreyana*

X	Y	Biomasa g m ⁻² 240día ⁻¹	Ceniza %	Na ⁺ mmol 100g ⁻¹	K ⁺ mmol 100g ⁻¹	Na ⁺ /K ⁺
0.0	0.1	76.5	17.48	185.64	21.02	8.83
0.0	0.2	68.7	25.46	251.64	32.60	7.72
0.0	0.5	316.3	22.67	182.05	35.27	5.16
0.0	1.1	166.8	51.51	303.94	21.24	14.31
0.1	1.1	129.3	27.48	340.14	29.10	11.69
0.2	0.1	84.5	31.61	466.99	36.02	12.96
0.2	0.9	231.4	28.87	314.59	17.49	17.98
0.3	0.6	98.0	21.48	243.02	21.07	11.53
0.3	0.7	146.2	22.33	298.35	35.47	8.41
0.3	1.0	197.5	28.06	299.81	29.73	10.08
0.4	0.1	96.8	20.09	234.56	18.89	12.41
0.4	0.7	284.5	26.13	219.82	21.72	10.12
0.4	0.9	302.3	28.08	273.21	25.96	10.53
0.5	0.2	264.0	23.01	211.13	41.02	5.15
0.5	0.9	34.7	17.75	189.29	22.14	8.55
0.6	0.0	165.4	22.13	151.32	19.91	7.60
0.6	0.3	165.8	35.83	337.61	25.39	13.29
0.7	0.1	102.7	22.47	257.12	17.18	14.97
0.7	0.6	117.3	21.74	306.24	21.47	14.26

Cuadro C3. Variables evaluadas para *Suaeda torreyana* (cont.)

X	Y	Biomasa g m ⁻² 240día ⁻¹	Ceniza %	Na ⁺ mmol 100g ⁻¹	K ⁺ mmol 100g ⁻¹	Na ⁺ /K ⁺
0.7	0.7	116.4	28.79	372.40	37.84	9.84
0.8	0.2	146.0	9.10	101.84	21.95	4.64
0.8	0.8	166.2	22.94	319.29	44.49	7.18
0.9	0.0	126.9	25.50	231.65	15.78	14.68
0.9	0.9	129.0	22.50	273.83	30.94	8.85
0.9	1.1	127.8	33.97	353.19	28.78	12.27
1.0	0.0	179.2	24.88	310.06	21.90	14.16
1.0	0.5	175.8	27.96	414.05	26.80	15.45
1.0	0.6	103.2	17.36	170.49	20.92	8.15
1.0	0.7	105.5	36.08	513.25	38.36	13.38
1.0	0.9	219.3	53.32	467.26	35.36	13.21
1.0	1.0	134.6	42.34	399.51	44.80	8.92
1.1	0.0	299.6	23.88	188.34	21.72	8.67
1.1	0.1	284.5	18.48	171.04	15.81	10.82
1.1	0.4	305.0	20.15	172.17	16.66	10.34
1.1	0.5	113.5	28.84	402.96	31.69	12.71
1.1	0.6	125.4	26.94	393.29	30.16	13.04
1.1	0.7	226.8	36.58	469.43	30.83	15.23
1.1	0.8	98.5	31.67	349.41	31.53	11.08
1.1	0.9	119.2	22.43	189.33	25.60	7.40
1.1	1.0	250.1	24.70	340.64	26.29	12.96
1.2	0.0	166.7	20.73	215.55	26.05	8.28
1.2	0.2	28.0	19.67	266.35	16.33	16.31
1.2	0.3	116.1	48.04	191.24	27.25	7.02
1.2	0.4	187.3	23.45	235.38	23.57	9.99
1.2	0.5	287.8	20.03	191.08	15.95	11.98
1.2	0.6	126.3	19.24	172.48	22.93	7.52
1.2	0.7	147.6	25.82	285.20	17.23	16.55
1.2	1.1	268.5	31.91	513.05	36.74	13.96
1.3	0.0	175.9	28.92	325.71	39.45	8.26
1.3	0.2	184.4	19.86	201.79	19.89	10.15
1.3	0.3	124.1	34.30	417.45	31.30	13.34
1.3	0.4	135.5	25.53	213.30	30.93	6.90
1.3	0.5	189.5	28.25	265.93	31.01	8.58
1.3	0.7	134.2	25.44	337.86	21.35	15.82
1.3	1.0	186.4	28.16	329.90	28.39	11.62
1.3	1.1	346.4	22.34	204.79	26.37	7.77
1.4	0.3	179.3	22.90	173.86	37.28	4.66
1.4	0.4	262.0	27.65	413.89	27.86	14.86
1.4	0.5	78.7	22.17	237.05	15.08	15.72
1.4	0.9	265.4	28.10	299.99	19.51	15.37
1.4	1.0	336.5	28.41	79.60	14.83	5.37
1.4	1.1	185.6	24.69	289.85	26.21	11.06

ANEXO D.**ECUACIONES DE LAVADO DE SUELOS.**

1. Ecuación de Rozov (FAO/UNESCO, 1973; Aceves, 1981; González, 1982;):

$$N = \Pi - m + n\Pi$$

Donde:

N = lámina de lavado en m^3/ha .

Π = contenido de agua a capacidad de campo en m^3/ha .

m = reserva de agua en el suelo antes de aplicar el lavado, m^3/ha .

n = coeficiente que depende del tipo de salinidad y textura del suelo, su valor oscila entre 0.5 y 2.

2. Ecuación de Kovda (Elgabali, 1971; FAO/UNESCO, 1973):

$$Y = n1 \cdot n2 \cdot n3 \cdot 400x \pm 100$$

Donde:

Y = lámina de lavado en mm para lavar el suelo a la profundidad de 2 m.

$n1$ = coeficiente que depende de la textura y posee valores de 0.5 para suelos arenosos, 1 para suelos francos y 2 para arcillosos.

$n2$ = coeficiente que depende de la profundidad del nivel freático y posee valores de 1 si el nivel se encuentra entre 7 y 10 metros, de 1.5 si está entre 2 y 5 metros, y de 3 si está entre 1.5 y 2 metros de profundidad.

$n3$ = coeficiente que depende del contenido de sales en el manto freático, posee valores de 1 para salinidad baja, 2 para salinidad alta y 3 para salinidad muy alta.

x = contenido de sales del suelo, en %.

3. Ecuación de Volobúyev (Volobúyev, 1959; FAO/UNESCO, 1973):

$$N = \log \left(\frac{Si}{So} \right)^\alpha \quad N = \alpha \cdot \log \frac{Si}{So}$$

Donde:

N = lámina de lavado en m^3/ha para lavar el suelo a la profundidad de 1 m.

Si = contenido inicial de sales, en unidades de concentración (% o ton/ha).

So = contenido de sales admisible por el cultivo (mismas unidades que el anterior).

α = coeficiente que depende de la textura y tipo de salinidad del suelo. Sus valores son:

	salinidad clorhídrica	Salinidad clorhídrico-sulfática	salinidad sulfática	salinidad carbonática
Suelos arcillosos	1.2	1.3	1.4	1.8
Suelos francos	0.9	1.0	1.1	1.5
Suelos arenosos	0.6	0.7	0.8	1.2

Para incluir otras profundidades de lavado, existe la siguiente modificación (Aidárov *et al*, 1985):

$$N = \alpha \cdot \log \frac{S_i}{S_x} + \frac{\alpha}{\mu} \cdot x$$

Donde:

N = lámina de lavado, en m^3/ha para lavar el suelo a la profundidad x .

S_x = contenido de sales necesario al final del lavado a la profundidad x .

μ = coeficiente que toma en cuenta la velocidad de drenaje de las aguas de lavado (depende de la velocidad de infiltración y de la distancia de separación entre drenes).

x = profundidad necesaria a desalinizar, en m.

S_i y α tienen el mismo significado que en la ecuación anterior.

Una modificación importante que ha sufrido la ecuación de Volobúyev consiste en cambiar los valores S_i y S_o , que expresan concentración de sales, por valores de conductividad eléctrica (De la Peña, 1982). La ecuación queda como:

$$L = \alpha \cdot \log \frac{CE_i}{CE_f} \quad L = \log \left(\frac{CE_i}{CE_f} \right)^\alpha$$

Donde:

L = lámina de lavado en m para lavar el suelo a la profundidad de 1 m.

CE_i = conductividad eléctrica inicial, medida en el extracto de saturación, $dS m^{-1}$.

CE_f = conductividad eléctrica deseada o permisible por el cultivo, $dS m^{-1}$.

α = mismos valores que en las ecuaciones anteriores.

4. Ecuación de Sejas (Aceves, 1979):

$$L = 9.0(p)^{0.75} \left(\frac{70 - CE_r}{CE_i - CE_r} \right)^{0.3} \log \frac{CE_i}{CE_f}$$

Donde:

L = lámina de lavado en cm para lavar el suelo a la profundidad p .

CE_i = conductividad eléctrica inicial, medida en el extracto de saturación, $dS m^{-1}$.

CE_f = conductividad eléctrica deseada o permisible por el cultivo, $dS m^{-1}$.

CE_r = conductividad eléctrica del agua de riego, $dS m^{-1}$.

p = profundidad del suelo a lavar, cm.

5. Ecuación de Panin (González, 1982; López, 1988):

$$Qa = \Pi K \ln \frac{Si}{So}$$

Donde:

Qa = norma activa de lavado (unidades de volumen poroso) en m^3/ha .

Π = contenido de humedad en el suelo a capacidad de campo, en m^3/ha .

K = coeficiente que expresa la dependencia de la capacidad de lixiviar sales de los suelos con respecto a la composición química de las sales.

Si = contenido inicial de sales en el espesor de suelo a lavar, ton/ha.

So = contenido residual de sales del espesor lavado, ton/ha.

6. Ecuación de Safonov (López, 1988):

$$Qa = 28.6 \cdot \Pi \left(\frac{Si - So}{Si} \right)^{2.7}$$

Donde:

Qa = norma activa de lavado en m^3/ha .

Π = contenido de humedad del suelo a saturación, en m^3/ha .

Si y So tienen el mismo significado que en la ecuación anterior.

7. Ecuación de Safonov, Galinskiy y Mitronkin (González, 1982):

$$Q = \left(\frac{100}{a} \right)^{\frac{1}{b}} \cdot \Pi \left(\frac{Si - So}{Si} \right)^{\frac{1}{b}}$$

Donde:

Q = lámina de lavado en cm.

Π = constante de lavado en cm.

a y b = parámetros de la función.

Si y So tienen el mismo significado que en la ecuación anterior.

8. Ecuación de Legostayev (González, 1982):

$$N = 100hj \left[(Bo - B) + \frac{Si - S_2}{k} \right]$$

Donde:

N = lámina de agua de lavado, m.

h = profundidad de suelo a desalinizar, m.

j = densidad aparente del suelo, ton/m^3

Bo = contenido de agua a saturación del suelo a la profundidad h , %.

B = contenido de agua inicial en el suelo a la profundidad h , %.

Si = concentración inicial de sales, %.

S_2 = concentración permisible de sales, %.

k = coeficiente de extracción de sales, ton/m^3 .

9. Ecuación de Musichuc (FAO/UNESCO, 1973):

$$N = M - m + \frac{H - h}{Z_o} \cdot 10000$$

Donde:

N = lámina de lavado, m^3/ha .

M = capacidad a saturación de la capa de suelo sujeta a lavado, m^3/ha .

m = contenido de agua en el suelo antes del lavado, m^3/ha .

H = profundidad del nivel freático antes del lavado, m.

h = profundidad permisible del nivel freático después de lavar, m.

Z_o = relación entre la altura a la que se eleva el nivel freático ($H-h$) y la profundidad del agua aplicada.

10. Ecuación de Pizarro (Pizarro, 1978):

$$C_{cc} = C_i + [C^0_{cc} - \alpha C_i] e^{-\frac{R}{Hc}}$$

Donde:

C_{cc} = conductividad eléctrica del suelo a capacidad de campo después del lavado, $dS m^{-1}$.

C_i = conductividad eléctrica del agua de riego, $dS m^{-1}$.

C^0_{cc} = conductividad eléctrica inicial del suelo a capacidad de campo, $dS m^{-1}$.

α = factor de la capacidad de campo al momento del lavado, < de 1.

e = base de los logaritmos naturales, = 2.718

f = factor que indica la fracción de agua infiltrada en el suelo, depende de la textura; $f < 1$.

R = lámina de agua aplicada, mm.

Hc = cantidad de agua retenida por la zona radicular a capacidad de campo, mm.

11. Ecuación de Hoffman (Oster *et al*, 1989; Tanji, 1990):

$$\frac{C}{C_o} = \frac{k}{\left(\frac{D}{D_s}\right)}$$

Donde:

C = concentración de sales del suelo.

C_o = concentración inicial de sales en el suelo (C y C_o se expresan en las mismas unidades).

k = coeficiente empírico que depende de la textura y vale de 0.1 (suelos arenosos) a 0.3 (suelos arcillosos) y 0.45 (suelos orgánicos), bajo lavado por inundación permanente, o vale 0.1 bajo inundación intermitente para todos tipos de suelo.

D = lámina de agua de lavado aplicada.

D_s = profundidad del suelo a lavar (D y D_s se expresan en las mismas unidades).

ANEXO E. Análisis de varianza (ANOVA)

VARIABLES EVALUADAS DURANTE EL PROCESO DE MEJORAMIENTO DEL SUELO.

Cuadro E1. ANOVA para el pH (1).

	G.L.	S.C.	C.M.	f.c.	f 5%	f 1%
Total	8	0.4				
Bloques	2	0.1	0.0	1.6	6.94	18
Tratamientos	2	0.3	0.1	7.4		
Error	4	0.1	0.0			

Cuadro E2. ANOVA para la conductividad eléctrica (1).

	G.L.	S.C.	C.M.	f.c.	f 5%	f 1%
Total	8	1947.0				
Bloques	2	237.8	118.9	0.5	6.94	18
Tratamientos	2	1072.7	536.3	2.5		
Error	4	874.3	218.6			

Cuadro E3. ANOVA para el sodio (1).

	G.L.	S.C.	C.M.	f.c.	f 5%	f 1%
Total	8	779516.2				
Bloques	2	101110.9	50555.4	0.4	6.94	18
Tratamientos	2	290410.9	145205.4	1.2		
Error	4	489105.3	122276.3			

Cuadro E4. ANOVA para la suma de calcio + magnesio (1).

	G.L.	S.C.	C.M.	f.c.	f 5%	f 1%
Total	8	47.7				
Bloques	2	2.4	1.2	0.4	6.94	18
Tratamientos	2	35.0	17.5	7.9		
Error	4	12.7	2.2			

Cuadro E5. ANOVA para la relación de adsorción de sodio (1).

	G.L.	S.C.	C.M.	f.c.	f 5%	f 1%
Total	8	169543.6				
Bloques	2	50513.6	25256.8	0.7	6.94	18
Tratamientos	2	25232.9	12616.4	0.3		
Error	4	144310.7	36077.7			

Cuadro E6. ANOVA para el porcentaje de sodio intercambiable (1).

	G.L.	S.C.	C.M.	f.c.	f 5%	f 1%
Total	8	112.0				
Bloques	2	34.5	17.2	0.7	6.94	18
Tratamientos	2	16.3	8.2	0.3		
Error	4	95.7	23.9			

Cuadro E7. ANOVA para los cloruros (1).

	G.L.	S.C.	C.M.	f.c.	f 5%	f 1%
Total	8	190572.2				
Bloques	2	31772.2	15886.1	0.5	6.94	18
Tratamientos	2	57905.6	28952.8	0.9		
Error	4	132666.7	33166.7			

Cuadro E8. ANOVA para los carbonatos (1).

	G.L.	S.C.	C.M.	f.c.	f 5%	f 1%
Total	8	11696.0				
Bloques	2	2072.0	1036.0	0.4	6.94	18
Tratamientos	2	34.7	17.3	0.0		
Error	4	11661.3	2915.3			

Cuadro E9. ANOVA para los bicarbonatos (1).

	G.L.	S.C.	C.M.	f.c.	f 5%	f 1%
Total	8	2464.0				
Bloques	2	130.7	65.3	0.5	6.94	18
Tratamientos	2	1954.7	977.3	7.7		
Error	4	509.3	127.3			

Cuadro E10. ANOVA para el pH (2).

	G.L.	S.C.	C.M.	f.c.	f 5%	f 1%
Total	8	0.3				
Bloques	2	0.0	0.0	0.2	6.94	18
Tratamientos	2	0.3	0.1	10.7		
Error	4	0.1	0.0			

Cuadro E11. ANOVA para la conductividad eléctrica (2).

	G.L.	S.C.	C.M.	f.c.	f 5%	f 1%
Total	8	479.8				
Bloques	2	93.8	46.9	0.5	6.94	18
Tratamientos	2	90.6	45.3	0.5		
Error	4	389.2	97.3			

Cuadro E12. ANOVA para el sodio (2).

	G.L.	S.C.	C.M.	f.c.	f 5%	f 1%
Total	8	377208.0				
Bloques	2	105920.7	52960.3	0.8	6.94	18
Tratamientos	2	105348.7	52674.3	0.8		
Error	4	271859.3	67964.8			

Cuadro E13. ANOVA para la suma de calcio + magnesio (2).

	G.L.	S.C.	C.M.	f.c.	f 5%	f 1%
Total	8	14.3				
Bloques	2	0.1	0.1	0.1	6.94	18
Tratamientos	2	11.1	5.6	7.0		
Error	4	3.2	0.8			

Cuadro E14. ANOVA para la relación de adsorción de sodio (2).

	G.L.	S.C.	C.M.	f.c.	f 5%	f 1%
Total	8	583196.2				
Bloques	2	40890.9	20445.4	0.7	6.94	18
Tratamientos	2	472078.2	236039.1	8.5		
Error	4	111118.0	27779.5			

Cuadro E15. ANOVA para el porcentaje de sodio intercambiable (2).

	G.L.	S.C.	C.M.	f.c.	f 5%	f 1%
Total	8	56.7				
Bloques	2	5.8	2.9	0.5	6.94	18
Tratamientos	2	35.3	17.7	3.3		
Error	4	21.3	5.3			

Cuadro E16. ANOVA para los cloruros (2).

	G.L.	S.C.	C.M.	f.c.	f 5%	f 1%
Total	8	58081.6				
Bloques	2	12448.2	6224.1	0.5	6.94	18
Tratamientos	2	5824.9	2912.4	0.2		
Error	4	52256.7	13064.2			

Cuadro E17. ANOVA para los carbonatos (2).

	G.L.	S.C.	C.M.	f.c.	f 5%	f 1%
Total	8	20251.6				
Bloques	2	497.6	248.8	0.1	6.94	18
Tratamientos	2	11122.9	5561.4	2.4		
Error	4	9128.7	2282.2			

Cuadro E18. ANOVA para los bicarbonatos (2).

	G.L.	S.C.	C.M.	f.c.	f 5%	f 1%
Total	8	358.2				
Bloques	2	182.9	91.4	1.1	6.94	18
Tratamientos	2	32.9	16.4	0.2		
Error	4	325.3	81.3			

ESTABLECIMIENTO DE HALOFITAS

Cuadro E19. ANOVA para *Sporobolus pyramidatus*

	gl	SC	CM	Fobs	f 5%	f 1%
Total	8	0.018				
Bloques	2	0.001	0.000	0.134	6.94	18
Tratamientos	2	0.007	0.004	1.433		
Error	4	0.010	0.003			

Cuadro E20. ANOVA para *Distichlis spicata*

	gl	SC	CM	Fobs	f 5%	f 1%
Total	8	4.4				
Bloques	2	0.2	0.1	1.3	6.94	18
Tratamientos	2	4.0	2.0	22.4		
Error	4	0.4	0.1			

Cuadro E21. ANOVA para *Suaeda torreyana* 1

	gl	SC	CM	Fobs	f 5%	f 1%
Total	8	488.8				
Bloques	2	118.4	59.2	0.8	6.94	18
Tratamientos	2	190.4	95.2	1.3		
Error	4	298.4	74.6			

Cuadro E22. ANOVA para *Suaeda torreyana* 2

	gl	SC	CM	Fobs	f 5%	f 1%
Total	8	810.9				
Bloques	2	49.7	24.8	0.8	6.94	18
Tratamientos	2	685.2	342.6	10.9		
Error	4	125.8	31.4			

Cuadro E23. ANOVA para *Kochia scoparia*

	gl	SC	CM	Fobs	f 5%	f 1%
Total	8	2.1				
Bloques	2	0.7	0.3	1.1	6.94	18
Tratamientos	2	0.8	0.4	1.3		
Error	4	1.2	0.3			

Cuadro E24. ANOVA para *Tamarix chinensis*

	gl	SC	CM	Fobs	f 5%	f 1%
Total	8	10755.6				
Bloques	2	355.6	177.8	0.3	6.94	18
Tratamientos	2	8622.2	4311.1	8.1		
Error	4	2133.3	533.3			

Cuadro E25. ANOVA para *Tamarix aphylla*

	gl	SC	CM	Fobs	f 5%	f 1%
Total	8	622.2				
Bloques	2	88.9	44.4	0.7	6.94	18
Tratamientos	2	355.6	177.8	2.7		
Error	4	266.7	66.7			