



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

***DISTRIBUCIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE LA
SALINIZACIÓN Y SODIFICACIÓN DEL SUELO EN LA ZONA
FEDERAL DEL EX-LAGO DE TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO***

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

B I Ó L O G A

P R E S E N T A:

MARTHA GABRIELA BARRERA FRANCO



DIRECTOR DE TESIS: DRA. CHRISTINA DÉSIREE SIEBE GRABACH

~~1999~~

2000



282461



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

MAT. MARGARITA ELVIRA CHÁVEZ CANO
Jefa de la División de Estudios Profesionales de la
Facultad de Ciencias
Presente

Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo de Tesis:

"Distribución espacio-temporal de la salinización y sodificación
del suelo en la zona federal del ex-lago de Texcoco, Edo. de México"

realizado por Martha Gabriela Barrera Franco

con número de cuenta 9350431-1, pasante de la carrera de Biología

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director de tesis

Propietario

Dra. Christina Désiree Siebe Grabach.

Christina Siebe

Propietario

Dr. Alejandro Velázquez Montes.

Alejandro Velázquez

Propietario

Dra. Silke Cram Heydrich.

Silke Cram

Suplente

Biól. María Norma Olinda Fernández Buces.

Maria Norma

Suplente

Biól. Jorge Antonio Moreno Hernández.

Jorge Antonio

Edna M. Suárez
Consejo Departamental de Biología.

Dra. Edna María Suárez Díaz.

Dedico esta tesis a mis padres, por todo lo que me han brindado, pero muy especialmente por "obligarme" a ir a la escuela. Todo mi trabajo es gracias a ustedes. Los quiero mucho.

AGRADECIMIENTOS.

Quiero expresar mi reconocimiento a la Dra. Christina Siebe por su gran comprensión, paciencia y apoyo en la realización de este trabajo, por guiarme y estimularme siempre en mi formación académica. A la muy próximamente M. en C. Norma Fernández por sus porras constantes y su amistad.

A el Dr. Alejandro Velázquez por sus consejos, conocimiento y amistad. A el Biól. Jorge Antonio Moreno y a la Dra. Silke Cram por su valiosa colaboración en la revisión de esta tesis. A todos ellos, muchas gracias por su comprensión y ayuda.

Expreso mi gratitud y profunda admiración al Dr. Richard Webster, quien tuvo enorme paciencia para guiarme a través de mis pininos en geoestadística.

Gracias al personal de la Gerencia del Lago de Texcoco, por proporcionarme la información necesaria para la realización de esta tesis. En particular, muchas gracias a Luz Elena por todo su apoyo.

A todo el personal de los Institutos de Geología y Geografía que de alguna forma colaboraron con este trabajo. Gracias a Luci por su amistad y sus palabras de aliento.

Muchas gracias a mis hermanos por su forzada pero no por eso menos valiosa participación en la realización de esta tesis. Gracias Adriana por tu cariño (¡aunque lo niegues!). A mi prima Analee por todas sus porras.

A mis cuates, que aunque no parezca, los quiero y admiro: Gabriela, Melissa, Rodrigo, Jimena y Ian, Likin, Chio, Mito, Sol, Felipe, etc. Disculpas a los no mencionados, no es falta de cariño sino de...

Estoy sumamente agradecida con Marianne Roux y su familia por su ayuda en este trabajo, pero además por todos los desayunos, comidas, cenas y tentempiés que compartieron conmigo. Gracias por aguantarme, y gracias por sus maravillosas pláticas.

A las familias Viveros y Rodriguez por el apoyo que siempre me han brindado. A mis cuatas de toda la vida: Verónica, Katia y Tania.

Alan, no puedo más que darte las gracias por todo tu apoyo, paciencia y amistad. Te quiero mucho.

A mi, sin cuyo esfuerzo no hubiera sido posible la realización de esta tesis.

CONTENIDO	Páginas
1. RESUMEN	1
2. INTRODUCCION	3
3. ANTECEDENTES	
3.1 Orígenes y composición de las sales en el suelo	5
3.2 Clasificación de suelos salinos	8
3.3 Efectos de la salinización y sodificación del suelo en la vegetación	9
3.4 Restauración Ecológica y manejo de suelos salinos	11
3.5 Análisis espacial de suelos	13
3.6 La zona federal del Ex-Lago de Texcoco	21
4. OBJETIVOS E HIPOTESIS	28
5. MATERIALES Y METODOS	
5.1 Recopilación de los datos y delimitación de la Zona de Estudio	29
5.2 Estadística descriptiva de la Zona de Estudio	40
5.3 Análisis geoestadístico: semivariogramas y ajuste de modelos	40
5.4 Análisis geoestadístico: interpolación de los datos mediante Kriging Ordinario	43
5.5 Evaluación del cambio entre 1971 y 1998	44
6. RESULTADOS	
6.1 Recopilación de los datos y delimitación de la Zona de Estudio	45
6.2 Estadística descriptiva de la Zona de Estudio	57
6.3 Análisis geoestadístico: semivariogramas y ajuste de modelos	62
6.4 Análisis geoestadístico: interpolación de los datos mediante Kriging Ordinario	74

CONTENIDO	Páginas
<i>6.5 Evaluación del cambio entre 1971 y 1998</i>	91
7. DISCUSIONES	100
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	115
9. LITERATURA CITADA	119
<i>Apéndice I</i>	126
<i>Apéndice II</i>	133
<i>Apéndice III</i>	142

INDICE DE TABLAS

Páginas

<i>Tabla 3.1: Diferentes sales relacionadas con la formación suelos salinos (Szabolcs 1979)</i>	7
<i>Tabla 6.1.1: Estadísticos descriptivos para todos los datos de los muestreos realizados en 1971 y 1998</i>	48
<i>Tabla 6.2.1: Estadísticos descriptivos para los datos de 1971 y 1998 localizados dentro de la Zona de Estudio</i>	60
<i>Tabla 6.3.2: Parámetros de los modelos seleccionados para el ajuste a los semivariogramas de los datos de 1971 y 1998, localizados dentro de la Zona de Estudio</i>	67
<i>Tabla 6.4.1 Estadísticos descriptivos para las estimaciones de 1971 y 1998 dentro de la Zona de Estudio</i>	90
<i>Tabla 6.5.1 Comparación de las estimaciones de 1971 y 1998 dentro de la Zona de Estudio, mediante una prueba de t con un alfa del 5%</i>	99
EN APENDICES:	
<i>Tabla 6.2.2 Comparación de las distintas profundidades de los datos de 1971 y 1998 localizados dentro de la Zona de Estudio, mediante una prueba de t con un alfa del 5%</i>	132
<i>Tabla 6.3.1: Parámetros de los criterios utilizados para la selección del modelo de ajuste, a los semivariogramas de los datos de 1971 y 1998 localizados dentro de la Zona de Estudio.</i>	139

INDICE DE FIGURAS

Páginas

<i>Fig. 3.1: Representación de un semivariograma, en el cual se observan sus parámetros principales: nugget, umbral y rango</i>	19
<i>Fig. 5.1 Ubicación de la Zona de Estudio en referencia a la zona federal del Ex-Lago de Texcoco (se indican también el área de los muestreos correspondientes al año de 1971 y 1998) (SRH 1971, CNA 1998)</i>	31
<i>Fig. 5.2: Ubicación de todos los sitios de muestreo del estudio de 1971 (SRH 1971)</i>	32
<i>Fig. 5.3: Ubicación de todos los sitios de muestreo del estudio de 1998 (CNA 1998)</i>	34
<i>Fig. 5.4: Ubicación de los sitios de muestreo del estudio del año de 1971 localizados dentro de la Zona de Estudio</i>	38
<i>Fig. 5.5: Ubicación de los sitios de muestreo del estudio del año de 1998 localizados dentro de la Zona de Estudio</i>	39
<i>Fig. 6.1.1a: Diagramas de caja para todos los datos de los muestreos realizados en 1971 y 1998</i>	49
<i>Fig. 6.1.2a: Distribución espacial de los valores de pH, en la Zona de Estudio (año 1971)</i>	51

INDICE DE FIGURAS

Páginas

<i>Fig. 6.1.2b: Distribución espacial de los valores de pH en la Zona de Estudio (año 1998)</i>	52
<i>Fig. 6.1.2c: Distribución espacial de los valores de CE en la Zona de Estudio (año 1971)</i>	53
<i>Fig. 6.1.2d: Distribución espacial de los valores de CE en la Zona de Estudio (año 1998)</i>	54
<i>Fig. 6.1.2e: Distribución espacial de los valores de Na en la Zona de Estudio (año 1971)</i>	55
<i>Fig. 6.1.2f: Distribución espacial de los valores de Na en la Zona de Estudio (año 1998)</i>	56
<i>Fig. 6.2.1a: Diagramas de caja para los datos de 1971 y 1998 localizados dentro de la Zona de Estudio</i>	61
<i>Fig. 6.3.2a: Ajuste de modelos a los semivariogramas de pH para los datos localizados dentro de la Zona de Estudio (año 1971)</i>	68
<i>Fig. 6.3.2b: Ajuste de modelos a los semivariogramas de pH en las distintas profundidades del suelo para los datos localizados dentro de la Zona de Estudio (año 1998)</i>	68

INDICE DE FIGURAS

Páginas

<i>Fig. 6.3.2c: Ajuste de modelos a los semivariogramas de CE en las distintas profundidades del suelo para los datos localizados dentro de la Zona de Estudio (año 1971)</i>	69
<i>Fig. 6.3.2d: Ajuste de modelos a los semivariogramas de CE en las distintas profundidades del suelo para los datos localizados dentro de la Zona de Estudio (año 1998)</i>	70
<i>Fig. 6.3.2e: Ajuste de modelos a los semivariogramas de Na en las distintas profundidades del suelo para los datos localizados dentro de la Zona de Estudio (año 1971)</i>	71
<i>Fig. 6.3.2f: Ajuste de modelos a los semivariogramas de Na en las distintas profundidades del suelo para los datos localizados dentro de la Zona de Estudio (año 1998)</i>	72
<i>Fig. 6.4a: Estimaciones de pH para una profundidad en el suelo de 0-30 cm (1971)</i>	77
<i>Fig. 6.4c: Estimaciones de pH para una profundidad en el suelo de 0-60 cm (1971)</i>	78
<i>Fig. 6.4e: Estimaciones de pH para una profundidad en el suelo de 60-120 cm (1971)</i>	79
<i>Fig. 6.4g: Estimaciones de pH para una profundidad en el suelo de 0-200 cm (1971)</i>	80

INDICE DE FIGURAS

Páginas

<i>Fig. 6.4i: Estimaciones de pH para una profundidad en el suelo de 0-30 cm (1998)</i>	81
<i>Fig. 6.4k: Estimaciones de pH para una profundidad en el suelo de 30-60 cm (1998)</i>	82
<i>Fig. 6.4m: Estimaciones de CE (dSm^{-1}) para una profundidad en el suelo de 60-120 cm (1971)</i>	83
<i>Fig. 6.4o: Estimaciones de CE (dSm^{-1}) para una profundidad en el suelo de 0-30 cm (1998)</i>	84
<i>Fig. 6.4q: Estimaciones de CE (dSm^{-1}) para una profundidad en el suelo de 30-60 cm (1971)</i>	85
<i>Fig. 6.4s: Estimaciones de Na (PSI) para una profundidad en el suelo de 30-60 cm (1971)</i>	86
<i>Fig. 6.4u: Estimaciones de Na (PSI) para una profundidad en el suelo de 0-30 cm (1998)</i>	87
<i>Fig. 6.4w: Estimaciones de Na (PSI) para una profundidad en el suelo de 30-60 cm (1998)</i>	88
<i>Fig. 6.5a: Cambio de los valores de pH estimados para 1998 respecto a los valores estimados para 1971 (profundidad 0-30 cm)</i>	93

INDICE DE FIGURAS

Páginas

<i>Fig. 6.5b: Cambio de los valores de pH estimados para 1998 respecto a los valores estimados para 1971 (profundidad 30-60 cm)</i>	94
<i>Fig. 6.5c: Cambio de los valores de CE estimados para 1998 respecto a los valor promedio de los datos de 1971 (profundidad 0-30 cm)</i>	95
<i>Fig. 6.5d: Cambio de los valores de CE estimados para 1998 respecto a los valor promedio de los datos de 1971 (profundidad 30-60 cm)</i>	96
<i>Fig. 6.5e: Cambio de los valores de Na estimados para 1998 respecto a los valores estimados para 1971 (profundidad 0-30 cm)</i>	97
<i>Fig. 6.5f: Cambio de los valores de Na estimados para 1998 respecto a los valor promedio de los datos de 1971 (profundidad 30-60 cm)</i>	98
<i>Fig. 7.1: Localización de las zonas con subdrenaje parcelario (CNA 1998)</i>	112

EN APENDICES:

Figuras: 6.2.2a, 6.2.2b, 6.2.2c, 6.2.2d, 6.2.2e y 6.2.2f, corresponden a los histogramas de las tres variables, para los datos localizados dentro de la Zona de Estudio (años 1971 y 1998)

Figuras: 6.3.1a, 6.3.1b, 6.3.1c, 6.3.1d, 6.3.1e y 6.3.1f, corresponden a los semivariogramas de las tres variables en distintas direcciones para los datos localizados dentro de la Zona de Estudio (años 1971 y 1998)

Figuras: 6.4b, 6.4d, 6.4f, 6.4h, 6.4j, 6.4l, 6.4n, 6.4p, 6.4r, 6.4t, 6.4v y 6.4x, corresponden al error estándar de las estimaciones realizadas para las tres variables, en cada una de las profundidades que se interpolaron mediante Kriging Ordinario

1. RESUMEN.

La zona federal del Ex-Lago de Texcoco presenta suelos con elevados niveles de salinización y sodificación, por lo cual durante casi 30 años se han realizado distintos estudios que han buscado la posibilidad de mejorar estos suelos; sin embargo, a pesar de que se han logrado avances importantes, no se ha establecido un método cuantitativo que permita diagnosticar, evaluar y monitorear las condiciones de salinización y sodificación existentes, así como los efectos de las distintas prácticas de manejo que se han utilizado.

Con el fin de realizar un diagnóstico de la distribución espacial de variables indicadoras de salinización y sodificación de suelos, se utilizaron métodos geoestadísticos para estimar la variabilidad espacial del pH, la conductividad eléctrica (CE) y el porcentaje de sodio intercambiable (PSI), de los datos dentro de la Zona de Estudio definida; estos datos corresponden a una parte de los muestreos de suelos realizados en el año de 1971 y en el año de 1998, en el área del Ex-Lago. Los parámetros de la variabilidad espacial calculados, se utilizaron posteriormente para conocer la distribución espacial de cada una de las variables estudiadas, mediante la interpolación con Kriging Ordinario. Además, se evaluó si se presentó una disminución o aumento en los valores de pH, CE y PSI en el año de 1998 con respecto a 1971.

De esta forma, se obtuvieron distintos mapas de distribución de pH, CE y PSI, en los cuales se puede observar un gradiente en los valores estimados. Para los datos correspondientes al año de 1971, se observa que los valores de las variables de estudio, aumentan en dirección Oeste dentro de la zona federal, a la vez que el área de valores más bajos es mayor conforme la profundidad aumenta. En el caso de la CE y el PSI, es importante mencionar que no en todas las profundidades estudiadas se pudieron realizar estimaciones, debido a que la varianza nugget, consecuencia de los errores de muestreo y/o de la medición de los datos, fue la más representada dentro de la variabilidad total de los mismos.

2. INTRODUCCION.

La degradación del suelo se reconoce como un conjunto de procesos que disminuyen la actual y/o futura capacidad del mismo para producir bienes o servicios (Oldeman 1994). Dentro de estos procesos, los suelos salinos, sódicos y salino-sódicos se definen como aquellos que contienen concentraciones excesivas de sales solubles, sodio intercambiable o ambos, los cuales afectan las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, y eventualmente, reducen su fertilidad (Richards et al 1973, Szabolcs 1989).

La salinización puede ser de origen natural o ser inducida por el hombre. Los suelos afectados por sales pueden encontrarse distribuidos en todo el mundo, aunque lo más común es encontrarlos en zonas áridas. Se estima que un total de 1,000 millones de hectáreas presentan problemas por salinización, siendo Australia el continente con mayor extensión de suelos salinos (357 millones de ha), seguido por Asia (320 millones de ha), América (193 millones de ha), África (80 millones de ha), y Europa (50 millones de ha). Estas 1,000 millones de hectáreas representan cerca de un 10% del total de hectáreas de superficie terrestre estimada a nivel mundial (Szabolcs 1989, Ortiz-Olguín 1992).

Sin embargo, estas estimaciones de la extensión total que ocupan los suelos afectados por sales en el mundo, presenta una limitante en cuanto a su precisión, ya que la forma en que ocurre y su severidad, varían de localidad en localidad, por lo que la estandarización de las mediciones se ha convertido en un problema. En general, cuando se efectúan estudios detallados en un país, los resultados tienden a indicar una todavía mayor extensión en la distribución de los suelos salinos (Barrow 1994, Ortiz-Olguín 1996).

En México se han realizado diversos estudios sobre la degradación del suelo a nivel nacional, aunque de manera cualitativa, y la mayoría de ellos no son recientes (Zárate-Zárate 1991). En cuanto a la salinización, no existe una evaluación precisa de las superficies de los suelos que presentan esta problemática, sobre todo en áreas no agrícolas. De manera aproximada, se

estima que existen 3.5 millones de hectáreas afectadas en las zonas áridas y semiáridas, 1 millón de ha en otras zonas no agrícolas, 800, 000 ha en áreas costeras, 1 millón de ha en áreas agrícolas de temporal y 500,000 ha en zonas agrícolas de riego, lo cual da un total de 6.8 millones de hectáreas de suelos afectados por salinización en el país, es decir, alrededor de 3.5% de la superficie total del país (Ortiz-Olguín 1996).

La zona del Ex-Lago de Texcoco ha sufrido un intenso deterioro ambiental debido a la sobreexplotación de sus recursos tanto biológicos como hídricos. La desecación del lago, dejó al descubierto extensas zonas de suelos salino-sódicos, lo cual durante mucho tiempo ha afectado a los habitantes del Distrito Federal y zona conurbada. En el año de 1971, se creó el Proyecto Lago de Texcoco, con el fin de mejorar las condiciones ambientales de la zona, al evitar la formación de tolváneras, y controlar y aprovechar los recursos hídricos existentes.

Con este propósito, se han realizado diversos estudios agrológicos en la zona (SARH 1981^a, SARH 1981^b, SARH 1981^c, SRH 1971, CNA 1996), y se han implementado diversas medidas de recuperación, como son la introducción de subdrenaje, y la aplicación de mejoradores de suelo. Todas las metodologías utilizadas y la información generada a partir de los estudios agrológicos, han permitido la recuperación de las condiciones ambientales en la zona, aunque también han supuesto una importante inversión económica y un gran esfuerzo. Bajo esta perspectiva, es necesario evaluar la información existente, así como el efecto de las diferentes medidas aplicadas, para poder dar un seguimiento del comportamiento que la salinización ha tenido en la zona del ex-lago, y a futuro, monitorear en forma precisa, los cambios que en ésta se presenten.

En este trabajo, se utilizaron métodos geoestadísticos para determinar la distribución espacial de tres variables indicadoras de salinización: pH, conductividad eléctrica (CE) y porcentaje de sodio intercambiable (PSI), en la zona federal del Ex-Lago de Texcoco. Estos métodos geoestadísticos no sólo permitieron realizar estimaciones a partir de bases de datos de 1971 y 1998, sino que fue posible determinar la precisión de las mismas.

3. ANTECEDENTES.

3.1 Orígenes y composición de las sales en el suelo.

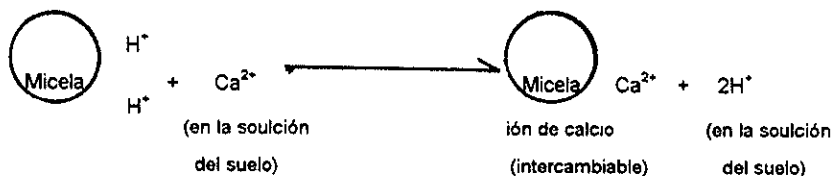
De manera natural, los suelos pueden presentar un exceso en la concentración de sales durante el proceso de intemperización del material parental; la intensidad y extensión con que este proceso ocurre, son un claro reflejo de los efectos del clima y el relieve. Así, los suelos salinos son un componente común de zonas áridas y semi-áridas, en donde la evapotranspiración excede de manera importante a la precipitación, con lo cual las sales no son "lavadas" del suelo, y se acumulan en los primeros horizontes. Además, la salinización se relaciona con zonas bajas o depresiones, en donde las sales provenientes de áreas circundantes, son depositadas directamente sobre el suelo o en los cuerpos de agua subterráneos; la presencia de un pobre drenaje interno, y de un manto freático cercano a la superficie (el cual implica que al evaporarse el agua, las sales ascenderán por capilaridad), son dos aspectos relevantes que también se deben considerar como parte del proceso de salinización (Richards et al. 1973, Barrow 1994, Brady y Weil 1996). Otras causas que pueden dar lugar a suelos salinos, se presentan cuando éstos se forman en zonas con influencia marina (zonas costeras o depósitos fósiles de sales), en deltas o en terrazas de ríos, o en lagos salados; es importante mencionar la particularidad de estas condiciones como responsables de que, naturalmente, puedan existir suelos salinos en zonas húmedas. Cuando la salinización es consecuencia de cualquiera de los factores antes mencionados, sin que haya interferencia humana, se conoce como salinización primaria (Szabolcs 1989, Rhoades 1996).

La salinización también puede ocurrir cuando las condiciones del suelo son alteradas por el hombre (salinización secundaria). Su principal causa son los métodos de irrigación empleados en la agricultura, ya que el agua disponible para riego en muchos sitios contiene cantidades importantes de sales (Szabolcs 1989, Barrow 1994); su acumulación, va depender en gran medida de la calidad del

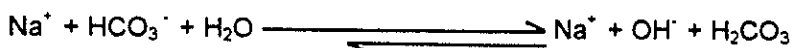
agua con la que se irrigue, de la salinidad intrínseca de cada suelo, y de la capacidad de drenaje que éste tenga (Rhoades 1996).

Existen distintas sales minerales presentes en los suelos salinos; sus principales constituyentes son los cationes de Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , y los aniones de Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- , entre otros (Mille y Donahue 1995, Jurinak 1996). La fuerza con la que los cationes son adsorbidos por las arcillas minerales varía de acuerdo a su valencia; los cationes monovalentes (Na^+ y K^+), se caracterizan por tener la mayor movilidad respecto a los otros cationes, y por lo tanto, la fuerza con la que son adsorbidos es menor. Cuando los cationes se acumulan en el suelo, remplazan a los iones hidrógeno y aluminio en las micelas, y dominan, de acuerdo a su concentración, tanto los sitios de intercambio en la superficie de las arcillas minerales, como en la solución del suelo. De la misma forma, la concentración de hidróxidos puede verse incrementada por la presencia de ciertas sales, con lo que el pH de la solución del suelo aumenta, y en consecuencia, el valor de la capacidad de intercambio catiónico es mayor (Brady y Weil 1996). Como ejemplo, los dos procesos antes mencionados pueden representarse de la siguiente forma:

1. Remplazamiento de hidrógeno por calcio en la superficie de las arcillas minerales:



2. Hidrólisis de sales que contribuyen a incrementar el pH:



La solubilidad de cada uno de los tipos de sales presentes, es el factor más importante para determinar su movilidad dentro del suelo y su capacidad de salinización; de esta forma, los principales tipos de sales que se pueden llegar a acumular en suelos salinos son: carbonatos, sulfatos y cloruros, algunos de los cuales se muestran en la Tabla 3.1 (Szabolcs 1979):

Tabla 3.1			
Diferentes sales relacionadas con la formación de suelos salinos (en Szabolcs 1979, basado en Darab y Ferencz 1969).			
Grupo	Solubilidad	pH en solución	Toxicidad a plantas
<i>Carbonatos</i>			
CaCO ₃	varía	alcalino	varía conforme solubilidad
MgCO ₃	baja	alcalino	no tóxico
Na ₂ CO ₃	alta	alcalino, pH arriba de 12	muy tóxico
<i>Sulfatos</i>			
CaSO ₄	baja	moderadamente ácido	no tóxico
MgSO ₄	alta	moderadamente ácido	muy tóxico
Na ₂ SO ₄	alta	casi neutro	tóxico
<i>Cloruros</i>			
CaCl ₂	alta	moderadamente ácido	tóxico
MgCl ₂	alta	casi neutro	muy tóxico
NaCl	alta	neutro	muy tóxico

El efecto de las sales en el suelo y el grado de salinización, pueden determinarse de acuerdo a su cantidad y a su composición química. Las principales variables utilizadas para caracterizar suelos salinos son (Brady y Weil 1996):

- a) pH
- b) Conductividad eléctrica en el extracto de saturación (dSm^{-1})
- c) Contenido de Sodio, ya sea Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI) o Relación de Adsorción de Sodio (RAS).

3.2 Clasificación de suelos salinos.

De acuerdo a Richards et al. (1973) y a Brady y Weil (1996) los suelos salinos se clasifican de acuerdo a sus características en:

1) Suelos salinos.

Las principales sales que componen a este tipo de suelo son sulfatos y cloruros de sodio, calcio, magnesio y potasio (sales solubles neutras), siendo dominado el complejo de intercambio catiónico por calcio y magnesio; por lo tanto, el PSI es menor a 15 y la RAS es menor a 13. Tienen una conductividad del extracto de saturación mayor a 4 dSm^{-1} , y el pH es menor a 8.5. En general se encuentran floculados, con lo que hay una buena estabilidad en los agregados, además de una buena aereación. Las sales son depositadas en la superficie cuando el agua se evapora, formándose "costras".

2) Suelos salino-sódicos.

Al igual que en el caso anterior, también contienen niveles apreciables de sales solubles neutras (CE mayor a 4 dSm^{-1}), pero el sodio está presente en mayor cantidad, por lo que el PSI es mayor a 15 y la RAS es por lo menos de 13. Sus condiciones químicas y físicas son similares a las de los suelos salinos a pesar de la presencia de sodio, ya que las sales neutras moderan los efectos de éste último; las arcillas minerales se mantienen floculadas conformando agregados, aunque esta condición puede cambiar rápidamente si son lavados con agua que aporte más sodio, presentándose entonces condiciones de sodicidad.

3) Suelos sódicos

En estos suelos el PSI es mayor a 15 y la RAS es mayor a 13; debido a los bajos niveles de sales neutras presentes, la CE es menor a 4 dSm^{-1} , y el pH sobrepasa el valor de 8.5, ya que las sales de sodio en la solución del suelo, y los cationes del mismo en la superficie de las micelas se hidrolizan. El sodio es un ion que presenta características químicas particulares; esto se debe a que su capa de

hidratación es lo suficientemente grande como para proteger su carga, con lo que la fuerza de atracción con otras partículas disminuye; de la misma forma, la repulsión entre partículas de sodio es todavía mayor, ocasionando una dispersión de las partículas del suelo, por lo que dentro de los suelos salinos, es el que más problemas presenta. Los suelos tienen una estructura débil o carecen de ella, los poros se llenan de materiales finos y la conductividad hidráulica e infiltración del agua se reducen al mínimo; la materia orgánica también se dispersa, llegando a depositarse en la superficie.

De acuerdo a la FAO, existen dos horizontes diagnósticos para la clasificación taxonómica de suelos afectados por salinización. El primero de éstos, es el horizonte sálico, influenciado por un enriquecimiento secundario de sales solubles, como por ejemplo, sales de sodio con carga neutra; entre algunas de sus características generales, la CE en el extracto de saturación llega a ser mayor a 15 dSm^{-1} , o más de 8 dSm^{-1} si el pH excede el valor de 8.5. El horizonte sálico puede llegar a presentarse en Fluvisoles, pero fundamentalmente, es una característica principal de los Solonchaks. El segundo horizonte diagnóstico es el nátrico, con un alto contenido de sodio y/o magnesio intercambiable, un PSI mayor a 15, y un pH frecuentemente superior a 9; este horizonte diagnóstico se encuentra en el grupo de los Solonetz. La diferencia principal entre los Solonchaks y los Solonetz radica en el tipo y la cantidad de sales que contengan; además, las muy diversas propiedades presentes en ambos grupos dan lugar a diferentes unidades de suelos (FAO, ISRIC e ISSS 1994).

3.3 Efectos de la salinización y sodificación del suelo en la vegetación.

De acuerdo a Shalhevet (1993), Mille y Donahue (1995), Läuchli y Epstein (1996), y Gorham (1997), tanto la salinización como la sodificación tienen tres efectos principales sobre la vegetación:

1. Absorción de agua: al existir una alta concentración de sales en la solución del suelo, la presión osmótica se incrementa, con lo cual las células de la raíz no sólo tienen que emplear más energía para absorber a las moléculas de agua, sino que además, llegan a perderla de su superficie celular y a colapsarse. El grado de afectación dependerá de la concentración total de solutos, sin importar la naturaleza de éstos.

2. Asimilación de nutrientes: las sales llegan a interferir con la capacidad de las plantas para adquirir o asimilar nutrientes, al existir competencia entre los iones (ej. si el sodio predomina puede afectar la disponibilidad de potasio o calcio, mientras que condiciones salinas inhiben la absorción de nitratos). En particular, se ha observado que si la absorción de calcio no es adecuada, las funciones de la membrana celular se ven afectadas, lo cual puede llegar a la permeabilidad de ésta hacia otros elementos (ej. K^+); también bajo condiciones de pH alcalinos ($pH > 8.5$), se presentan bajas concentraciones de algunos nutrimentos como zinc, cobre, hierro y manganeso.

3. Toxicidad: el exceso de iones absorbidos por la planta pueden acumularse en tejidos y células, provocando alteraciones al metabolismo; afectan el funcionamiento de enzimas, la síntesis de compuestos de almidón, y la síntesis de ATP, DNA y RNA; de la misma forma, la tasa fotosintética y la asimilación de CO_2 pueden verse afectadas. Los iones más tóxicos son el sodio, el cloruro y el sulfato.

La sensibilidad que una planta pueda tener a la salinidad también depende del estadio de crecimiento en el que se encuentre. Se considera que existen tres etapas durante el desarrollo vegetal, que presentan distinta respuesta a condiciones salinas; en plantas no halófitas, la etapa más tolerante es la reproductiva, seguida por la etapa germinativa y finalmente la de crecimiento

vegetativo, mientras que en las halófitas, las altas concentraciones de sales estimulan éste último estadio (Mille 1995, Läuchli y Epstein 1996).

Las plantas son afectadas de distinta forma por condiciones salinas en el suelo. Algunas son muy sensibles, mientras que otras han desarrollado distintos mecanismos de tolerancia, éste, incluyendo a plantas de cultivo. Aunque no existe una definición que se acepte de forma universal del término halófitas, en general, éste se utiliza para pastos, arbustos y árboles que habitan naturalmente y cumplen su ciclo de vida en suelos afectados por salinización (Läuchli y Epstein 1996, Gorham 1997).

Entre los distintos mecanismos de tolerancia desarrollados bajo condiciones salinas se encuentran: la exclusión de sales a nivel de la raíz mediante barreras impermeables a iones; continua producción de hojas nuevas, eliminando aquellas que ya han acumulado cantidades importantes de sales; excreción de sales directamente de las hojas a través de glándulas; incremento en la succulencia, entre otros. Además, se han desarrollado mecanismos que se relacionan más con la regulación que con la exclusión de sales, como: ajuste osmótico al inactivar los iones mediante su compartimentalización en vacuolas, o sistemas metabólicos resistentes (ej. enzimas que no son afectadas por altas concentraciones de iones) (Mille 1995, Läuchli y Epstein 1996, Gorham 1997).

3.4 Restauración Ecológica y manejo de suelos salinos.

La salinización y sodificación, afectan de manera global el uso actual y potencial del suelo, por lo que se han aplicado distintas técnicas para su mejoramiento. Sin embargo, cualquier práctica que se pretenda utilizar para contrarrestar esta problemática, debe incluirse dentro de un contexto que busque dar bases científicas a la reconstrucción de ecosistemas que de alguna forma han sido dañados; es mediante la disciplina de Restauración Ecológica, bajo la que originalmente se han realizado las principales aportaciones en este sentido (Uranska et al. 1997). La idea de restauración se relaciona con diversos enfoques

y principios ecológicos. De manera formal, su objetivo primordial es el reestablecimiento, conforme a su estado original, de la estructura y procesos de un sistema afectado. No obstante, se han redefinido e implementado nuevos conceptos y opciones, los cuales han dado lugar a distintas alternativas como rehabilitación, reclamación o remplazamiento, adquiriendo una nueva perspectiva en cuanto a su aplicación.

En primer lugar, rehabilitación no implica el retorno a condiciones originales, sino que se concentra principalmente en reestablecer aquellas funciones de un ecosistema degradado que permitan, sin sacrificar la sustentabilidad del mismo, incrementar su productividad a la brevedad posible. Por otra parte, reclamación se refiere a dar un nuevo uso a un sitio, por lo que se recurre al término "remplazamiento", es decir, se busca un estado sustituto o equivalente al ecosistema original. Todas estas prácticas se han planteado a distintos niveles (ej. calidad de suelo, especie, comunidad, hábitat, etc.), aunque el objetivo final se enfoca hacia la restauración de un ecosistema que se sustentable a largo plazo (Aronson y LeFloc'h 1997, Bradshaw 1997, Parker y Pickett 1997).

Actualmente, se considera que los ecosistemas están regulados tanto por procesos internos como externos, que pueden afectar simultáneamente la dinámica de sus diferentes componentes bióticos y abióticos. Estos componentes, y sus interacciones, pueden representarse mediante la elaboración de modelos. En este sentido, la Restauración Ecológica tiene el reto de adaptar modelos generales a situaciones particulares, por lo que no existe un sólo estado "ideal" que sirva como referencia, sino que el contexto e historia de cada sitio, determinarán el curso del proceso de restauración (Parker y Pickett 1997).

Dado sus características, la mayoría de las veces se plantea la necesidad de rehabilitar o reclamar ambientes afectados por salinización, mediante distintas técnicas de manejo. Entre éstas, se encuentra la implementación de sistemas de riego y drenaje del suelo que permitan el lavado de sales. Además, la aplicación de materia orgánica y de mejoradores como yeso, azufre, ácido sulfúrico, entre

otros, pueden ayudar a que los suelos presenten una mejor condición en sus propiedades físicas, evitando el movimiento de sales hacia la superficie y contribuyendo a la agregación de las partículas del suelo, mediante la sustitución del sodio intercambiable. Este mejoramiento, tiene como consecuencia que las sales puedan ser lavadas del suelo más fácilmente, con lo que la presión osmótica disminuye, y por lo tanto, hay una mayor disponibilidad de agua para las plantas (Richards et. al 1973, Mille 1995, Brady y Weil 1996).

Se ha implementado el uso de halófitas para la rehabilitación y reclamación de suelos afectados por salinización. Sin embargo, aún falta importante información sobre su ecofisiología, variaciones genéticas, ecología de comunidades, potencial económico, etc. (Aronson y Le Floc'h 1997, Choukr-Allah 1997).

Al ser la salinización un proceso dinámico en el tiempo y en el espacio, es necesaria la implementación de metodologías que permitan tener un mejor diagnóstico, evaluación y seguimiento de su comportamiento y efectos, así como de las distintas técnicas empleadas para su mejoramiento.

3.5 Análisis espacial de suelos.

El uso de variables espaciales, se considera parte integral del análisis de áreas afectadas por salinización. Sin embargo, en muchas ocasiones, se siguen empleando técnicas estadísticas "convencionales", las cuales no consideran la importancia que el arreglo espacial de las diferentes propiedades del suelo tiene para su interpretación (Bailey y Gatrell 1995, Guitjens 1996).

De esta forma, se han desarrollado diferentes metodologías que buscan describir, explicar y modelar procesos que presentan alguna correlación espacial. Una de éstas se enfoca al manejo de variables espaciales continuas, teniendo como objetivos principales (Bailey y Gatrell 1995):

1. Entender la distribución espacial de los valores de una determinada propiedad del suelo dentro de una región pre-determinada (estos valores se obtienen mediante puntos de muestreo establecidos).
2. Modelar el patrón de variabilidad existente y establecer aquellos factores con los cuales pudiera relacionarse.
3. Utilizar estos modelos para obtener predicciones de valores en puntos donde esta misma propiedad no haya sido muestreada.

El conjunto de técnicas que tienen como base estos objetivos se conoce como Geoestadística, y es una aplicación más de la Teoría de Variables Regionalizadas desarrollada por Matheron en 1965. Esta teoría permite modelar la correlación o dependencia espacial entre variables “azarosas” del suelo. Una variable azarosa, se refiere al valor que una propiedad determinada del suelo presenta dentro de una región; cuando ésta tiene coordenadas asociadas, se conoce como variable regionalizada. Es importante tener en cuenta, que el azar se refiere al modelo, no en sí a la propiedad o fenómeno analizado (Webster 1997). Estos modelos de variación espacial están conformados por tres componentes (Burrough 1987):

1. El primer componente se refiere a la variación entre valores de distintos puntos de muestreo; este componente puede referirse a una media constante o a cierta tendencia dentro de una región, por lo que el problema a resolver se centra en analizar la variabilidad restante.
2. El segundo componente es aquella variabilidad que se encuentra correlacionada espacialmente, y que cambia de forma gradual. Es este caso por el cual se refiere a variables azarosas, ya que la intención es adoptar un modelo estadístico de acuerdo a su comportamiento.

3. Variación entre puntos debida a la escala de muestreo o a errores en la medición de propiedades del suelo. Esta variación no tiene una correlación espacial.

Por lo tanto, el valor de una variable Z en un punto x dentro de una región se puede representar como (Burrough 1987):

$$Z = \mu(x) + \varepsilon'(x) + \varepsilon'' \quad (1)$$

en donde μ se refiere al primer componente de variación, $\varepsilon'(x)$ es la variación azarosa espacialmente correlacionada, y ε'' contempla el error en el muestreo y/o medición de las propiedades del suelo a estudiar; se asume que este último, tiene una distribución normal con una media y varianza iguales a cero.

Para poder desarrollar un modelo, es necesario partir de ciertas premisas. En primer lugar, se plantea que las propiedades estadísticas de la variabilidad espacialmente correlacionada $\varepsilon'(x)$, son las mismas dentro de una región; en este sentido, dos valores o puntos separados por cualquier distancia, pueden ser considerados como dos diferentes realizaciones de una misma variable regionalizada. Esta condición que se conoce como "Estacionaridad", permite que el modelo que se establezca pueda predecir los valores en puntos no muestreados. De esta forma, dos puntos separados por una cierta distancia determinada tienen la misma distribución de probabilidad (Clark 1979, Burrough 1987, Webster 1993 y 1997).

De manera más particular, se habla de "Estacionaridad de Segundo Orden", en la cual, se plantea que la media es constante, que la autocovarianza depende solamente del intervalo de muestreo (la autocovarianza se refiere a que puntos cercanos espacialmente tienden a tener valores similares, mientras que puntos más alejados entre sí se parecen menos), y que la varianza es finita y constante (Webster 1997). Así:

La media esperada μ existe, y la diferencia entre dos valores esperados en dos sitios distintos es cero:

$$\begin{aligned} E\{Z(x)\} &= \mu \text{ para toda } x \\ E\{Z(x) - \mu\} \{Z(x+h) - \mu\} &= 0 \text{ para toda } h, \end{aligned} \quad (2)$$

donde "E" se refiere al valor estimado, "x" al lugar o posición en el área de estudio, "h" o "lag" a la distancia entre puntos, y $Z(x)$ y $Z(x+h)$, son las variables regionalizadas en "x", y "x+h".

La covarianza $C(h)$ existe, y depende de la separación o distancia entre puntos "h", no de la posición en x. La covarianza es el producto de:

$$C_e(h) = E\{Z(x) - \mu\} \{Z(x+h) - \mu\} = E\{Z(x) \cdot Z(x+h)\} - \mu^2. \quad (3)$$

Cuando $h=0$, la covarianza $C(h)=C(0)$, por lo que la varianza (σ^2) queda definida como:

$$\text{var}\{Z(x)\} = E\{Z(x) - \mu\}^2 = C(0) = \sigma^2. \quad (4)$$

La semivarianza (γ) se define como $\frac{1}{2}$ de la varianza de la diferencia entre pares de puntos, con lo que:

$$\text{var}\{Z(x) - Z(x+h)\} = E\{Z(x) - Z(x+h)\}^2 = 2\gamma(h). \quad (5)$$

Bajo condiciones de estacionaridad de segundo orden, la semivarianza se relaciona con la covarianza por:

$$\gamma(h)=C(0)-C(h), \quad (6)$$

por lo que la covarianza y la semivarianza son equivalentes.

La principal diferencia con métodos estadísticos convencionales, es el reconocimiento de que la varianza incluye un término de autocovarianza que depende de la distancia entre puntos (Clark 1979, Burrough 1987, Webster 1997). El que condiciones de estacionaridad se cumplan o no, depende de la escala de estudio, por lo que existen cuatro aspectos de no-estacionaridad reconocidos (Burrough 1997):

1. La variable regionalizada no tiene una distribución normal.
2. La media no es estacionaria.
3. La varianza no es estacionaria.
4. Anisotropía, es decir, cuando la covarianza no depende sólomente de la distancia entre puntos, sino también de la orientación que éstos tengan.

En estas circunstancias, pareciera que la variable regionalizada tiene una capacidad infinita de dispersión, con lo que, la varianza se incrementa sin límite conforme la separación entre puntos aumenta. No obstante, si la media puede asumirse como estacionaria, y la distribución puede transformarse, la condición de estacionaridad de segundo orden puede remplazarse por la "Hipótesis Intrínseca", la cual asume que $[Z(x)-Z(x+h)]$ tiene una media cero y una varianza finita definida por (Burrough 1987, Webster 1997):

$$\gamma(h)=\frac{1}{2} \text{var}[Z(x)-Z(x+h)]=\frac{1}{2} E[\{Z(x)-Z(x+h)\}^2] \quad (7)$$

es decir, la semivarianza. Esta, depende sólo de las diferencias entre puntos, por lo que se utiliza en lugar de la covarianza que sí depende de que exista una media constante (Burrough 1987).

Las propiedades del suelo pueden cambiar dentro de una región, por lo que la Hipótesis Intrínseca se puede reducir mediante el concepto de "Cuasi-estacionaridad", en donde las diferencias entre puntos se asumen como estacionarias sólo dentro de áreas limitadas. De esta forma, podemos representar la variación espacial con un modelo simple, anteriormente mencionado (Webster 1997):

$$Z = \mu(x) + \varepsilon(x) \quad (1)$$

En este caso, $\varepsilon(x)$ tiene una media cero y una varianza expresada por la semivarianza; ésta puede representarse mediante un variograma de la zona de estudio, estimándose mediante (Webster 1997):

$$\gamma(h)_e = \frac{1}{2m(h)} \sum_{i=1}^{m(h)} \{z(x_i) - z(x_i+h)\}^2 \quad (8)$$

$\gamma(h)_e$ estima a $\gamma(h)$, $z(x)$ y $z(x+h)$ son los valores observados de Z en x_i y x_{i+h} respectivamente, y $m(h)$ es el número de comparaciones entre pares de puntos a una distancia o lag determinado.

Si el variograma es isotrópico, se representa mediante una gráfica de $\gamma(h)$ versus el lag, con las siguientes características (Clark 1979, Webster 1997) (Fig. 3.1):

a) Incremento Monotónico: la varianza se incrementa conforme la distancia entre puntos aumenta.

- b) Rango (a): límite de la dependencia espacial (los datos son independientes), la semivarianza a partir de este punto ya no se incrementa.
- c) Umbral o "Sill" (C_1): valor de la semivarianza cuando ésta ha alcanzado su rango.
- d) Varianza "Nugget" (C_0): variación espacialmente no correlacionada. Errores de medición y/o, la variación se da a distancias más pequeñas que el intervalo de muestreo más corto.

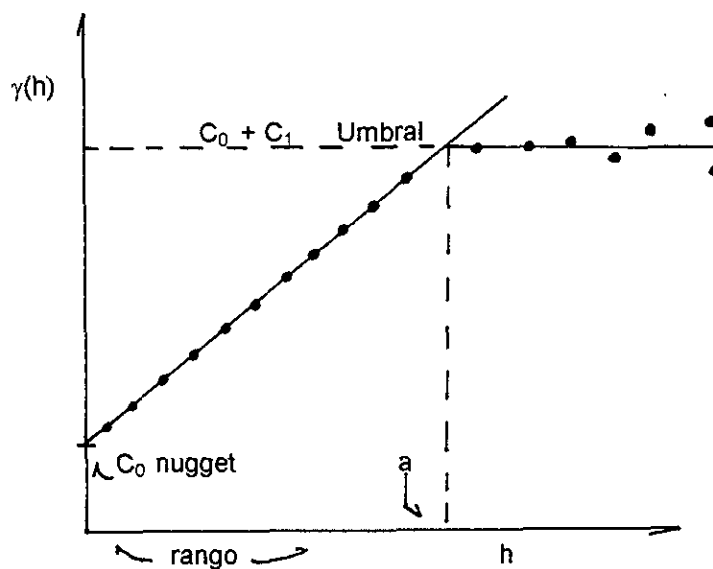


Fig. 3.1: Representación de un semivariograma, en el cual se observan sus parámetros principales: nugget, umbral y rango.

Para obtener una buena estimación del variograma, es importante contar con por lo menos entre 150 y 200 datos de la variable analizada. De este número de datos, depende el ajuste de un modelo de la variabilidad espacial (Webster y Oliver 1991^a). Existen distintos modelos que se pueden ajustar a un variograma de acuerdo a las características que presente; estos modelos, se clasifican en dos categorías principales (Webster 1997):

1. Con umbral: la varianza tiene un umbral y un rango, ej. modelos circular, esférico, exponencial, etc.
2. Sin umbral: la semivarianza se incrementa sin un límite aparente; el modelo más simple dentro de este grupo es el líneal.

Los semivariogramas pueden tener distintas formas. Un semivariograma típico, presenta rango, umbral y en general una varianza nugget. Es importante tener en cuenta, que la mayoría de los semivariogramas tienen esencialmente una forma simple, y mucho de la aparente complejidad que se pueda observar, suele relacionarse con fluctuaciones causadas por el muestreo (Webster 1993). Los diferentes modelos que se pueden ajustar a un semivariograma, se relacionan con distintos tipos de variación espacial. Así, por ejemplo, un modelo esférico describe una variación en donde el rango no tiene un límite abrupto, lo que quiere decir que el semivariograma se curvará de forma gradual; el modelo exponencial por otra parte, se aproxima al umbral de forma asintótica, y es la forma que se espera se presente, cuando los cambios en el tipo de suelo son abruptos (Burrough 1987, Webster 1993).

Una vez que se ha ajustado un modelo al variograma, se pueden estimar puntos no muestreados a través de Kriging, término que engloba distintas metodologías para predecir valores. En su forma más simple, el valor estimado por Kriging es una suma de los datos ponderados de acuerdo a su posición, tanto en relación al punto que se va a estimar x_0 , como a la distancia entre éste y un valor observado. Para obtener estas ponderaciones o "pesos", es que se utiliza el variograma. Así, puntos cercanos a x_0 , van a tener un mayor peso. Estos pesos, permiten reducir la varianza de la estimación al mínimo, misma que no presenta ninguna tendencia. Kriging también es un interpolador exacto, ya que el valor estimado para un punto sí muestreado, corresponde al valor ahí observado (Webster y Oliver 1991^b y Webster 1997). Por lo tanto, el valor estimado de Z en un punto x_0 corresponde a $Z_e(x_0)$, el cual es una media ponderada de los datos $z(x_1), z(x_2), \dots, z(x_n)$ (Webster 1997):

$$Z_e(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i z(x_i) \quad (9)$$

donde λ_i representa la ponderación o peso que se le asigna a cada dato. Para evitar tendencia:

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i z(x_i) = 1$$

y la varianza de la estimación hecha es:

$$\text{var}[Z_e(x_0)] = E[\{Z_e(x_0) - Z(x_0)\}^2] = 2 \sum_{i=1}^N \lambda_i \gamma(x_i, x_0) \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_i \lambda_j \gamma(x_i, x_j) \quad (10)$$

$\gamma(x_i, x_j)$ es la semivarianza de Z entre los puntos x_i y x_j , y $\gamma(x_i, x_0)$ es la semivarianza promedio del i ésimo dato y el punto que se estima.

Los valores estimados y sus varianzas pueden representarse por medio de mapas, los cuales nos brindan una mejor idea sobre la distribución de las estimaciones hechas; éstas dependen sólo del diseño de muestreo y del variograma, por lo que de esta forma es posible planear nuevos muestreos para obtener una mayor precisión (Webster 1993).

3.6 La zona federal del Ex-Lago de Texcoco.

La zona federal del Ex-Lago de Texcoco forma parte de la cuenca del Valle de México, y se encuentra comprendida dentro de las coordenadas UTM: 495,000 a 506,200 en "X" y 2,147,000 a 2,165,300 en "Y", a una altura de 2200 msnm. El clima para esta zona según el sistema de Köppen modificado por E. García, es semiseco con verano fresco y lluvioso, e invierno con un total de lluvia menor del 5% del total anual (BS₁Kw) (para el año de 1995 la temperatura media anual fue de 13.4°C, la máxima reportada de 32 °C, y la mínima de -2 °C). El periodo de

lluvias es de 6 meses, y comprende los meses de mayo a octubre, mientras que el período seco es de noviembre a abril (la precipitación total anual fue para el año de 1995 de 549.1 mm); generalmente, la precipitación se presenta de manera irregular y es de tipo torrencial, siendo julio el mes más lluvioso y febrero el de mínima precipitación; es importante mencionar que la evaporación total anual excede de manera importante a la precipitación total anual (para el año de 1995 fue de 2039 mm). Se presentan tres tipos de vientos: los de altura (provenientes del Oeste), los rasantes (provenientes del Noreste, Sureste y Noroeste), y los convectivos, los cuales dan lugar a remolinos que llevan en suspensión grandes cantidades de polvo, y que junto con los vientos rasantes, son responsables de la formación de tolvánicas (SRH 1971, SARH 1981^o, CNA 1996).

El área del Ex-Lago está conformada por sedimentos lacustres antiguos y recientes, y depositaciones de materiales coluviales principalmente de origen volcánico. A esta zona, llegan los afluentes de los siguientes ríos: San Juan Teotihuacán, Papalotla, Jalapango, Coxacoaco, Texcoco, Chapingo, San Bernardino, Santa Mónica, Coatepec, San Francisco, La Compañía y Churubusco. Además, existe un acuífero subterráneo de alta concentración salina, a unos 30 m de profundidad (SRH 1971).

La mineralogía está dominada por materiales amorfos, esmectitas, caolinita y cirstobalita. Los suelos del Ex-Lago de Texcoco se encuentran en terrenos planos y se clasifican como salino-sódicos, con valores de pH que varían de 7.8 a 10.5, siendo los más frecuentes de 9 a 10. La conductividad eléctrica puede variar de 0.4 a 120 dSm⁻¹, y el PSI suele encontrarse en rangos de 20-99%. Las texturas dominantes son las francas, aunque varían de franco-arenosas a arcillas. La estructura del suelo es granular hacia la parte más superficial, y prismática en el subsuelo. El drenaje natural es pobre y aunque los suelos son profundos, las raíces se ven restringidas por una capa compacta de cenizas, la cual se localiza entre los 16 y 40 cm de profundidad. También se presenta una capa llamada "jaboncillo" constituida por materiales amorfos, los cuales retienen hasta un 400% de agua; sin embargo, cuando se llegan a deshidratar sufren una fuerte

disminución en su volumen, con lo cual se forman grandes grietas. Finalmente, es importante mencionar que el manto freático se encuentra cercano a la superficie (80-150 cm) (SRH 1971, Gutierrez-Castorena 1997).

La mayor parte de la vegetación dentro de la zona del Ex-Lago de Texcoco, está conformada por plantas herbáceas, muchas de las cuales son halófitas. Los principales tipos que se pueden encontrar son (SRH 1971, CNA 1996):

a) Pastizal natural: corresponde a comunidades vegetales en donde predomina *Distichlis spicata* (pasto salado), principalmente en áreas muy salinas y/o inundables; cuando la salinidad no es tan severa, también se encuentran asociadas comunidades de varias especies de *Suaeda* (romerito), *Eragrostis obtusiflora* (zacahuistle), y algunas especies arbustivas como *Baccharis glutinosa* (jarilla) y *Buddleia cordata* (tepozán), entre otras.

b) Vegetación acuática: ejemplos de algunas de las especies nativas son: *Azolla caroliniana*, *Juncus balticus*, *Lemma gibba*, *Scirpus lacustris*, etc.

c) Areas forestadas: corresponden a zonas en las que por lo general se ha introducido subdrenaje; las principales especies presentes son *Casuarinaceae equisetifolia* y *Tamarix juniperina* (pino salado), aunque ninguna de las dos es una especie nativa.

Debido a las características generales presentes en la zona del Ex-Lago de Texcoco, la fauna que en ésta habita está comprendida principalmente por insectos y aves, aunque en áreas rehabilitadas se llegan a observar algunos roedores y liebres (CNA 1996). Los insectos presentes corresponden en su mayoría a diversas especies de moscos; entre éstos, *Ahuautlea mexicana* (axayácatl), se vende como alimento para aves, mientras que sus huevecillos, conocidos como "ahuautle", se utilizan para el consumo humano (SRH 1971, Alcocer y Williams 1996). En cuanto a las aves que se encuentran en esta zona,

Nezahualcóyotl; éste, permitió el uso del Lago México, al descargar sus aguas saladas en el Lago Texcoco, y remplazarlas con agua dulce de los lagos Chalco y Xochimilco. Con la llegada de los españoles, muchos de los diques construidos durante la época prehispánica fueron destruidos, y la Ciudad de México sufrió durante mucho tiempo, importantes inundaciones; por esta razón, en el siglo XVII se decidió desecar completamente el complejo de lagos, aunque no fue hasta el año de 1976, cuando se concluyeron las obras del Sistema Drenaje Profundo, que realmente se pudo resolver el problema. De los 7,868 km² que originalmente ocupaba el Lago de Texcoco, ahora quedan 70 km², de los cuales sólo 15 se encuentran permanentemente inundados; sin embargo, en años recientes, se han construido lagos artificiales como el Lago Nabor Carrillo, el Lago Curubusco, o la Laguna Xalapango (Cruickshank-García 1995, Alcocer y Williams 1996).

A partir del año de 1971 se creó el Plan Lago de Texcoco, ahora Proyecto Lago de Texcoco de la Comisión Nacional del Agua, el cual dentro de su primera etapa, tenía como objetivos principales el mejorar las condiciones ambientales de la zona, evitando la formación de tolveneras, y controlar y aprovechar los recursos hídricos existentes. Ambos objetivos se cumplieron al establecer una cubierta vegetal, principalmente de pasto salado (*Distichlis spicata*) (con la cual se redujeron de forma dramática las tolveneras que se generaban dentro de la zona), y con el encauzamiento de los ríos y corrientes de aguas negras que desembocaban en el área. Ahora dentro de su segunda etapa, el principal objetivo del Proyecto Lago de Texcoco es el establecimiento de una cubierta vegetal que incluya de forma masiva especies forestales (Cruickshank-García 1995).

De acuerdo al mapa "Avances del Programa de Forestación Zona Federal del Ex-Lago de Texcoco" (CNA-UNAM 1997), de las cerca de 10,000 ha que conforman esta zona, 1020 ha cuentan con una cubierta vegetal, a 1320 ha se les ha introducido subdrenaje, y 425 ha corresponden a áreas desnudas. A pesar de éste importante logro, es importante considerar que las especies principales utilizadas dentro de los procesos de pastización (*D. spicata* y aquellas

correspondientes al género *Tamarix* respectivamente), presentan un bajo porcentaje de sobrevivencia a largo plazo (33% para el pasto salado y 25% para *Tamarix*), por lo que se ha hecho indispensable continuar con actividades de replantación, riego y drenaje dentro de la zona (Cruickshank-García 1995).

Para poder entender y dar solución a los problemas de salinidad en la zona federal del Ex-Lago de Texcoco, hasta la fecha se han realizado y divulgado 5 estudios:

1. "Estudio Agrológico Espacial del Ex-lago de Texcoco, Edo. de México" (año 1971). En este trabajo se realizó un muestreo de suelos dentro de la zona federal y en áreas circundantes, para conocer la distribución y el grado de afectación por salinización. Además, se hizo una revisión sobre aspectos socioeconómicos y biológicos (flora y fauna) dentro de la zona. Este estudio, ha sido tomado como referencia en todos los trabajos posteriores (SRH 1971).

2,3. "Caracterización de la afectación salina de los suelos del Ex-Lago de Texcoco." Este trabajo se realizó del año 1978 al año de 1981, e incluye dos reportes. Se buscó caracterizar, clasificar y evaluar los cambios en las propiedades físicas y químicas del suelo tanto en el espacio como en el tiempo. Se utilizaron fotografías aéreas, y se hizo un muestreo de suelos, tomándose los datos en zonas representativas, las cuales se asignaron a partir de las fotos antes mencionadas (SARH 1981^{a, b}).

4. "Estudio Agrológico Detallado del Ex-lago de Texcoco Edo. de México." (año 1981). En este estudio se realizó un levantamiento de suelos con el fin de caracterizar y clasificar los suelos del Ex-Lago taxonómicamente, definiéndose distintas series de suelo; además se realizó otra clasificación de los mismos, en base a su capacidad de uso (SARH 1981^c).

5. "Estudio Agrológico de 3,000 hectáreas en la zona federal del Ex-Lago de Texcoco." Mediante un levantamiento de suelos en este trabajo se buscó caracterizar el grado de salinidad y sodicidad de la zona, actualizar la cartografía de la misma, y definir y evaluar el grado de recuperación de suelos en base a las prácticas de manejo realizadas, particularmente subdrenaje; además, se realizaron dos clasificaciones de suelos, una taxonómica de las series definidas para la zona, y otra en base a su capacidad de uso (CNA 1996).

Los trabajos realizados dentro de la zona federal han contribuido de forma importante a la delimitación y evaluación del problema de salinización que ésta presenta. Sin embargo, en ninguno de éstos se a realizado un análisis que considere la importancia del arreglo espacial de los datos obtenidos en distintos muestreos.

4. OBJETIVOS E HIPOTESIS.

Objetivo general:

Determinar mediante métodos geoestadísticos, la distribución espacial de variables indicadoras de salinización y sodificación, a partir de los datos de pH, CE y PSI de los muestreos realizados en 1971 y 1998, en la zona federal del Ex-Lago de Texcoco.

Objetivos particulares:

Evaluar si ha habido una disminución o un aumento en las variables indicadoras de salinización y sodificación, entre los años de 1971 y 1998.

Evaluar la relación de la distribución espacial de cada una de las variables indicadoras de salinización y sodificación con respecto a las condiciones en la zona del Ex-Lago de Texcoco, como son la vegetación presente, y el subdrenaje introducido.

Al ser la salinización un proceso dinámico tanto en el tiempo como en el espacio, es posible detectar a través del análisis geoestadístico de variables indicadoras (pH, CE y PSI), patrones en la distribución espacial dentro de la zona del Ex-Lago de Texcoco. Se espera que el gradiente en estas tres variables, refleje las condiciones en cada sitio, como son la presencia de vegetación o de subdrenaje interno, los cuales implicarían un menor valor de las variables antes mencionadas. Dado que los métodos geoestadísticos permiten conocer el error de los datos debido al diseño de muestreo y/o por las mediciones en el laboratorio, es posible observar el efecto de estos dos factores en los datos de 1971 y 1998, y finalmente, en las estimaciones realizadas a partir de éstos.

5. MATERIALES Y MÉTODOS.

5.1 Recopilación de los datos y delimitación de la Zona de Estudio.

Para el análisis de la distribución espacial de la salinidad y sodicidad del suelo, se utilizaron bases de datos ya existentes. Estas corresponden al "Estudio Agrológico Espacial del Ex-Lago de Texcoco, Edo. de México" (SRH 1971), y al muestreo realizado por la Gerencia del Ex-Lago de Texcoco en 1998 (CNA 1998). En el primer caso, se trató de un muestreo de suelos durante la temporada de estiaje, dentro de un área de 410.34 km² (coordenadas UTM en "X" de 494,278 a 509,088, y en "Y" de 2141,181 a 2168,888), que incluía tanto la zona federal como zonas circundantes (Fig. 5.1). Se menciona que este muestreo fue "selectivo", probablemente refiriéndose a que los sitios de donde se tomaron los datos se seleccionaron previamente, aunque no se especifica el criterio utilizado. Sin embargo, se asume que se pudieron haber elegido a juicio personal, buscando escoger las zonas "típicas" o más representativas, o pudo tratarse de un muestreo aleatorio. Es importante señalar que las distancias entre observaciones son irregulares (Fig. 5.2). El número total de muestras fue de 800, correspondientes a 200 barrenaciones en profundidades constantes de 0-30 cm, 30-60 cm, 60-120 cm y 120-200 cm. No se menciona si estas muestras fueron simples o compuestas, ni si hubo alguna preparación de las mismas antes de los análisis de laboratorio. Estos análisis incluyeron la medición de la conductividad eléctrica (CE) en el extracto de saturación, el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y el pH. No se especifican ni el material ni la metodología utilizados para medir estas tres variables. Dado que la localización de los puntos de muestreo se presentó exclusivamente en el mapa de "Salinidad y Sodicidad" elaborado en este mismo estudio, las coordenadas correspondientes se obtuvieron mediante la digitalización de este mapa. Para este propósito, se utilizaron el programa Ilwis 2.1 para windows, y una tableta digitalizadora y un digitalizador "Calcomp". El mapa fue colocado y fijado en la tableta, y mediante el digitalizador se georeferenció la zona del muestreo; finalmente, se leyeron y almacenaron en el

programa las coordenadas "X" y "Y" de cada observación, quedando conformada la base de datos.

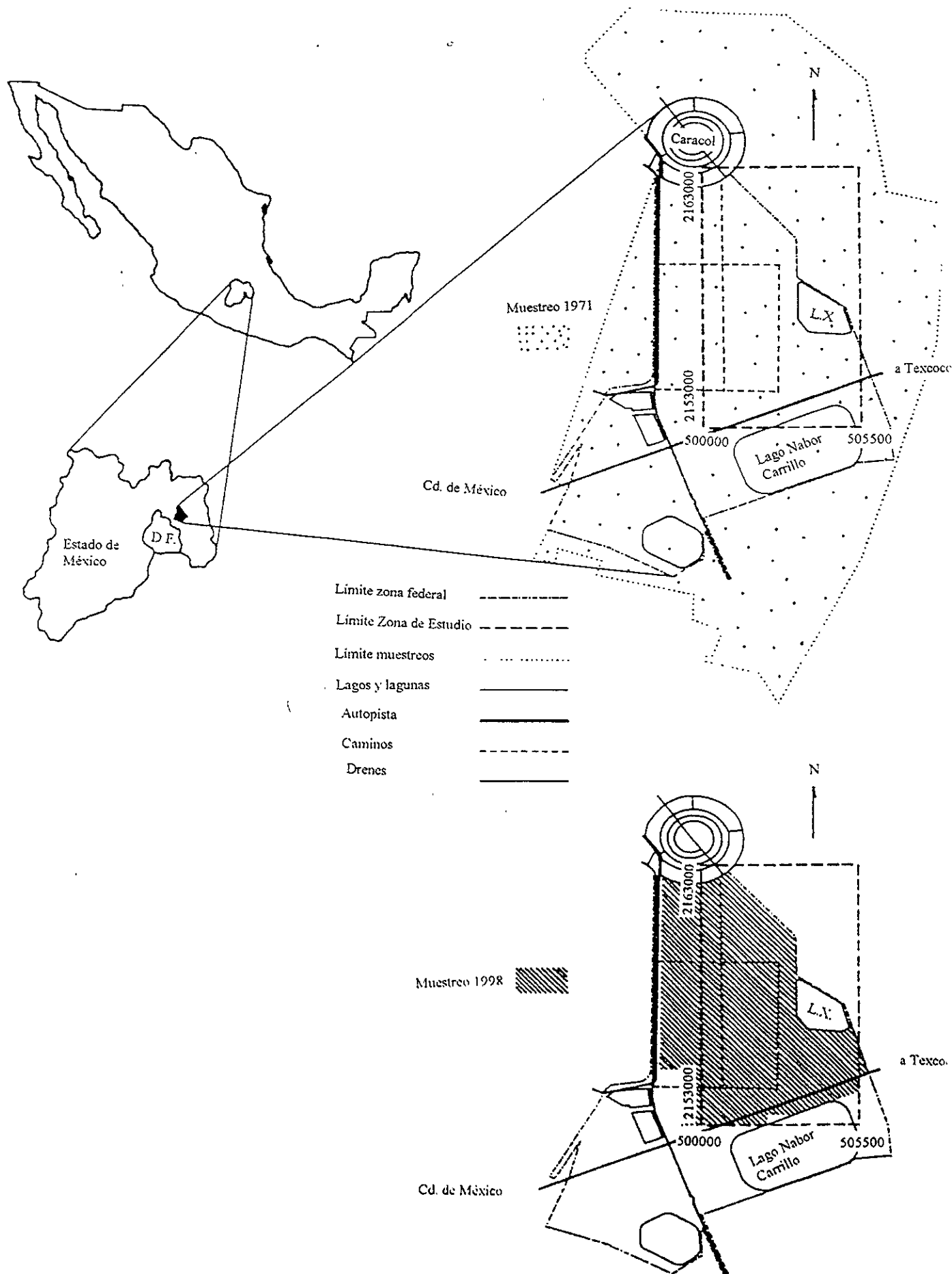


Fig. 5.1 Ubicación de la Zona de Estudio en referencia a la zona federal del Ex-Lago de Texcoco (se indican también el área de los muestreos correspondientes al año de 1971 y 1998) (SRH 1971, CNA 1998).

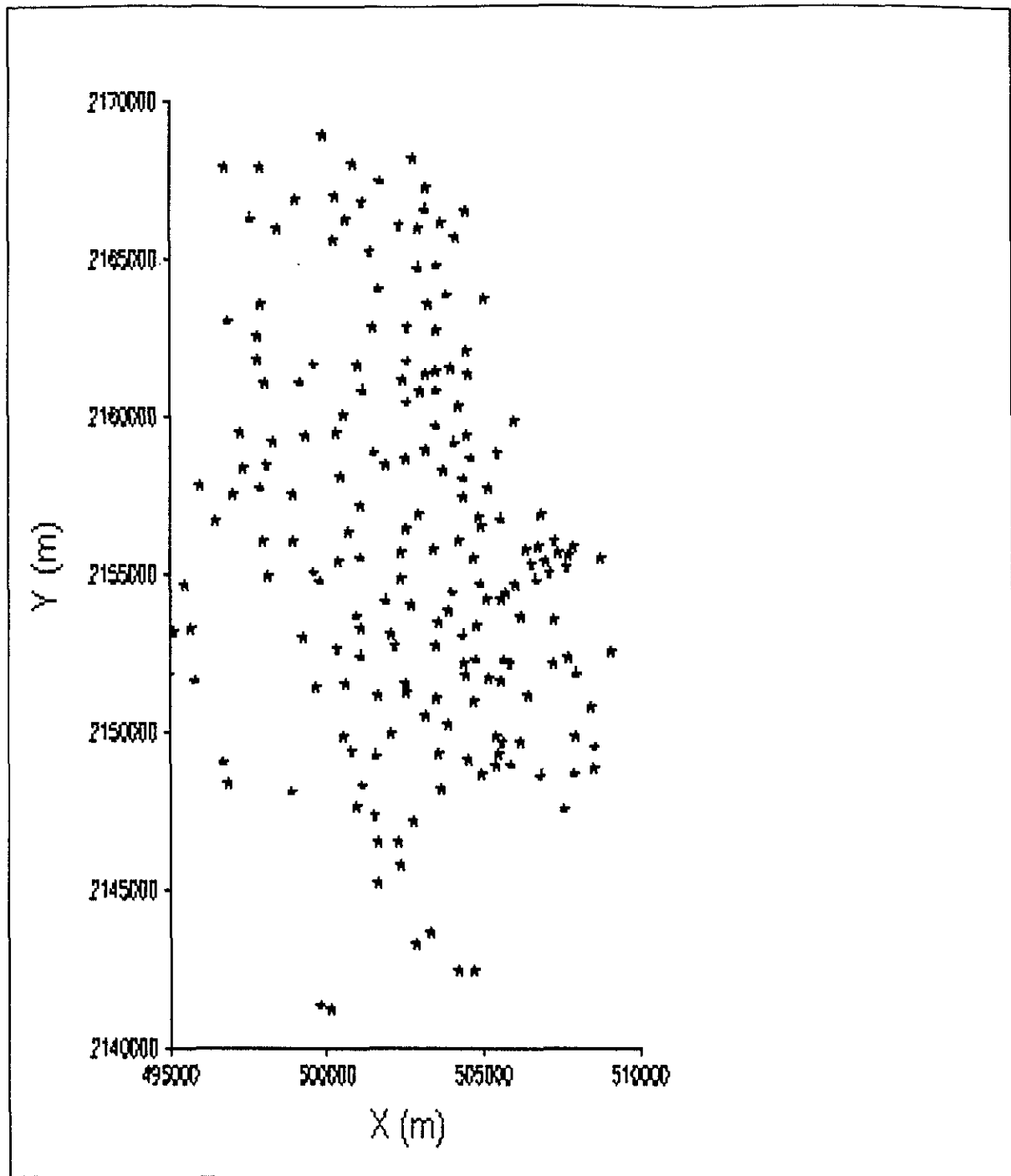


Fig. 5.2: Ubicación de todos los sitios de muestreo del estudio de 1971 (SRH 1971).

El muestreo del año 1998 se realizó durante el mes de mayo, en un área de 69.44 km² con coordenadas UTM en "X" de 498,604 a 506,079, y en "Y" de 2,153,255 a 2,162,551, exclusivamente dentro de los límites de la zona federal (Fig. 5.1). Se trató de un muestreo sistemático, en el cual los intervalos en los que se tomaron las muestras correspondieron a una rejilla preestablecida, y en donde la distancia promedio entre dos puntos contiguos fue de 500 m (Fig. 5.3). Mediante la utilización de barrenas, se obtuvieron 446 muestras compuestas (4 submuestras por punto de muestreo, dentro de un radio de 5 m), tomadas de igual forma en dos distintas profundidades, 0-30 cm y 30-60 cm (223 muestras en cada profundidad). Los análisis de laboratorio incluyeron la medición de la CE, del pH y de la concentración de los cationes solubles de sodio, potasio, calcio y magnesio, además de sulfatos y carbonatos (estas concentraciones se midieron en meq l⁻¹). No se especifican ni el tratamiento previo dado a las muestras, ni los métodos y materiales empleados. En el caso de la concentración de sodio soluble, los datos fueron transformados a porcentaje de sodio intercambiable (PSI), mediante la siguiente fórmula (Richards et al. 1973):

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

en donde x es la relación de adsorción de sodio expresada en meq l⁻¹ (RAS):

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

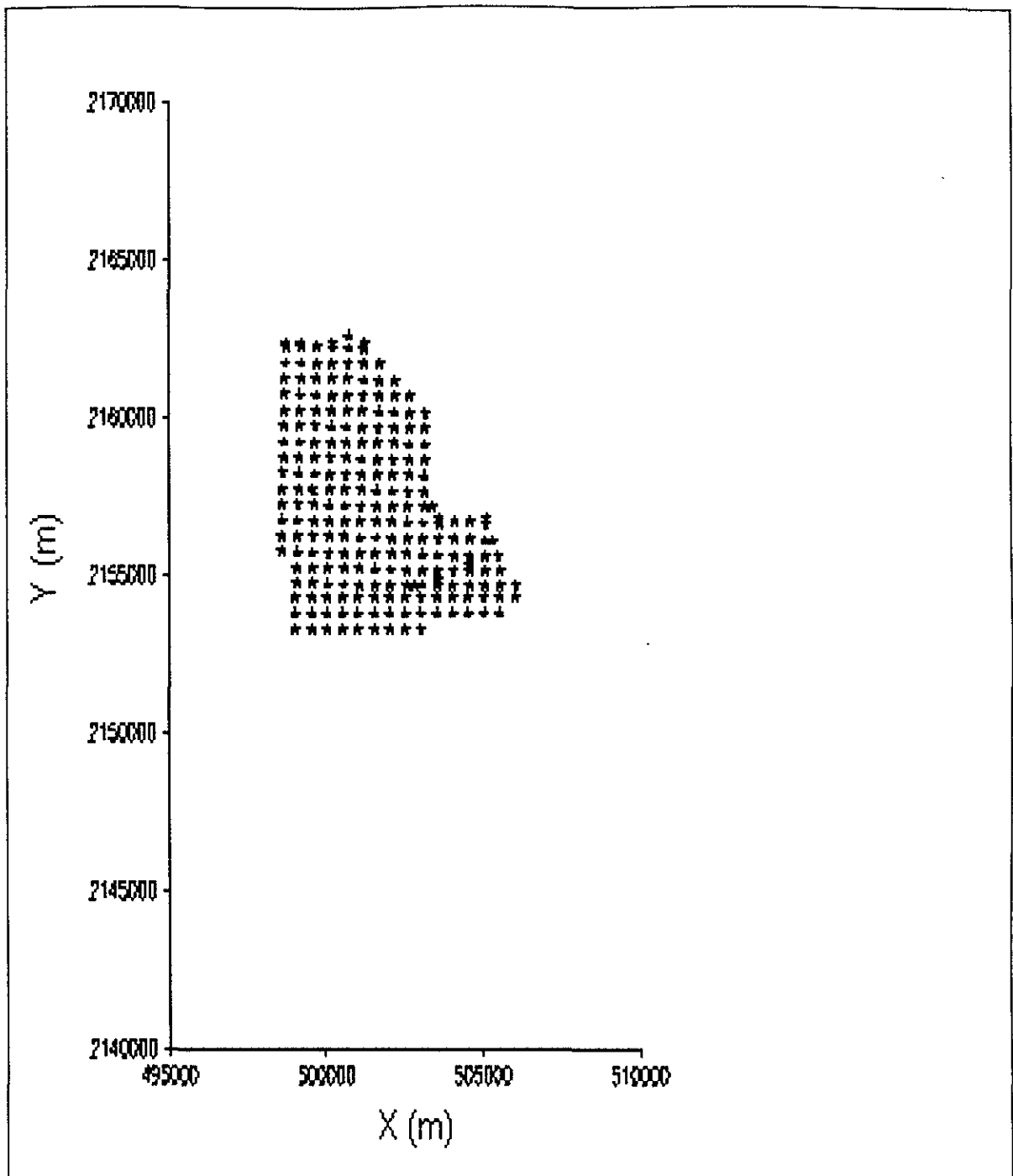


Fig. 5.3: Ubicación de todos los sitios de muestreo del estudio de 1998 (CNA 1998).

La transformación a PSI parte de la relación existente entre la concentración de un ion en la solución del suelo, y su respectiva saturación en los sitios de intercambio iónico. Para el caso del sodio, esto equivale a la relación de adsorción de sodio (RAS), y a la relación de sodio intercambiable (ésta última relación se obtiene cuando el sodio intercambiable se divide entre la diferencia de la capacidad de intercambio y el sodio intercambiable). Por lo tanto, mediante un análisis de regresión lineal, se obtienen los parámetros utilizados para la transformación de la concentración de sodio soluble a PSI. Es importante señalar, que esta relación reportada en la literatura presenta coeficientes de correlación cercanos a uno, lo cual permite su uso práctico; sin embargo, ésto supone cierto grado de error en la transformación de los datos (el coeficiente de correlación reportado es de 0.923) (Richards et al. 1973).

Se realizó un análisis estadístico exploratorio para cada variable, tomando cada profundidad existente de las bases de datos de 1971 y 1998 por separado. Los estadísticos descriptivos y diagramas de caja se obtuvieron mediante el programa Genstat 5 versión 4.1 para windows, y permitieron caracterizar la distribución estadística de los datos. De esta forma se pudo conocer la dispersión de los datos con respecto a los valores de tendencia central, y se ubicaron aquellos puntos extremos que contribuyeran al sesgo de los mismos.

La Zona de Estudio para la cual se utilizaron parte de las bases de datos de los muestreos de 1971 y 1998, comprende un área de 55 km² con coordenadas UTM en "X" de 500,000 a 505,500, y en "Y" de 2,153,000 a 2,163,000 (Fig. 5.1). El primer criterio para la delimitación de esta zona, fue el de incluir la totalidad de los sitios del muestreo de 1998, mismos que se localizan sólo dentro de la zona federal del Ex-Lago de Texcoco; sin embargo, la delimitación final dependió del programa utilizado para la interpolación de los datos, Genstat 5 versión 4.1 para windows. En primer lugar, en este programa el área a interpolar siempre está conformada por un rectángulo, razón por la cual la Zona de Estudio incluye parte de la zona federal y una menor área exterior; en segundo lugar, el programa presenta una limitación con respecto al número de observaciones mínimas necesarias para realizar los cálculos correspondientes (por ejemplo, la rejilla utilizada para el muestreo de 1998, tiene un límite irregular, por lo que si se traza un rectángulo que la incluya, quedará un área sin observaciones; es el tamaño de esta área el que ésta limitado por el programa). De esta forma, se compararon las tres variables indicadoras de salinidad dentro de la Zona de Estudio para el año de 1971 y 1998, incluyéndose 57 y 161 observaciones respectivamente, en cada profundidad muestreada (Fig. 5.4 y Fig. 5.5).

Para la ubicación y una primera evaluación comparativa del total de observaciones realizadas en los muestreos de 1971 y 1998, así como para los datos de ambos años incluidos dentro de la Zona de Estudio, se empleó el programa Genstat 5 versión 4.1. Mediante éste mismo programa, se graficó la distribución espacial de los valores "relativos" de las observaciones localizadas únicamente dentro de la Zona de Estudio, considerando cada variable y profundidad de 1971 y 1998 por separado. El valor "relativo" se asignó mediante un tamaño de círculo en cada punto de muestreo, utilizando la siguiente fórmula:

valor relativo para cada variable = $\frac{\text{valor en cada punto de muestreo } X \text{ del círculo}}{\text{valor máximo de los datos dentro de la Zona de Estudio en una profundidad dada}}$ tamaño preestablecido

Entre mayor sea la diferencia del valor en cada punto de muestreo, con respecto al valor máximo para cada variable en cada una de las distintas profundidades, mayor será la diferencia en el tamaño de los círculos; de esta forma, círculos homogéneos dentro del Zona de Estudio indican que la diferencia entre el valor máximo y el valor de las observaciones no es muy grande, círculos de menor tamaño indican un valor relativo menor en comparación al máximo, y el círculo de mayor tamaño indica este máximo.

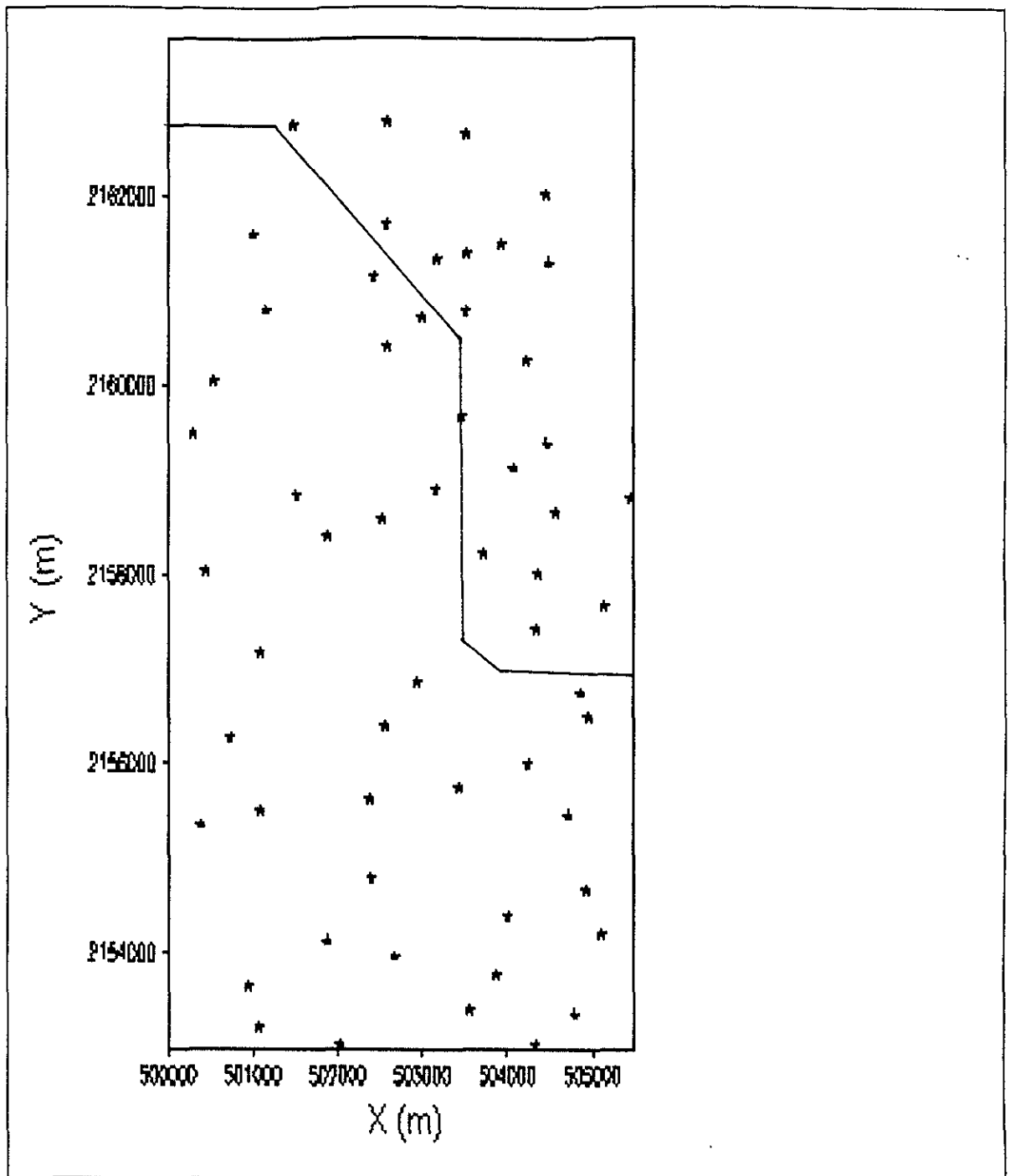


Fig. 5.4: Ubicación de los sitios de muestreo del estudio del año de 1971 localizados dentro de la Zona de Estudio (la línea más gruesa indica el límite Norte de la zona federal).

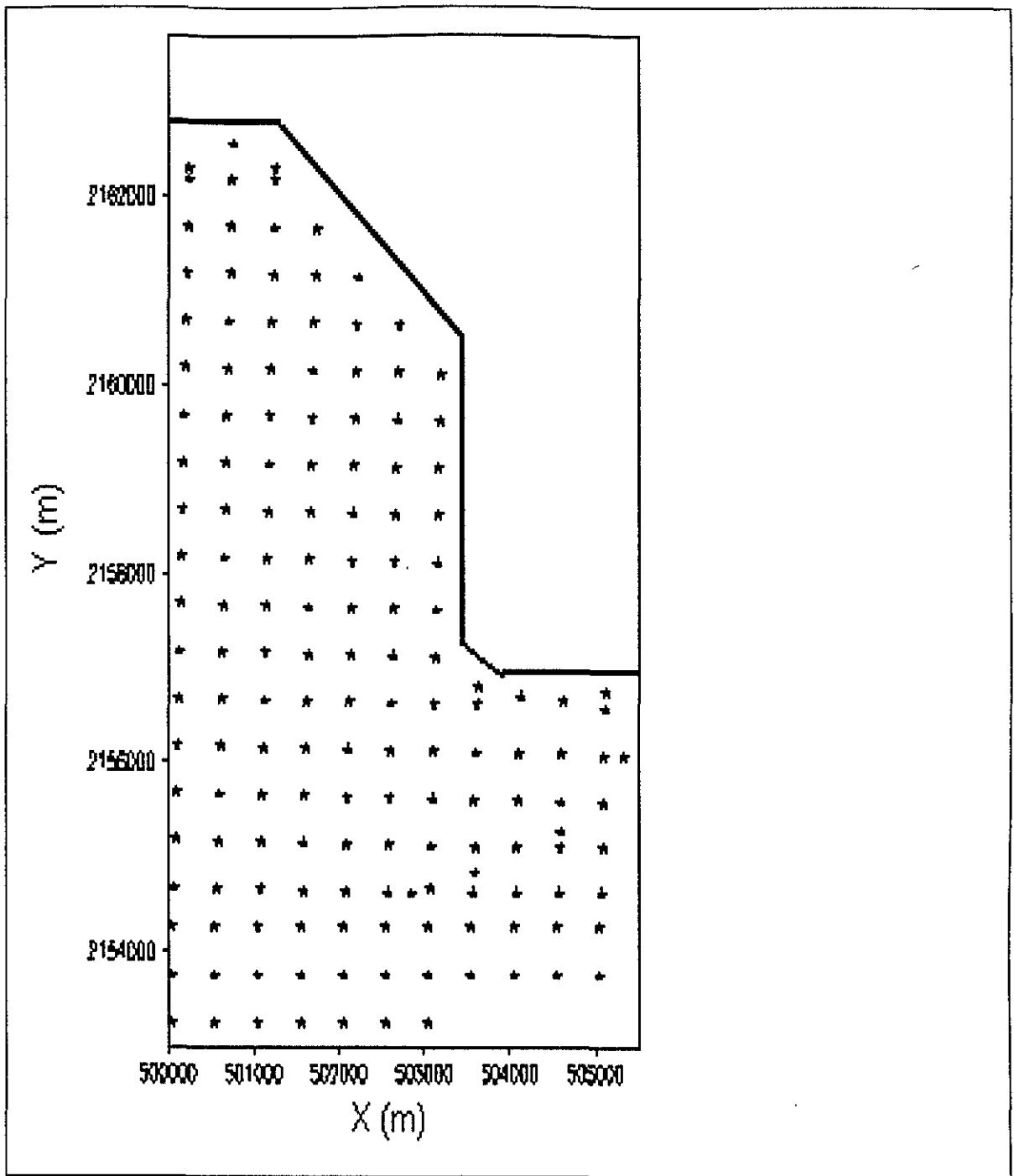


Fig. 5.5: Ubicación de los sitios de muestreo del estudio del año de 1998 localizados dentro de la Zona de Estudio (la línea más gruesa indica el límite Norte de la zona federal).

5.2 Estadística descriptiva de la Zona de Estudio.

Al igual que para el total de los datos de los muestreos del año 1971 y 1998, se hizo un análisis exploratorio de los datos correspondientes a la Zona de Estudio, utilizando el programa Genstat 5 versión 4.1 para windows. Se caracterizó a cada variable, tomando cada una de las profundidades muestreadas en cada año por separado. Con el mismo propósito, se realizaron histogramas y diagramas de caja. En este caso, el poder conocer como se distribuyen estadísticamente los datos, su dispersión, y la identificación de puntos extremo, contribuye para que el análisis geoestadístico que se realice posteriormente sea óptimo; ésto quiere decir, que entre mayor sea la aproximación de los datos a la normal, el valor observado y el valor estimado en un mismo punto son equivalentes (Laslett y Mc Bratney 1990). Finalmente, se realizó una prueba de "t" con un alfa del 5%, para determinar si existen diferencias significativas entre las profundidades de cada variable, tomando los datos de 1971 y 1998 localizados dentro de la Zona de Estudio por separado.

5.3 Análisis Geoestadístico: semivariogramas y ajuste de modelos.

Para cada variable dentro de la Zona de Estudio, y considerando cada una de las profundidades en 1971 y 1998, se realizaron los siguientes análisis utilizando el programa Genstat 5 versión 4.1 para windows:

- a) Semivariogramas en diferentes direcciones (ángulos 0, 45, 90 y 135 grados respectivamente), para detectar isotropía o anisotropía en los datos a una distancia total de 5000 m.
- b) Semivariogramas en una sola dirección, en los cuales a las tres variables medidas en ambos años, se les ajustaron por el procedimiento de mínimos cuadrados los siguientes modelos (Webster 1997):

1. Lineal o Potencial:

$$\gamma(h) = wh^\alpha$$

$$0 < \alpha < 2,$$

en donde $\gamma(h)$ es la semivarianza a una distancia entre dos puntos dada, "h"; el exponente " α " es igual a 1 para el modelo lineal, o mayor a 1 y menor a 2, para el modelo potencial, y "w" es el gradiente que describe la intensidad de la variación.

2. Circular:

$$\gamma(h) = c \left\{ 1 - \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{h}{a} \right) + \frac{2h}{\pi a} \sqrt{1 - \frac{h^2}{a^2}} \right\} \quad \text{para } h \leq a,$$

al tratarse de un modelo con umbral, el parámetro "c" en la ecuación representa la varianza umbral, y "a" su rango.

3. Esférico:

$$\gamma(h) = c \left\{ \frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right\} \quad \text{para } h \leq a$$

$$c \quad \text{para } h > a.$$

4. Exponencial:

$$\gamma(h) = c \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{h}{r}\right) \right\}.$$

En esta ecuación “ r ” es un parámetro de distancia que controla la extensión espacial del modelo, ya que en éste, la aproximación al umbral es asintótica, y por lo tanto no existe un rango definido. Sin embargo, por razones prácticas se asigna como rango a la distancia en la cual γ equivale al 95% de la varianza umbral (aproximadamente $3r$).

5. Correlación elemental de Whittle:

$$\gamma(h) = c \left\{ 1 - \frac{h}{r} K_1\left(\frac{h}{r}\right) \right\},$$

al igual que en el modelo anterior, “ r ” es un parámetro de distancia, y K_1 corresponde a la función modificada de Bessel de segundo orden.

El modelo seleccionado para cada variable, y la diferencia en la distancia final a la cual se hizo el ajuste, dependieron de tres criterios. En primer lugar, al estar las tres variables en cada profundidad influenciadas por los mismos procesos, se les ajustó un mismo modelo (los datos de 1971 y 1998 se consideraron por separado); el porcentaje de variabilidad explicado por cada modelo debía ser lo más cercano a un 100% en las tres variables de una misma profundidad. Finalmente, se compararon los valores estimados mediante el modelo seleccionado, con los datos observados; para cada variable y tomando cada una de las profundidades existentes en 1971 y 1998 por separado, se

estimó la diferencia de los datos observados menos los datos estimados, y se obtuvo un promedio de estas diferencias (error promedio o error media); cuando no existe diferencia entre los datos estimados y los datos observados, este promedio es igual a cero. Además, al elevar al cuadrado la diferencia entre observaciones y estimaciones, y dividirla entre la varianza de las estimaciones, se obtiene una razón que en caso de que las observaciones y las estimaciones sean iguales, debe tener el valor de uno.

5.4 Análisis Geoestadístico: Interpolación de los datos mediante Kriging Ordinario.

En el programa Genstat 5 versión 4.1 para windows, se especificaron el modelo de ajuste y los componentes del semivariograma correspondientes, para estimar valores de puntos no muestreados de pH, CE y PSI dentro de la Zona de Estudio. Las estimaciones se realizaron en intervalos de 200 m, utilizando el método de Kriging Ordinario (éste asume que no se conoce la media de la variable). De igual forma, se obtuvo la varianza de cada estimación y a partir de ésta el error estándar.

Con el fin de obtener una mejor presentación de los resultados, tanto de las estimaciones realizadas como de su error estándar, se realizó nuevamente una interpolación a mapas raster mediante una media móvil, y el inverso de la distancia, utilizando el programa Ilwis versión 2.1 para windows. Estos mapas se clasificaron en este mismo programa, a manera de presentar la mayor información posible en cuanto al gradiente en la distribución espacial de cada variable; la asignación de clases para la estimación de cada una de éstas, fue la misma sin importar año o profundidad. Las clases asignadas al error estándar, dependieron de la dispersión de los datos de cada variable en cada profundidad, y al igual que para las variables analizadas, la asignación de clases buscó representar el gradiente de distribución espacial existente.

Finalmente, los mapas se exportaron al programa Corel draw versión 8, en el cual se rotularon y se ajustaron a un tamaño fijo, donde 1 cm en el mapa representa 500 m de la Zona de Estudio.

5.5 Evaluación del cambio entre 1971 y 1998.

Se compararon las distribuciones espaciales del pH, CE y PSI, en 1971 y en 1998, para las profundidades de 0-30 cm y de 30-60 cm, con lo que se evaluaron los cambios ocurridos para cada variable entre los dos años. La comparación se realizó mediante la diferencia de los valores estimados en 1998 y los valores estimados en 1971. Para los casos en los que no se realizaron estimaciones, se utilizó el promedio de la base de datos de la Zona de Estudio para esa variable y profundidad. Para las tres variables, se tomó un resultado negativo de esta diferencia como una disminución en 1998 con respecto a 1971 (clase "disminuye"), y un valor positivo como la situación contraria (clase "aumenta"). Aquellos puntos en donde la diferencia era igual a cero, se consideraron dentro de la primera categoría mencionada. Al igual que en los mapas anteriores, estos mapas de "cambio" se interpolaron y clasificaron en el programa Ilwis versión 2.1 para windows, y posteriormente se exportaron al programa Corel draw versión 8. Los promedios de las estimaciones realizadas para las tres variables en cada profundidad (0-30 cm y 30-60 cm), se compararon mediante una prueba de "t" con un alfa del 5%.

6. RESULTADOS.

6.1 Recopilación de los datos y delimitación de la Zona de Estudio.

La Tabla 6.1.1 muestra los estadísticos descriptivos de cada una de las variables, para el total de los datos de los muestreos realizados en 1971 y 1998. En el caso del pH, los valores promedio en todas las profundidades para ambos muestreos, se encuentran en intervalos correspondientes a suelos sódicos (un pH a partir de 8.5 se considera como indicador de un suelo sódico (Brady y Weil 1996)). En el año de 1971, la media de los datos indica que los valores de pH tienden a disminuir ligeramente de 9.21 en los primeros 30 cm, a 9.13 a más de 120 cm de profundidad, mientras que para 1998, los valores de pH son de 9.59 y 9.69 para las profundidades de 0-30 cm y de 30-60 cm, respectivamente. Por otra parte, se observa un sesgo negativo de los datos en todas las profundidades de ambos años, el cual está indicado en los diagramas de caja (Fig. 6.1.1a), y por el coeficiente de sesgo, ya que cuando éste no es igual a cero, se tiene una distribución no simétrica de los datos. Al comparar los valores promedio para ambos años, éstos son menores en 1971 (9.13-9.21 en 1971, y 9.59-9.69 en 1998), lo cual puede deberse a las diferencias en la ubicación de los puntos de muestreo en ambos años; en el muestreo de 1971, se incluyeron datos de zonas con vegetación halófila (*Distichlis spicata*) y zonas agrícolas, según los mapas de "Vegetación" y "Salinidad y Sodicidad" del "Estudio Agrológico Espacial del Ex-Lago de Texcoco, Edo. de México" (SRH, 1971). La gran mayoría de los puntos extremos del muestreo de 1971, se encuentran localizados en las zonas anteriormente mencionadas, y presentan los siguientes rangos de pH en las cuatro distintas profundidades muestreadas: 5.5-6.9 (0-30 cm), 6.1-7.2 (30-60 cm), 6.0-6.9 (60-120 cm), y 5.8-6.9 (120-200 cm). Así mismo, la varianza de los datos es menor en el año de 1998 que en 1971 (0.85 en 1971 y 0.59 en 1998 para los primeros 30 cm, y 0.73 en 1971, y 0.41 en 1998 hasta 60 cm de profundidad).

Con respecto a la conductividad eléctrica, los valores promedio del año 1971 (30.69-47.11 dSm^{-1}) y 1998 (77.79-105.80 dSm^{-1}), superan los intervalos en donde se desarrollan la mayoría de los cultivos (hasta 16 dSm^{-1} (Richards et al. 1973)). Se observa en todos los casos, que la media tiende a disminuir conforme la profundidad aumenta, de 47.11 dSm^{-1} en los primeros 30 cm, a 34.51 dSm^{-1} a más de 120 cm en 1971, y de 105.80 dSm^{-1} en los primeros 30 cm, a 77.79 dSm^{-1} a más de 60 cm de profundidad en 1998. En este caso, la ubicación de los puntos de muestreo para ambos años no muestra una clara relación con la diferencia en los valores promedio, a pesar de que para 1998, éstos sobrepasan considerablemente a los valores de 1971. En todas las profundidades se presentó un sesgo positivo, indicado en los diagramas de caja (Fig. 6.1.1a) y por el coeficiente de sesgo; los puntos extremos en las cuatro profundidades del muestreo de 1971, se encuentran localizados en áreas denominadas como "desnudas" según los mapas de "Vegetación" y "Salinidad y Sodicidad" del Estudio Agrológico realizado en ese mismo año (SRH 1971). Es importante hacer notar, que la varianza de los datos en 1998 (8269 y 4703 para las profundidades de 0-30 y 30-60 cm respectivamente) es mayor a la varianza de los datos en 1971 (1093.99 en los primeros 30 cm, y 388.75 hasta 60 cm), lo cual indica una mayor dispersión de los datos para el muestreo de 1998.

Finalmente, el promedio de los valores de porcentaje de sodio intercambiable se encuentran en 1971 entre 68.58 y 74.95, y entre 73.19 y 75.31 en 1998. Estos valores están por arriba de los tolerados por la mayoría de las plantas (hasta un PSI de 13 (Brady y Weil 1996)). El valor promedio más alto para el año de 1971, se encuentra en los primeros 30 cm (74.95), mientras que en 1998, el valor promedio mayor se encuentra en la profundidad de 30-60 cm (75.31). Para esta variable, el valor promedio de PSI de la profundidad de 0-30 cm en 1971 (74.95), es ligeramente mayor respecto al valor promedio de la misma profundidad en 1998 (73.19), y en la profundidad de 30-60 cm el valor más alto es el de 1998 (68.58 en 1971, y 75.31 en 1998). Se presenta un sesgo negativo para todas las profundidades de ambos años, aunque para el año de 1998 hay un

menor número de puntos extremos en las dos profundidades muestreadas (0-30 cm y 30-60 cm) (Fig. 6.1.1a). Al igual que para el pH, la mayoría de los puntos extremos se encuentran localizados dentro de zonas con vegetación halófila y zonas agrícolas (SRH 1971), presentando los siguientes intervalos de PSI en las cuatro profundidades muestreadas: 0.2-26.7 (0-30 cm), 0.2-18.6 (30-60 cm), 0.2-15.5 (60-120 cm), y 0.1-16.9 (120-200 cm). La varianza de la profundidad de 0-30 cm en 1971 (595.40) es menor que la varianza de 1998 para esa misma profundidad (607.10); en el rango de 30-60 cm de profundidad, la varianza es menor en el año de 1998 que en el año de 1971 (399 y 627.7 respectivamente).

Tabla 6.1.1 Estadísticos descriptivos para todos los datos de los muestreos realizados en 1971 y 1998.

pH		media	mediana	varianza	d. estandar (a)	c. sesgo (b)	mínimo	máximo
profundidad	1971							
0-30cm		9.21	9.25	0.85	0.92	-1.30	5.50	10.70
30-60cm		9.18	9.30	0.73	0.85	-1.35	6.00	10.50
60-120cm		9.15	9.20	0.63	0.80	-1.13	6.00	10.30
120-200cm		9.13	9.20	0.69	0.83	-1.27	5.80	10.60
profundidad	1998							
0-30cm		9.59	10.00	0.59	0.77	-0.96	7.50	10.50
30-60cm		9.69	9.90	0.41	0.64	-1.39	7.40	10.60
CE (dSm)								
profundidad	1971							
0-30cm		47.11	43.00	1093.99	33.08	0.98	0.60	180.00
30-60cm		30.69	30.00	388.75	19.72	0.70	0.50	114.00
60-120cm		31.70	30.00	416.63	20.41	0.47	0.50	100.00
120-200cm		34.51	30.00	554.07	23.54	0.83	0.50	140.00
profundidad	1998							
0-30cm		105.80	84.00	8269.00	90.94	0.69	2.00	410.00
30-60cm		77.79	62.00	4703.00	68.58	1.75	2.00	457.00
Na (PSI)								
profundidad	1971							
0-30cm		74.95	86.00	595.40	24.40	-1.49	0.20	100.00
30-60cm		68.58	77.00	627.70	25.05	-1.24	0.20	96.00
60-120cm		69.57	78.60	658.40	25.66	-1.30	0.20	94.00
120-200cm		69.08	79.30	754.70	27.47	-1.24	0.10	96.00
profundidad	1998							
0-30cm		73.19	85.70	607.10	24.64	-1.01	10.20	96.70
30-60cm		75.31	83.00	399.00	19.98	-1.18	9.40	97.80
(a) desviación estandar								
(b) coeficiente de sesgo								

Nota: el número de observaciones de cada variable en cada una de las distintas profundidades es de 200 para el año de 1971, y de 223 para el año de 1998.

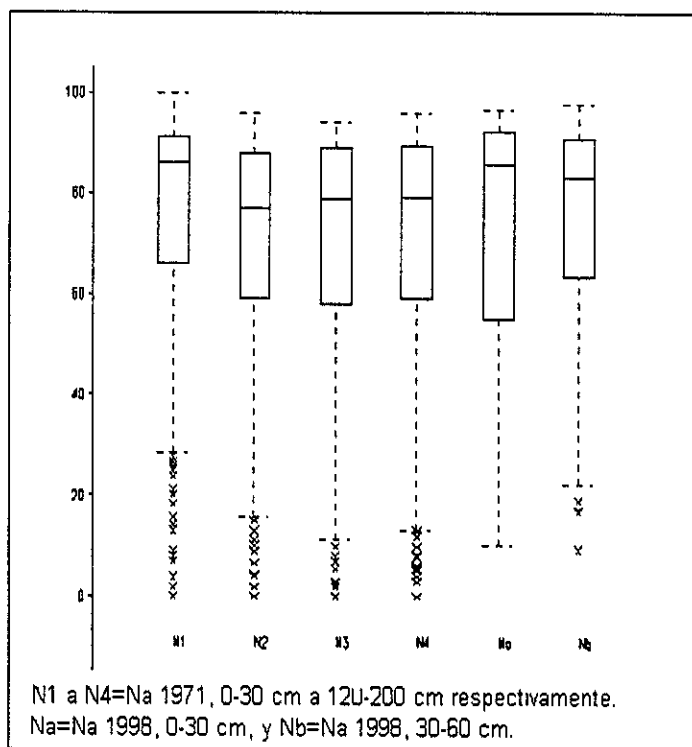
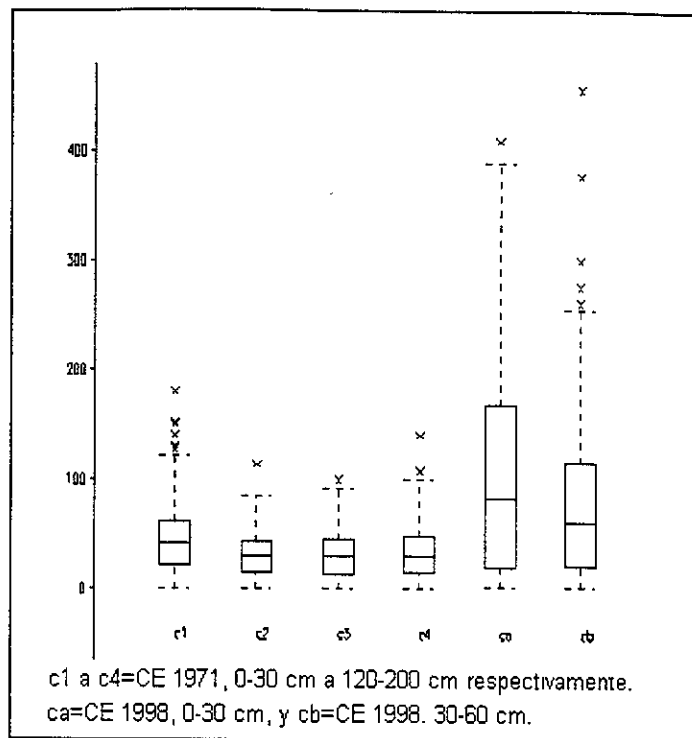
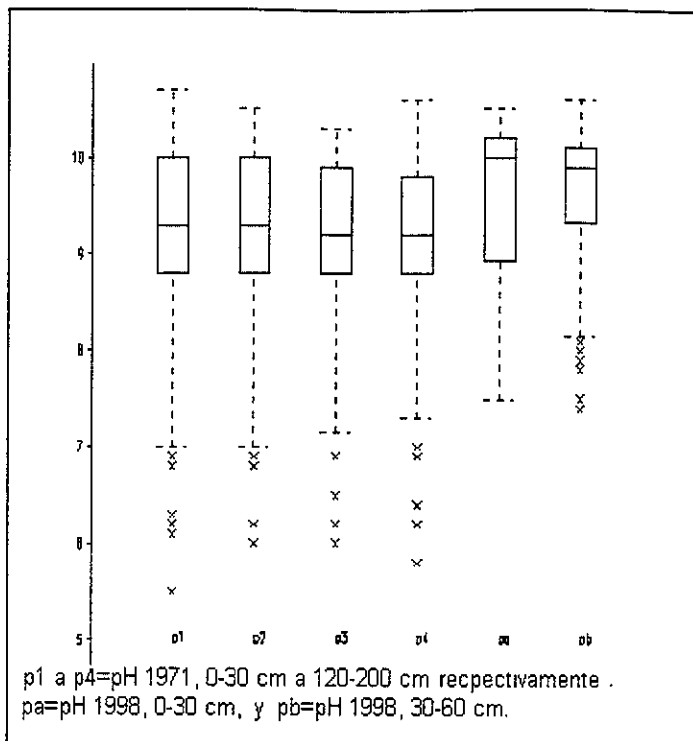


Fig. 6.1.1a: Diagramas de caja para todos los datos de los muestreos realizados en 1971 y 1998.

Las figuras 6.1.2a a 6.1.2f, muestran la ubicación de las observaciones comprendidas únicamente dentro de la Zona de Estudio. Además, se muestra la distribución espacial de los valores relativos para las tres variables, de acuerdo al tamaño de círculo en cada punto de muestreo. Como se mencionó anteriormente, entre mayor sea la diferencia del valor en cada punto de muestreo, con respecto al valor máximo para cada variable en cada una de las distintas profundidades, mayor será la diferencia en el tamaño de los círculos; de esta forma, círculos homogéneos dentro del Zona de Estudio indican que la diferencia entre el valor máximo y el valor de las observaciones no es muy grande, círculos de menor tamaño indican un valor relativo menor en comparación al máximo, y el círculo de mayor tamaño indica este máximo.

Para el pH en las cuatro profundidades del año 1971, se observa una distribución relativamente homogénea del tamaño de los círculos, a excepción de aquellos ubicados en el extremo Noreste de la Zona de Estudio, los cuales se representan en la Fig. 6.1.2a con círculos en color rojo, e indican un pH menor a 8.5; La distribución del tamaño de círculos para 1998 en ambas profundidades, es también homogénea para la mayor parte de la Zona de Estudio (Fig. 6.1.2b).

En el caso de la conductividad eléctrica, en todas las profundidades del año 1971, se aprecia que los círculos más pequeños se encuentran hacia la parte Noreste de la Zona de Estudio (Fig. 6.1.2c), y en 1998, los valores más altos se ubican en la parte Norte dentro de esta misma zona (Fig. 6.1.2d).

Por último, al igual que para el pH y la CE, el porcentaje de sodio intercambiable de año 1971, presenta los círculos de menor tamaño en la parte Noreste de la Zona de Estudio (Fig. 6.1.2e), mientras que en el año de 1998, el tamaño de círculos tiende a disminuir hacia la parte Sureste. Es importante mencionar, que los sitios de muestreo de 1971 ubicados en el extremo Noreste, no fueron muestreados en 1998.

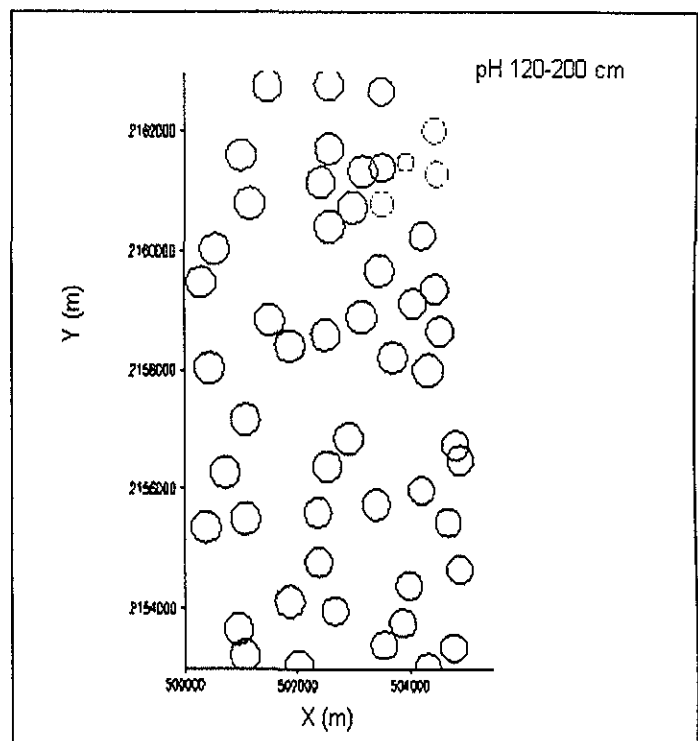
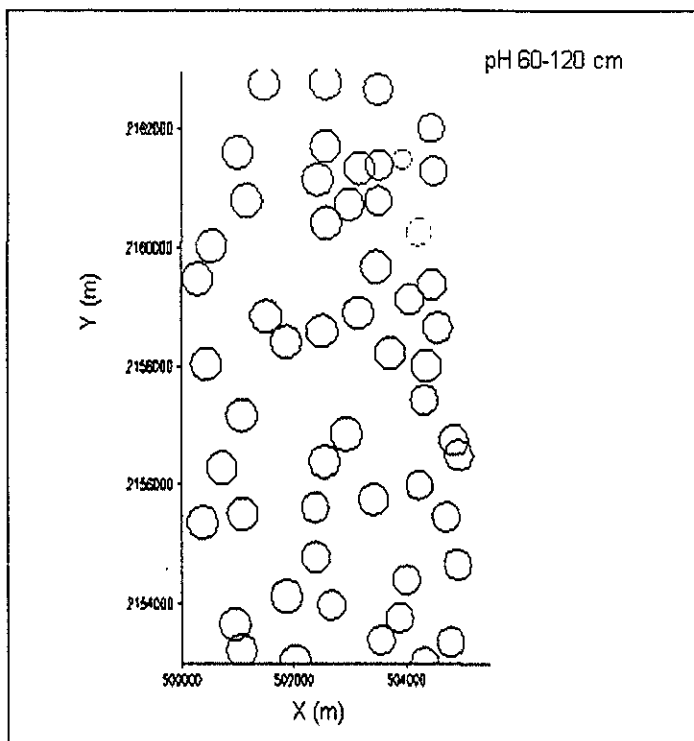
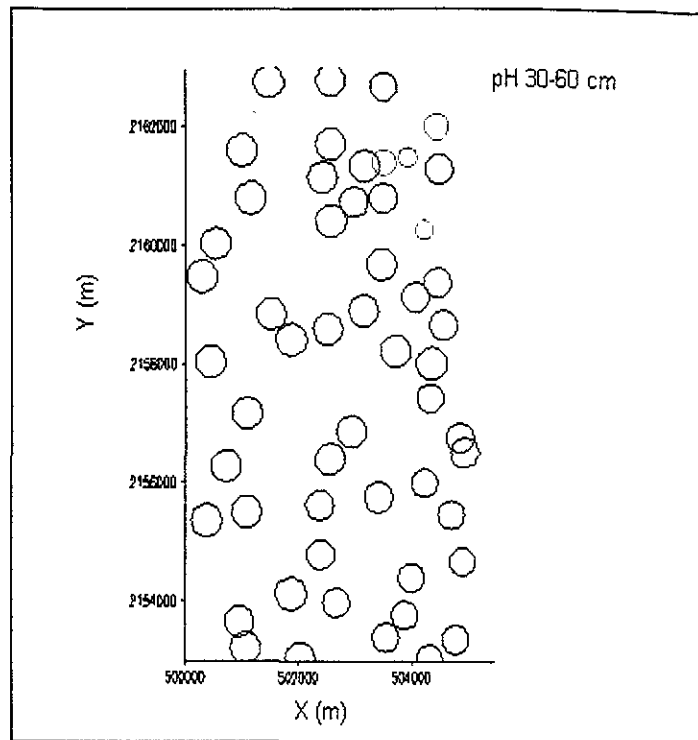
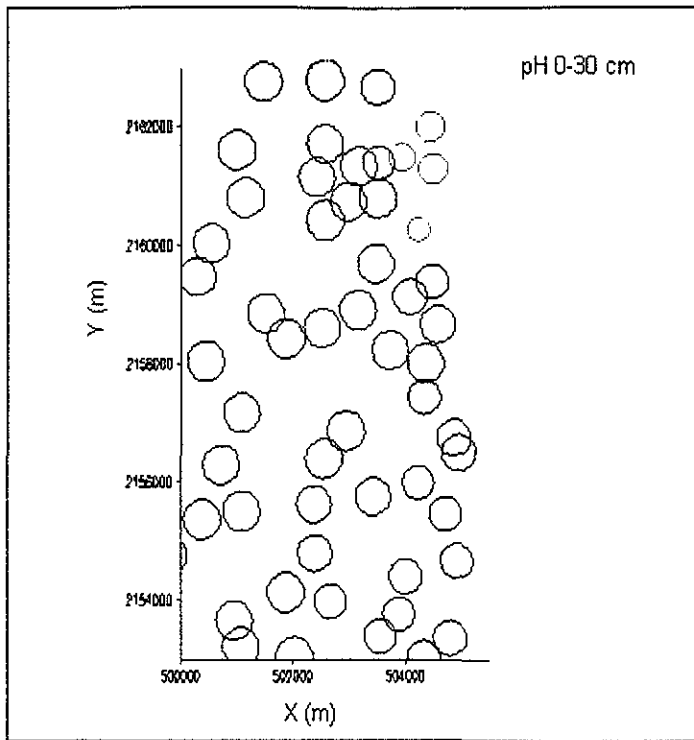


Fig. 6.1.2a: Distribución espacial de los valores de pH en la Zona de Estudio (año 1971). Los valores en rojo indican un pH menor a 8.5.

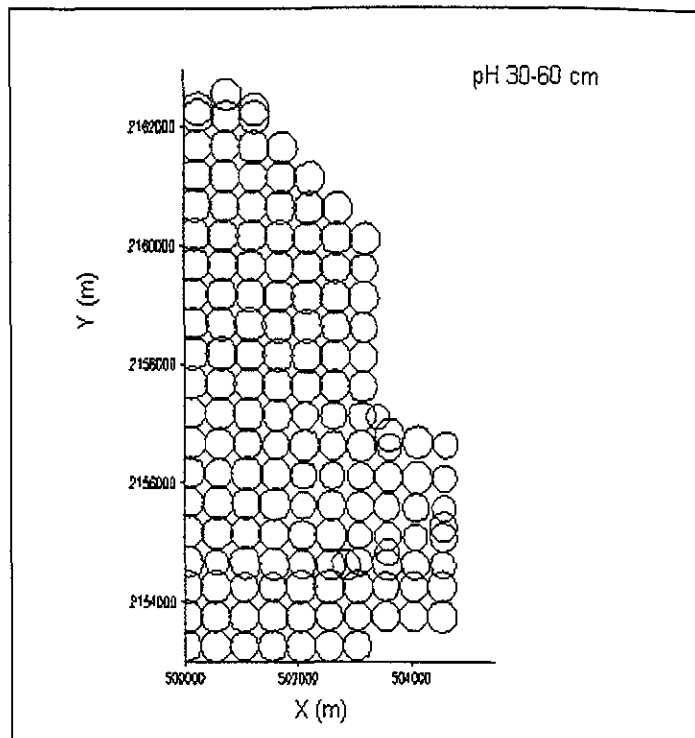
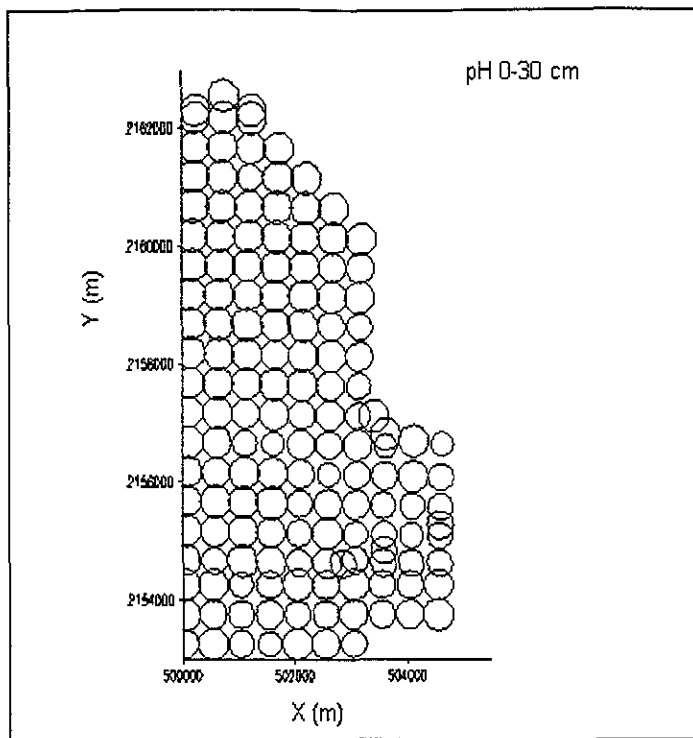


Fig. 6.1.2b: Distribución espacial de los valores de pH en la Zona de Estudio (año 1998).

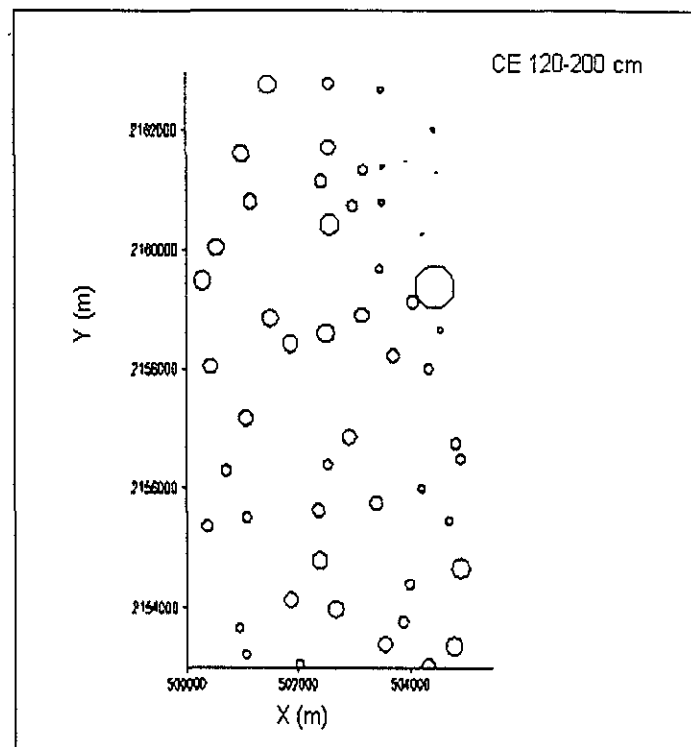
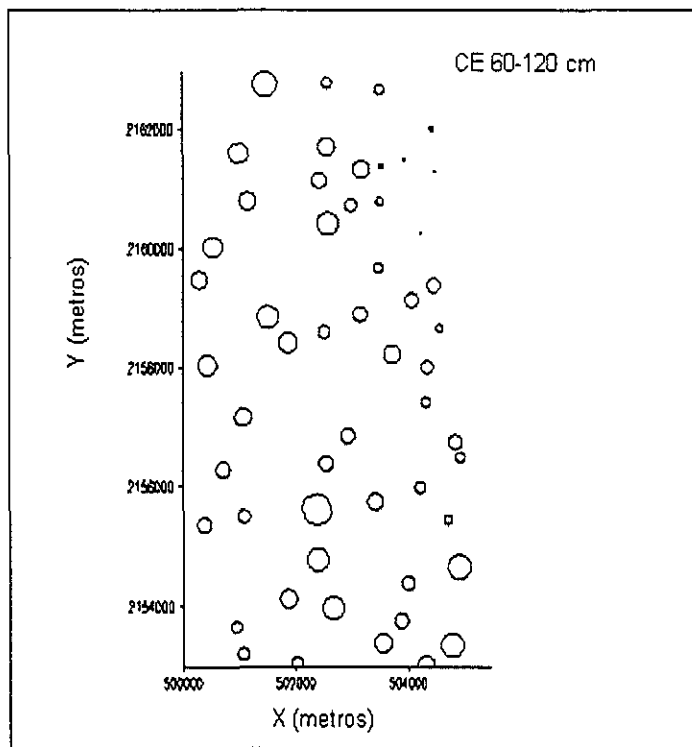
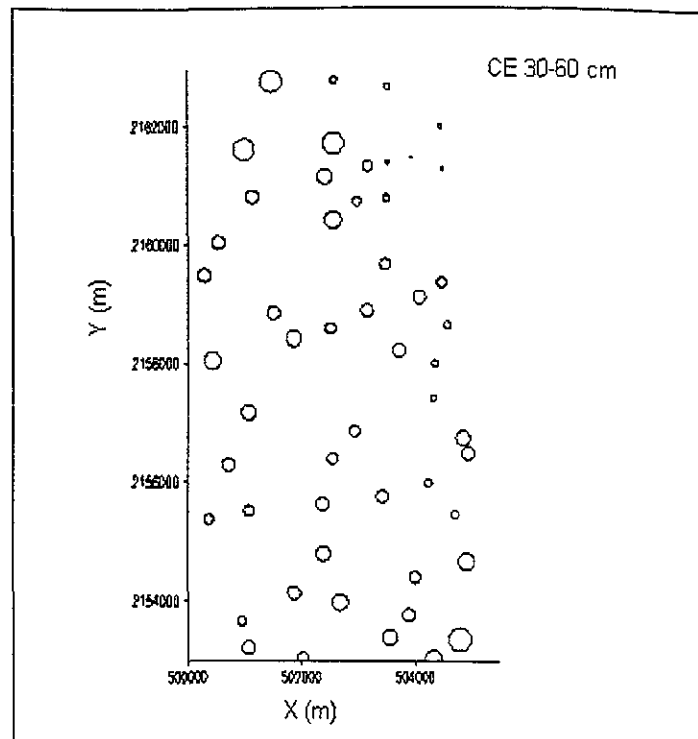
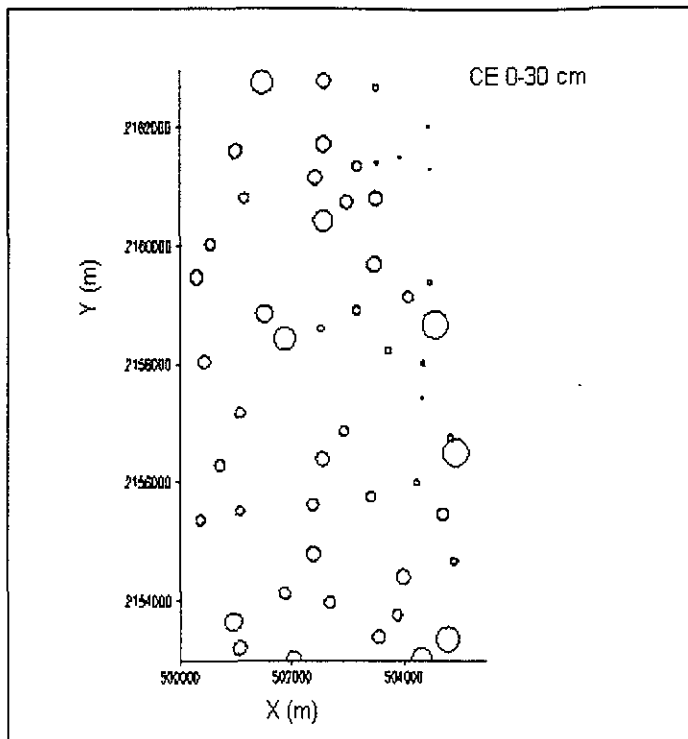


Fig. 6.1.2c: Distribución espacial de los valores de CE en la Zona de Estudio (año 1971).

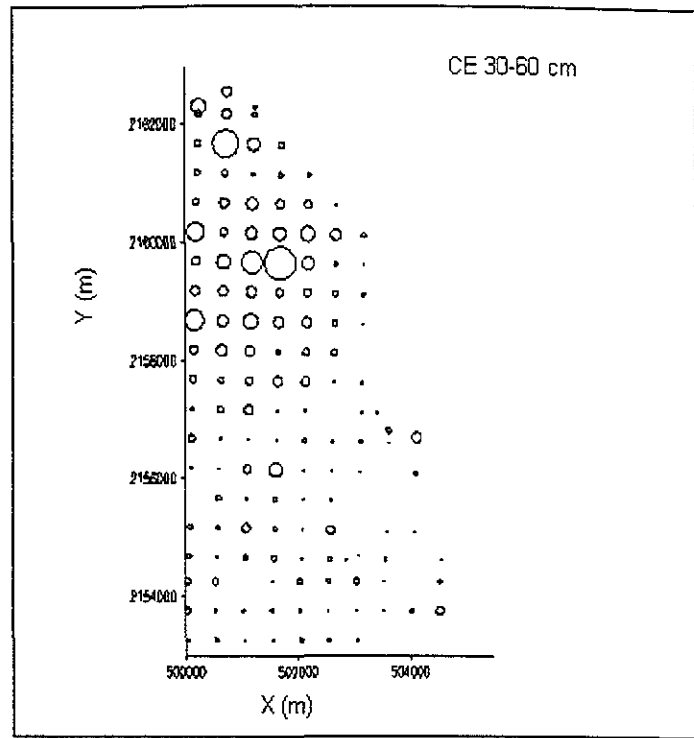
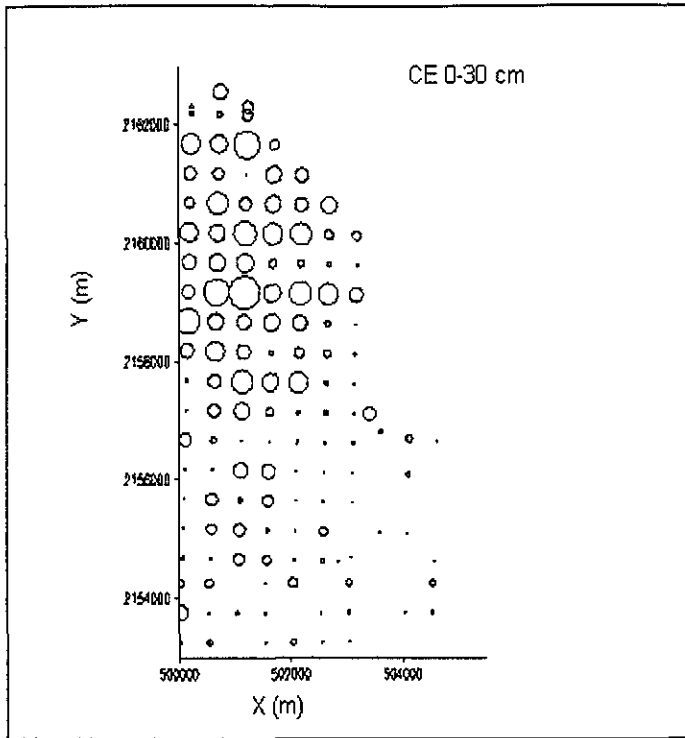


Fig. 6.1.2d: Distribución espacial de los valores de CE en la Zona de Estudio (año 1998).

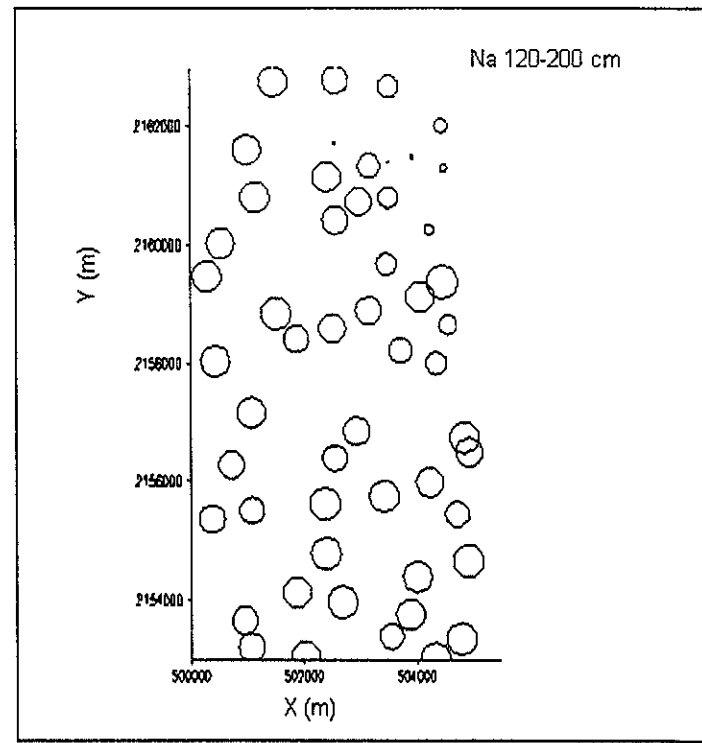
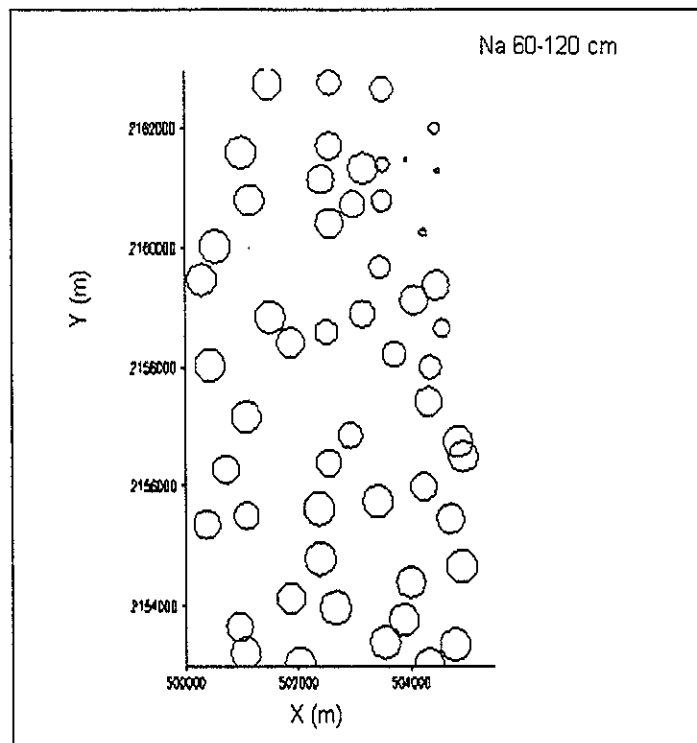
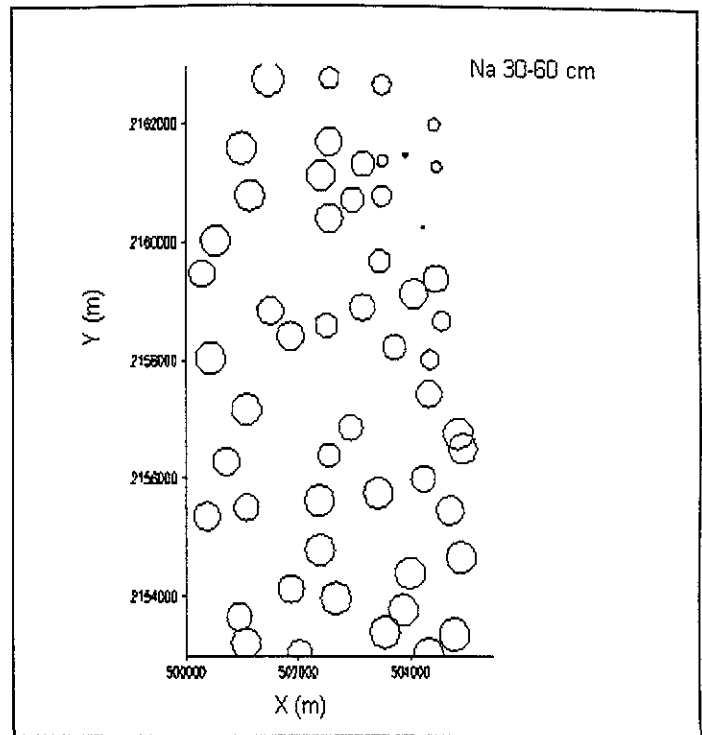
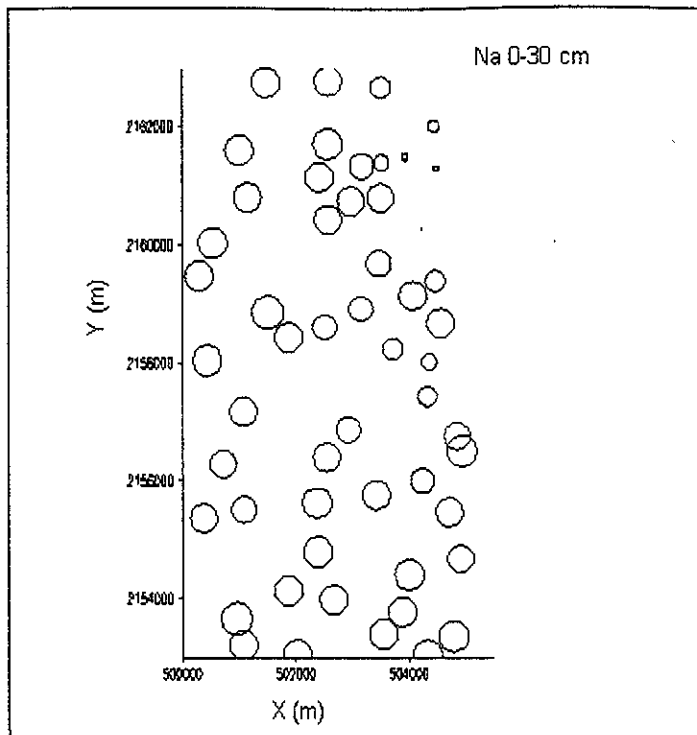


Fig. 6.1.2e: Distribución espacial de los valores de Na en la Zona de Estudio (año 1971).

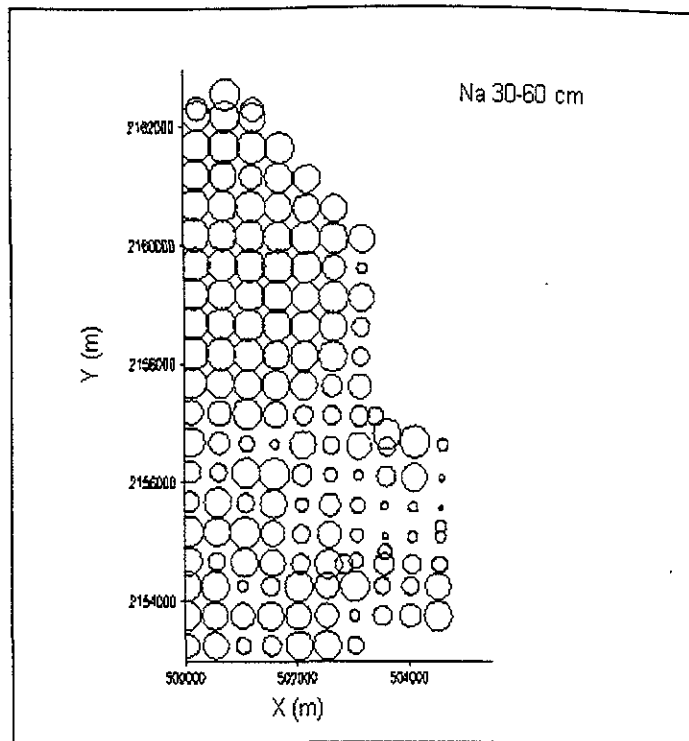
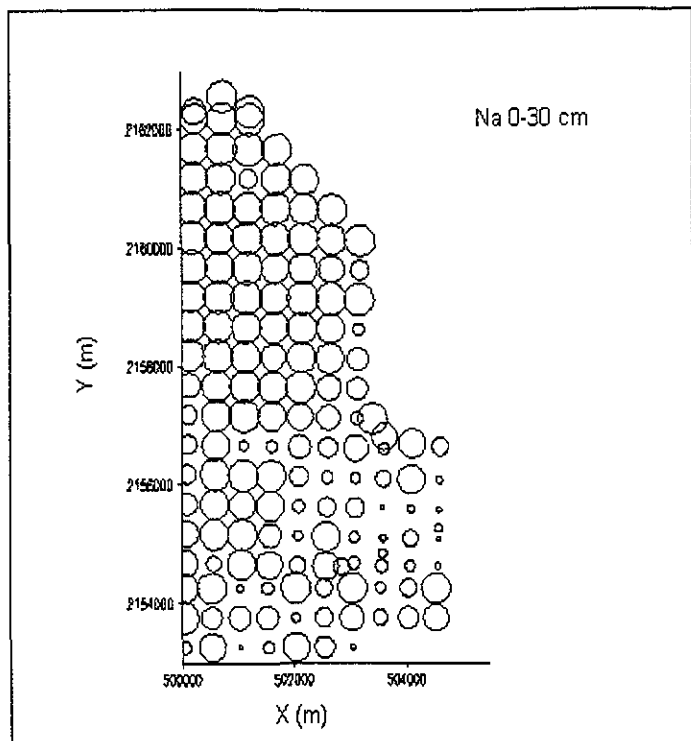


Fig. 6.1.2f: Distribución espacial de los valores de Na en la Zona de Estudio (año 1998).

6.2 Estadística descriptiva de la Zona de Estudio.

En la Tabla 6.2.1, se muestran los estadísticos descriptivos para los datos de 1971 y 1998 localizados dentro de la Zona de Estudio. Como se mencionó en los materiales y métodos, el número de observaciones comprendidas dentro de la Zona de Estudio es de 57 para el año de 1971, y de 161 para el año de 1998. En el caso del pH 1971, la primera profundidad (0-30 cm) presenta el valor promedio y la mediana más altos (9.53 y 9.90 respectivamente), y para el año de 1998 el valor promedio más alto se encuentra en la segunda profundidad (9.60). El valor promedio de 1971 para la profundidad de 0-30 cm (9.53), es ligeramente mayor que el promedio de 1998 para la misma profundidad (9.47), mientras que en la profundidad de 30-60 cm se presenta la situación opuesta (9.48 en 1971, y 9.60 en 1998). Se aprecia un sesgo negativo de los datos para todas las profundidades en ambos años, el cual se observa en los diagramas de caja (Fig. 6.2.1a), los histogramas (Fig. 6.2.2a y Fig. 6.2.2b, ver apéndice I), y en el coeficiente de sesgo; además, en los diagramas de caja de los datos de 1998, se presentan un menor número de puntos extremos. En los histogramas de 1971 y 1998, se observa que el valor más frecuente en todas las profundidades es el de la clase de pH de 10. En el año de 1971, los valores de la varianza (0.70 en los primeros 30 cm, y 0.72 hasta 60 cm), son más altos que para 1998 (0.60 y 0.45, en las profundidades de 0-30 cm y 30-60 cm respectivamente).

La conductividad eléctrica presenta el valor más alto, tanto para la media como para la mediana, en la primera profundidad de ambos años (50.18 en 1971 y 93.65 en 1998). En este caso, los valores de CE de 1971 (50.18 de 0-30 cm y 32.81 de 30-60 cm) son más bajos respecto a los valores de 1998 (93.65 y 72.05 en la profundidades de 0-30 cm y 30-60 cm respectivamente). En los histogramas de ambos años, se observa que el valor más frecuente en las cuatro profundidades de 1971 es el de 50 dSm^{-1} , y en 1998 de 10 dSm^{-1} (0-30 cm) y de 30 dSm^{-1} (30-60 cm) (Fig. 6.2.2c y Fig. 6.2.2d, ver apéndice I). A excepción de la segunda y tercera profundidad de 1971 (30-60 cm y 60-120 cm), que tienen un ligero sesgo negativo, las demás profundidades para los dos años presentan un

sesgo positivo; éste sesgo, se observa mediante su coeficiente, en los diagramas de caja (Fig. 6.2.1a) e histogramas. Al igual que para el total de los datos muestreados, es importante mencionar que las profundidades correspondientes al año de 1998, presentan una mayor dispersión (la varianza de la CE en 1998 es de 8688 y 5205 para la profundidad de 0-30 cm y de 30-60 cm respectivamente, mientras que en 1971 es de 752.90 en los primeros 30 cm, y de 195.10 hasta una profundidad de 60 cm).

Para el porcentaje de sodio intercambiable, en la primera profundidad del año 1971, el valor promedio (79.58) y la mediana (87.00) son más altos que en las demás profundidades, mientras que para el año de 1998, el valor más alto en la primera profundidad sólo se ve reflejado en la mediana (82.1). El valor promedio de PSI en la profundidad de 0-30 cm (79.58) es mayor que en 1998 para la misma profundidad (69.65), situación que se repite en la profundidad de 30-60 cm (74.35 para 1971, y 71.73 para 1998). Al observar los histogramas (Fig. 6.2.2e y 6.2.2f), los diagramas de caja (Fig. 6.2.1a), y los coeficientes de sesgo correspondientes, se aprecia un sesgo negativo en todos los casos. De la misma forma, el valor más frecuente de PSI para todas las profundidades de 1971 es el de 90, mientras que en 1998 es de 95. Al igual que para la CE, los datos en las dos primeras profundidades presentan una mayor dispersión en 1998 (las varianzas son de 687.69, y de 451.30 en las profundidades de 0-30 cm y de 30-60 cm respectivamente), que en 1971 (la varianza es de 413.10 en los primeros 30 cm, y de 378.30 hasta 60 cm de profundidad).

La Tabla 6.2.2 (ver apéndice I), muestra los resultados de una prueba de "t" para determinar si existen diferencias significativas entre las profundidades de cada variable, tomando los datos de 1971 y 1998 localizados dentro de la Zona de Estudio por separado. En el caso del pH y del PSI, en ambos años se observa que no existen diferencias significativas entre el promedio de las distintas profundidades. En cuanto a la CE, la única comparación entre las diferentes profundidades que no presenta una diferencia significativa en los promedios respectivos, es la de 30-60 cm vs 60-120 cm del año de 1971. En los demás

casos, en ambos años, todas las comparaciones indican que las diferencias entre medias sí son significativas.

Al comparar los datos del año de 1971 localizados dentro de la Zona de Estudio, con el total de los datos del muestreo realizado en ese mismo año, el promedio de las tres variables, en todas las profundidades, es mayor para los datos de la Zona de Estudio (Tablas 6.1.1 y 6.2.1); de la misma forma, al comparar los diagramas de caja (Figuras 6.1.1a y 6.2.1a), se observa que los datos de las tres variables dentro de la Zona de Estudio presentan un menor número de puntos extremos, además que de las varianzas en todas las profundidades de las tres variables son menores que las del total de datos muestreados en 1971. Como se mencionó anteriormente, en el caso del pH y el PSI, esta situación podría relacionarse con el hecho de que dentro de la Zona de Estudio no se incluyeron puntos de muestreo de zonas con vegetación halófila o con actividad agrícola. Por otra parte, en los datos de la Zona de Estudio de 1998, se presenta un aumento en la varianza en todas las profundidades de las tres variables, respecto al total de los datos muestreados para ese mismo año, y en todos los casos, el promedio de los datos es menor para la Zona de Estudio (Tablas 6.1.1 y 6.2.1). Finalmente, la profundidad de 30-60 cm de pH y de PSI, presentan una disminución considerable en los puntos extremos (Fig. 6.1.1a y Fig. 6.2.1a).

Tabla 6.2.1
Estadísticos descriptivos para los datos de 1971 y 1998 localizados dentro de la Zona de Estudio.

pH	media	mediana	varianza	d. estandar (a)	c. sesgo (b)	mínimo	máximo
profundidad	media	mediana	varianza	d. estandar (a)	c. sesgo (b)	mínimo	máximo
1971							
0-30cm	9.53	9.90	0.70	0.84	-1.61	6.20	10.50
30-60cm	9.48	9.60	0.72	0.85	-2.21	6.00	10.50
60-120cm	9.49	9.70	0.50	0.71	-2.12	6.00	10.20
120-200cm	9.45	9.75	0.62	0.79	-1.95	5.80	10.60
1998							
0-30cm	9.47	9.80	0.60	0.79	-0.72	7.50	10.50
30-60cm	9.60	9.80	0.45	0.67	-1.04	7.40	10.40
CE (dSm)							
profundidad	media	mediana	varianza	d. estandar	c. sesgo	mínimo	máximo
1971							
0-30cm	50.18	48.00	752.90	27.44	0.53	0.60	121.00
30-60cm	32.81	35.00	195.10	13.97	-0.10	0.60	65.00
60-120cm	35.42	36.00	238.40	15.44	-0.08	3.00	73.00
120-200cm	39.77	39.50	447.90	21.16	1.58	3.00	140.00
1998							
0-30cm	93.65	52.00	8688.00	93.21	0.93	2.00	410.00
30-60cm	72.05	48.00	5205.00	72.15	2.03	2.00	457.00
Na (PSI)							
profundidad	media	mediana	varianza	d. estandar	c. sesgo	mínimo	máximo
1971							
0-30cm	79.58	87.00	413.10	20.33	-2.16	2.00	100.00
30-60cm	74.35	78.60	378.30	19.45	-1.81	4.20	94.00
60-120cm	76.03	82.00	389.30	19.73	-1.90	10.00	94.00
120-200cm	74.94	80.50	498.60	22.33	-1.90	4.20	96.00
1998							
0-30cm	69.65	82.10	687.60	26.22	-0.73	10.20	96.70
30-60cm	71.73	80.00	451.30	21.24	-0.82	9.40	97.80
(a) desviación estandar							
(b) coeficiente de sesgo							

Nota: el número de observaciones de cada variable en cada una de las distintas profundidades es de 57 para el año de 1971, y de 161 para el año de 1998.

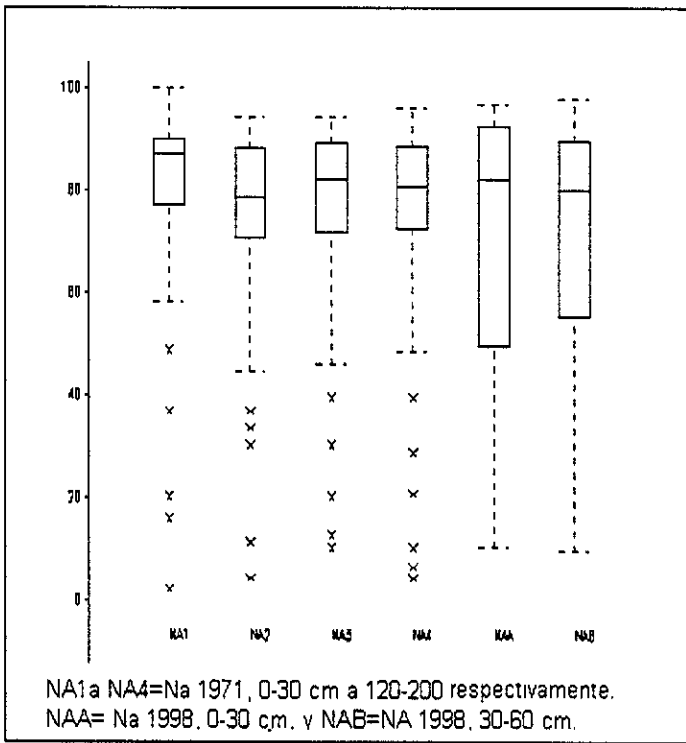
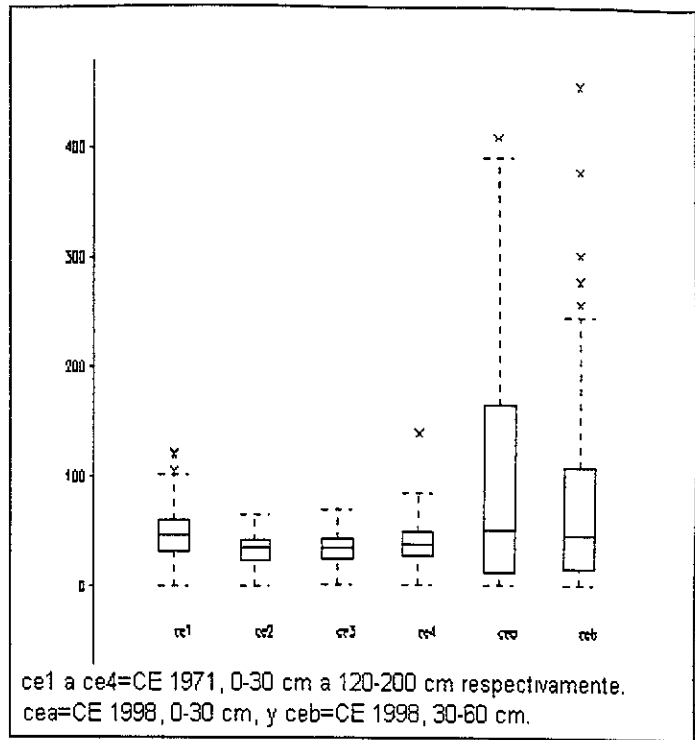
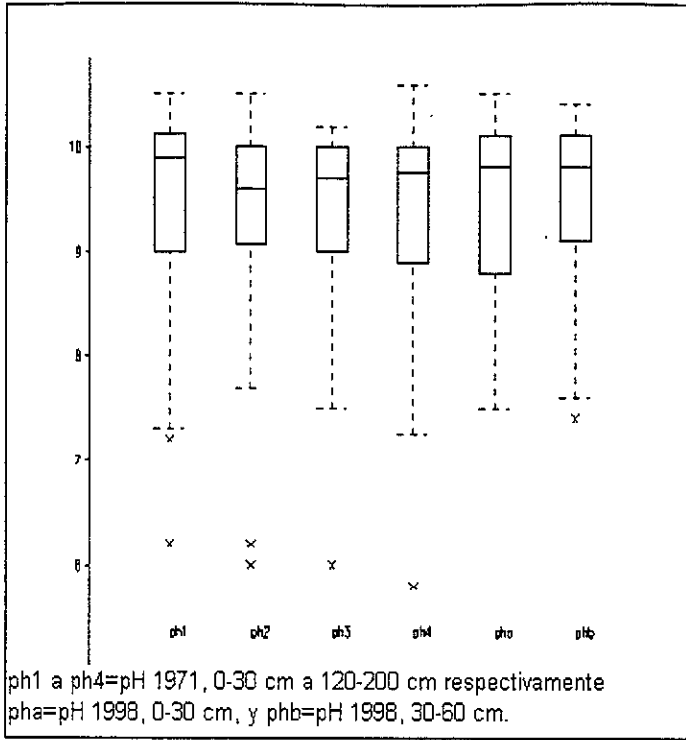


Fig. 6.2.1a: Diagramas de caja para los datos de 1971 y 1998 localizados dentro de la Zona de Estudio.

6.3 Análisis geoestadístico: semivariogramas y ajuste de modelos.

En las figuras 6.3.1a a 6.3.1f, se observan los semivariogramas de pH, CE y PSI en diferentes direcciones, para los datos de 1971 y 1998, localizados dentro de la Zona de Estudio. El número de observaciones recomendado para detectar isotropía o anisotropía es de por lo menos de 200 observaciones (Webster 1991^b); a pesar de que el número de datos no era el recomendado para este análisis, en la mayoría de los casos fue posible detectar una tendencia a la isotropía.

El ajuste de los diferentes modelos a los semivariogramas en una sola dirección es tal vez, la parte más difícil dentro del análisis geoestadístico (Vargas-Hernández 1991). Como se mencionó anteriormente, estos semivariogramas pueden tener diferentes formas, las cuales describen distintos tipos de variación espacial (Burrough 1987).

En las figuras 6.3.2a a 6.3.2f, se presentan los semivariogramas de todas las profundidades, para los datos de 1971 y 1998, de las tres variables analizadas dentro de la Zona de Estudio. En el caso del pH en 1971, al graficar los semivariogramas en una sola dirección, no fue posible ajustar un modelo al total de los datos localizados dentro de la Zona de Estudio, debido a que la forma que estos semivariogramas tenían, no presentaba una variación estructurada, es decir, el 100% de la varianza era debido al nugget; por esta razón, se excluyeron aquellos valores de pH por debajo de 8.5 (Fig. 6.1.2a), los cuales contribuían con más de la mitad de la varianza total (las varianzas de las distintas profundidades al excluir estos datos son: 0-30 cm: 0.31, 30-60 cm: 0.24, 60-120 cm: 0.26, y 120-200 cm: 0.27). Al graficar nuevamente los semivariogramas de pH para el año de 1971, se observa que para la profundidad de 0-30 cm, la variabilidad se incrementa conforme aumenta la distancia entre puntos; sin embargo, a partir de los 5000 m, se denota un cambio abrupto en la semivarianza, la cual disminuye para posteriormente volver a incrementarse, y aparentemente, mantenerse constante después de 7000 m de distancia. El pH en la profundidad de 30-60 cm tiene un comportamiento similar, aunque después de que la varianza disminuye a

los 5000 m, ésta se incrementa sin mostrar un límite definido. Para las dos últimas profundidades (60-120 cm y 120-200 cm) la semivarianza parece dejar de incrementarse dentro de un intervalo de distancia aproximadamente de 1000m y 3000 m respectivamente; después de estos intervalos, la semivarianza para la profundidad de 60-120 cm, nuevamente se incrementa sin mostrar un límite definido, y en la profundidad de 120-200 cm, la semivarianza se “dispara “ a los 8000 m de distancia entre puntos (Fig. 6.3.2a). En los semivariogramas de pH del año de 1998, en la profundidad de 0-30 cm, la semivarianza incrementa su pendiente conforme la distancia entre puntos aumenta, sin mostrar un límite aparente en ésta; para la profundidad de 30-60 cm, con excepción de la distancia más corta entre puntos graficada, la variabilidad también se incrementa en forma lineal hasta los 5000 m, después de los cuales la semivarianza disminuye y parece alcanzar un límite (Fig. 6.3.2b).

En cuanto a los semivariogramas de la CE, en el año de 1971, las profundidades de 0-30 cm, 30-60 cm y 120-200 cm, no mostraron ninguna estructura en la variabilidad espacial, siendo la varianza nugget la que predomina. A diferencia del pH, no se presentaron datos que contribuyeran de forma importante con la varianza total, por lo que en este caso se consideraron el total de las observaciones. La profundidad de 60-120 cm, muestra un patrón con una clara tendencia a incrementar la semivarianza conforme la distancia entre puntos aumenta, aunque un límite en ésta no es muy aparente (Fig. 6.3.2c). Los semivariogramas para esta misma variable del año de 1998, muestran un comportamiento que podría describirse como “cíclico” o en forma de “campana”, ya que la varianza se incrementa rápidamente hasta una distancia entre puntos de 6000 m para ambas profundidades (0-30 cm y 30-60 cm), y después comienza a descender (Fig. 6.3.2d).

Los semivariogramas de PSI del año de 1971, muestran para las profundidades de 0-30 cm y 120-200 cm, una no estructuración de los datos hasta una distancia aproximada de 6000 m entre puntos de muestreo, después de la cual la semivarianza se incrementa de forma súbita, aunque sigue sin mostrar un

patrón definido; las únicas profundidades en donde se puede observar cierto incremento de la variabilidad espacial bajo una estructuración aparente, son la de 30-60 cm y la de 60-120 cm, aunque al igual que en los casos anteriores, la semivarianza se incrementa de forma repentina después de los 6000 m de distancia entre puntos de muestreo (Fig. 6.3.2e); de la misma forma que para la CE, no se presentaron datos que contribuyeran de forma importante con la varianza total, por lo se consideraron el total de las observaciones. En cuanto a los semivariogramas de PSI del año de 1998, la semivarianza para la profundidad de 0-30 cm, incrementa su pendiente conforme la distancia entre puntos aumenta, sin mostrar un límite aparente en ésta, mientras que para la profundidad de 30-60 cm, la variabilidad también se incrementa en forma lineal hasta los 5000 m, después de los cuales la semivarianza disminuye y parece alcanzar un límite (Fig. 6.3.2f).

La forma que los semivariogramas presenten es muy importante en cuanto al ajuste de modelos a los mismos; sin embargo, también es importante recordar que la elección en el número de intervalos que se utilizan en el semivariograma, y la distancia máxima entre puntos a la cual éste se grafica, son arbitrarias, por lo que las propiedades de los mismos dependen también de estos dos parámetros (Vargas-Hernández 1991). Como se puede observar, para las tres variables dentro de la Zona de Estudio, y en todas las profundidades del año de 1971 y 1998, los intervalos utilizados son de 500 m, y la distancia máxima entre puntos a la cual se graficó es de 8000 m. De esta forma se buscó que los semivariogramas presentaran la mayor estructura posible, y que se pudiera observar el comportamiento general de la semivarianza. Posteriormente, se probaron distintos modelos, y se seleccionaron aquellos que cumplieran con los criterios antes establecidos en los materiales y métodos: ya que las tres variables en cada profundidad están bajo la influencia de los mismos procesos, se les ajustó el mismo modelo (los datos de 1971 y 1998 se consideran por separado); el porcentaje de variabilidad explicado por el modelo seleccionado, debía ser de lo más cercano a un 100% en las tres variables de una misma profundidad; el error

promedio de los datos estimados y observados, y la razón de la diferencia de las observaciones y las estimaciones, dividida entre la varianza de éstas últimas, debían aproximarse lo más posible a los valores de 0 y 1 respectivamente. La Tabla 6.3.1 (ver apéndice II) muestra para todos los modelos que se probaron, los valores de los tres parámetros utilizados como criterios de selección. La distancia final a la cual se hacía cada ajuste, también dependió de éstos criterios.

En la Tabla 6.3.2 se observan los parámetros de los tres criterios utilizados para la selección de modelos, además de los parámetros mismos de los semivariogramas, es decir, nugget, umbral y rango en modelos con umbral, o nugget y gradiente para los modelos sin umbral. Para la profundidad de 0-30 cm del año de 1971, a la única variable a la cual se le pudo ajustar un modelo fue a la del pH; el modelo seleccionado fue el modelo lineal. En la siguiente profundidad, 30-60 cm, se ajustó un modelo lineal al pH y al PSI; es importante notar que para esta última variable, la razón de la diferencia de las observaciones y las estimaciones, dividida entre la varianza de las estimaciones, es relativamente baja (0.61). En las dos últimas profundidades del año de 1971, 60-120 cm y 120-200 cm, se les ajustó un modelo circular; en el primer caso (60-120 cm), las variables a las cuales se les ajustó este modelo fueron el pH y la CE, aunque para esta última variable, el porcentaje de varianza nugget con respecto a la semivarianza total es de un 45%; a pesar de que para la CE el porcentaje de variabilidad del modelo circular fue el mayor respecto a los otros modelos, éste fue el más bajo entre todos los modelos ajustados para las tres variables y en todas las profundidades analizadas (76%). En cuanto a los datos del año de 1998, a ambas profundidades (0-30 cm y 30-60 cm) se les ajustó un modelo lineal para las tres variables.

Es importante hacer la observación, de que a pesar de la forma de "campana" que la CE presenta en ambas profundidades del año de 1998, el modelo lineal en la profundidad de 0-30 cm, fue el que explicó un mayor porcentaje de variabilidad (93.70), a la distancia ajustada (4000 m), además de que en las otras dos variables (pH y PSI), no se presentó una diferencia

considerable respecto del modelo óptimo para cada una éstas y el modelo lineal. En el caso del pH, el modelo que explica el mayor porcentaje de variabilidad es el de la correlación elemental de Whittle con 96.40%, mientras que el lineal tiene un porcentaje de 94.80; para el PSI, el modelo circular es el que explica el mayor porcentaje de variabilidad con un 95.70%, y éste mismo porcentaje con el modelo lineal es de un 95.40%. En la profundidad de 30-60 cm, el modelo lineal fue el óptimo para las tres variables analizadas, pH, CE y PSI, con un porcentaje de variabilidad explicado por el mismo de 96.90, 81.60 y 96.29 respectivamente. (Tabla 6.3.1).

Finalmente, a excepción de la profundidad de 30-60 cm del año de 1998 para la variable de PSI, en todos los demás casos analizados, la varianza atribuída al nugget respecto a la semivarianza total, es mayor en el año de 1998 que en el de 1971 (Tabla 6.3.2).

Tabla 6.3.2

Parámetros de los modelos seleccionados para el ajuste a los semivariogramas de los datos de 1971 y 1998, localizados dentro de la Zona de Estudio.

pH	profundidad	modelo	% varianza (a)	nugget	umbral	rango (m)	gradiente	error media	razón
1971	0-30cm	lineal	86.00	0.1041	n.a. (b)	n.a.	0.000057	0.010690	0.89
	30-60cm	lineal	90.60		n.a.	n.a.	0.000055	0.004720	0.95
	60-120cm	circular	89.10	0.0452	0.2560	4153.00	n.a.	-0.000339	0.82
	120-200cm	circular	83.50	0.0566	0.2606	4753.00	n.a.	-0.001225	0.82
1998	0-30cm	lineal	94.80	0.2764	n.a.	n.a.	0.000097	0.003322	1.15
	30-60cm	lineal	96.90	0.2163	n.a.	n.a.	0.000077	-0.001817	1.13
CE	profundidad	modelo	% varianza	nugget	umbral	rango (m)	gradiente	error media	razón
	0-30cm	*	*	*	*	*	*	*	*
	30-60cm	*	*	*	*	*	*	*	*
	60-120cm	circular	76.30	107.60	130.90	2989.00	n.a.	0.225900	0.90
120-200cm	*	*	*	*	*	*	*	*	
1998	0-30cm	lineal	93.70	2302.00	n.a.	n.a.	1.60	-0.4025	1.19
	30-60cm	lineal	81.60	1911.00	n.a.	n.a.	2.06	-0.807600	1.14
Na	profundidad	modelo	% varianza	nugget	umbral	rango (m)	gradiente	error media	razón
	0-30cm	*	*	*	*	*	*	*	*
	30-60cm	lineal	87.20	214.00	n.a.	n.a.	0.036090	0.692100	0.61
	60-120cm	*	*	*	*	*	*	*	*
120-200cm	*	*	*	*	*	*	*	*	
1998	0-30cm	lineal	95.40	230.00	n.a.	n.a.	0.131180	-0.018560	0.86
	30-60cm	lineal	96.20	180.60	n.a.	n.a.	0.085040	-0.000972	0.95
* no se ajustó ningún modelo									
(a) porcentaje de variabilidad explicada por el modelo									
(b) no aplica									

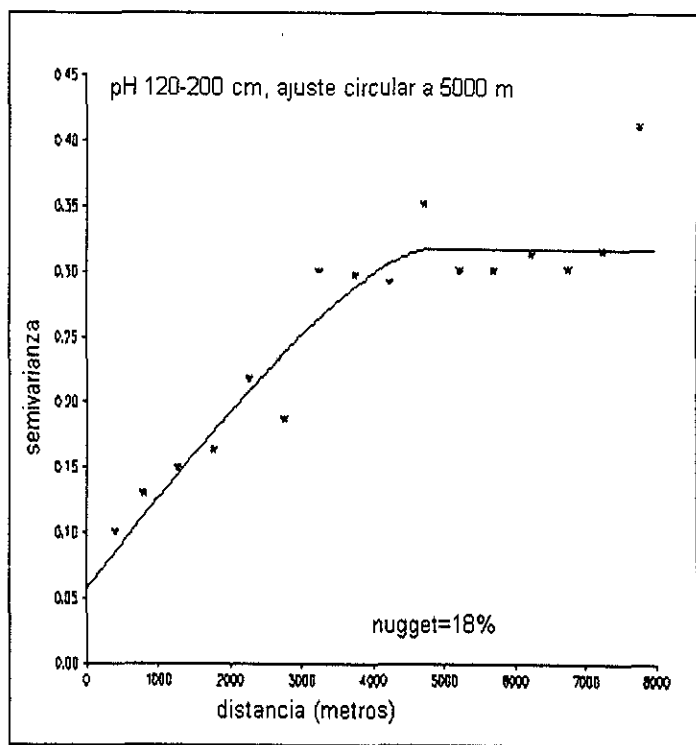
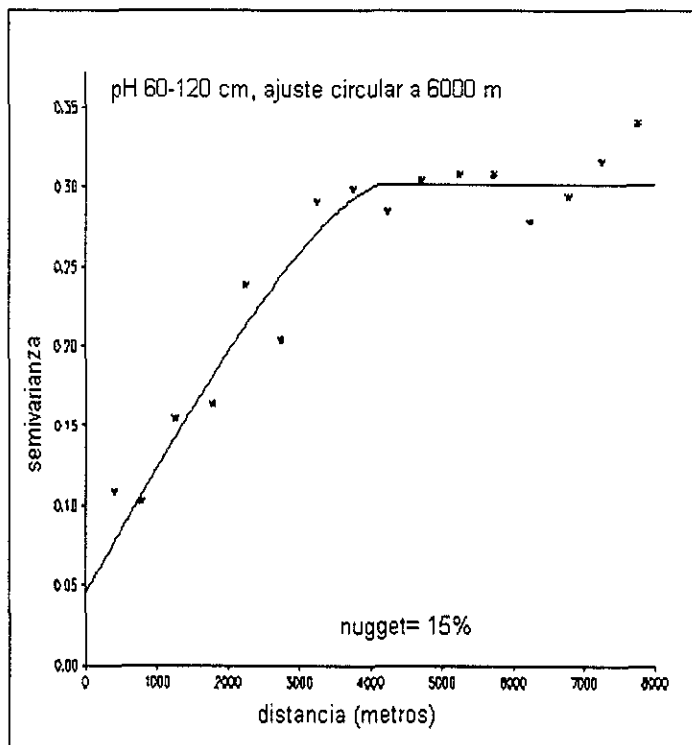
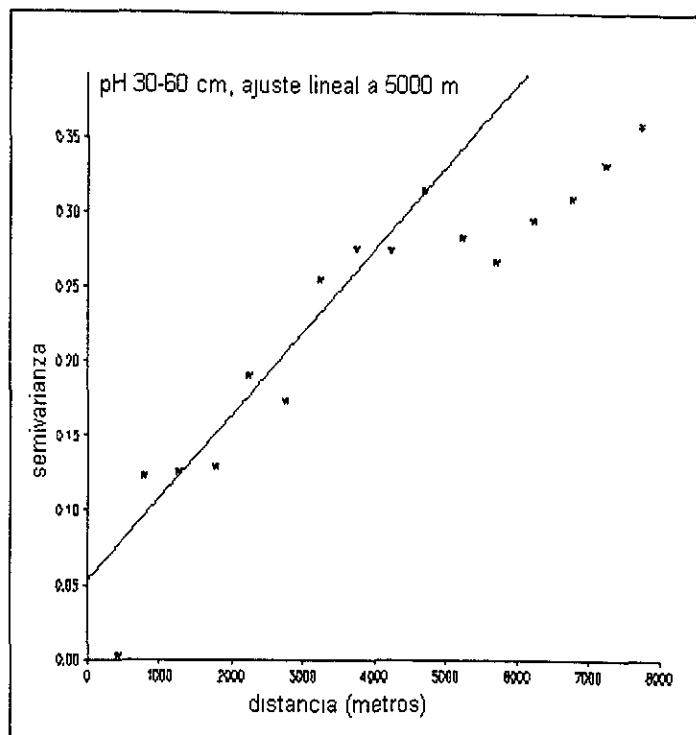
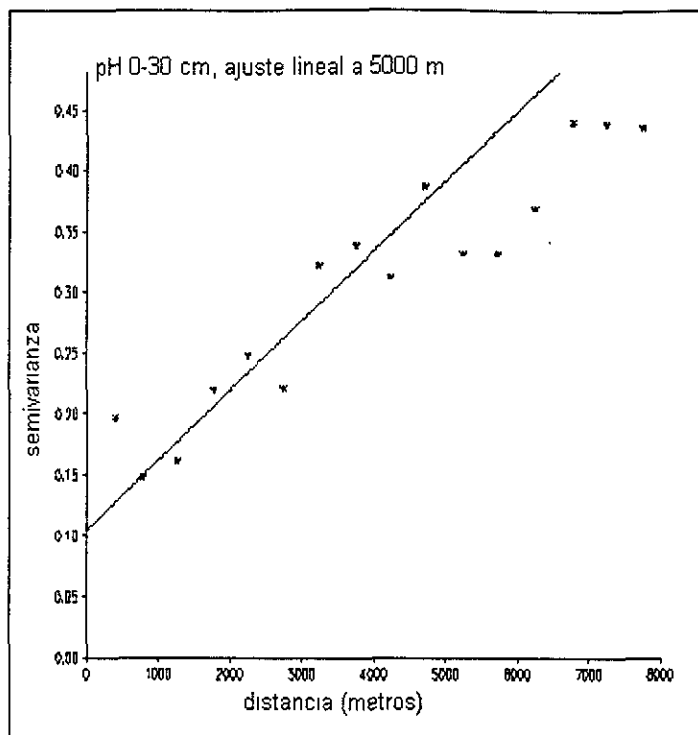


Fig. 6.3.2a: Ajuste de modelos a los semivariogramas de pH en las distintas profundidades del suelo para los datos localizados dentro de la Zona de Estudio (año 1971).

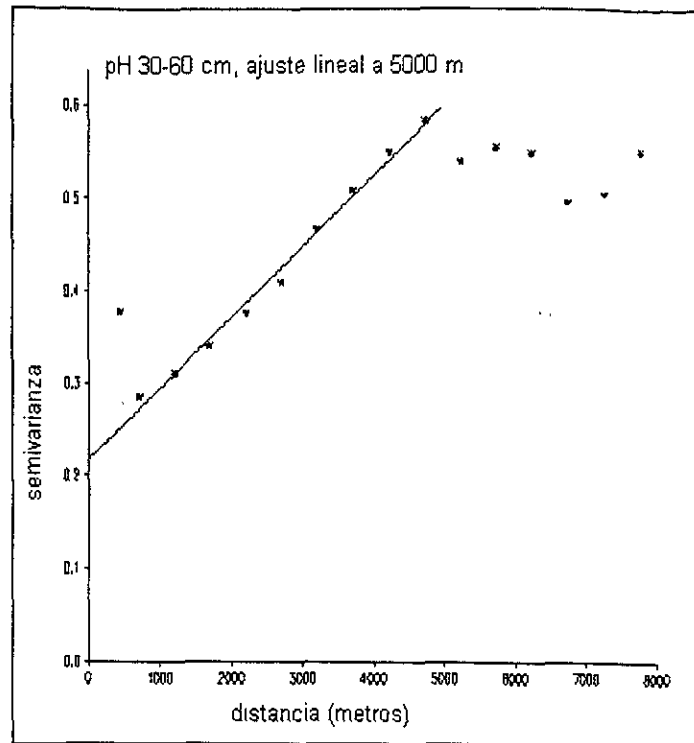
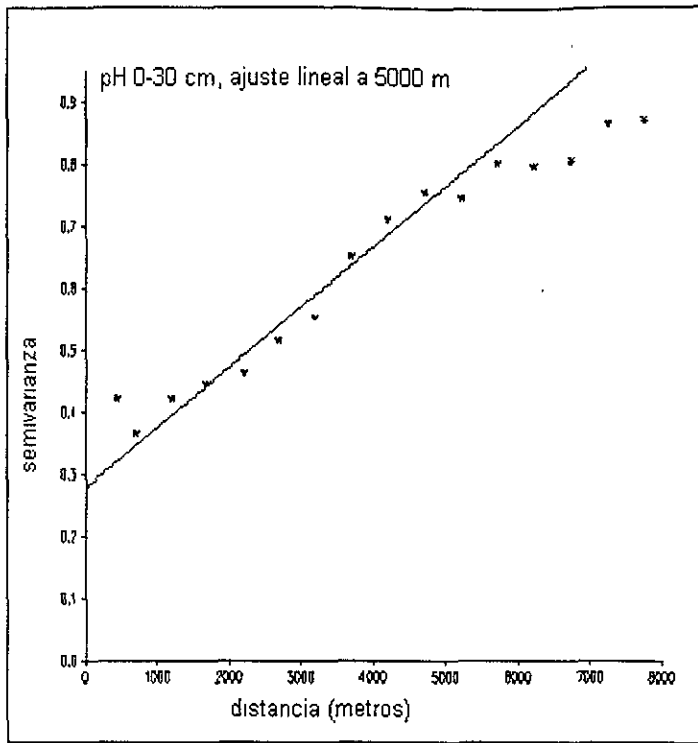


Fig. 6.3.2b: Ajuste de modelos a los semivariogramas de pH en las distintas profundidades del suelo para los datos localizados dentro de la Zona de Estudio (año 1998).

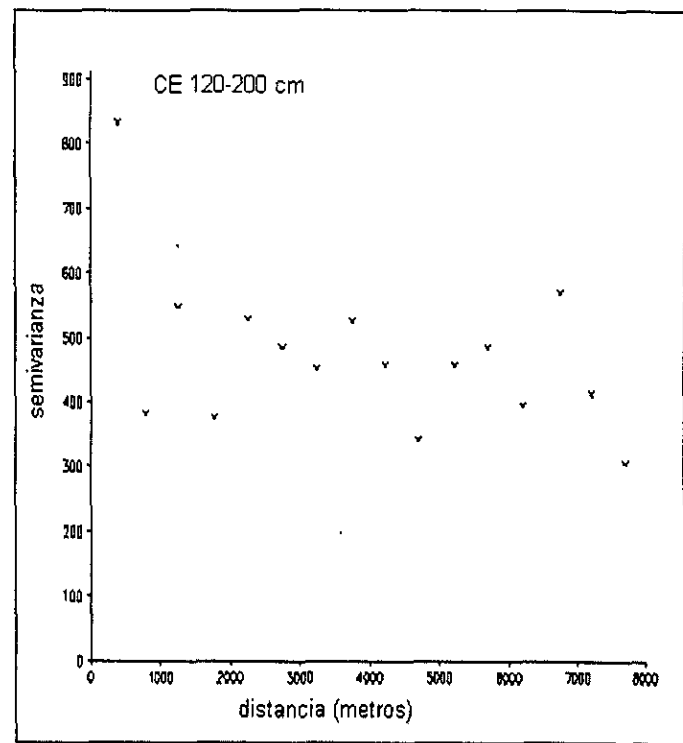
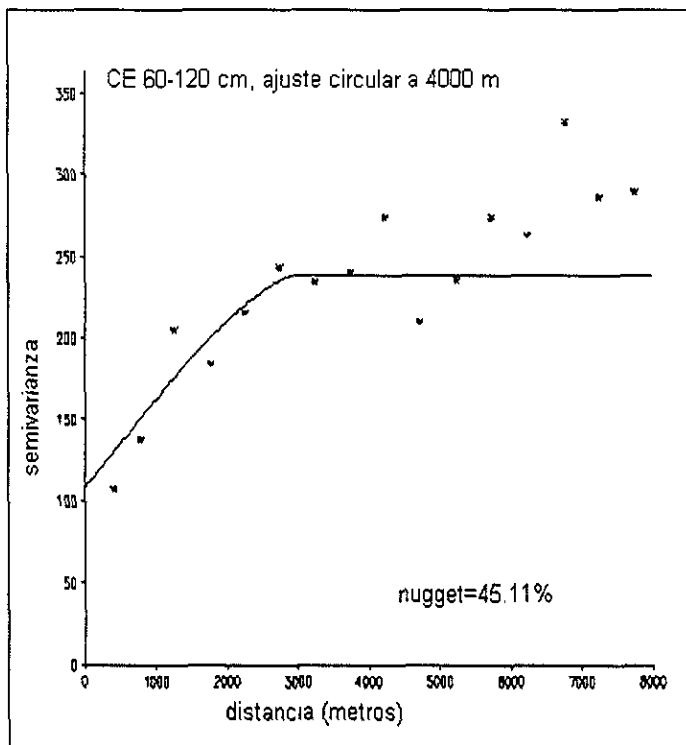
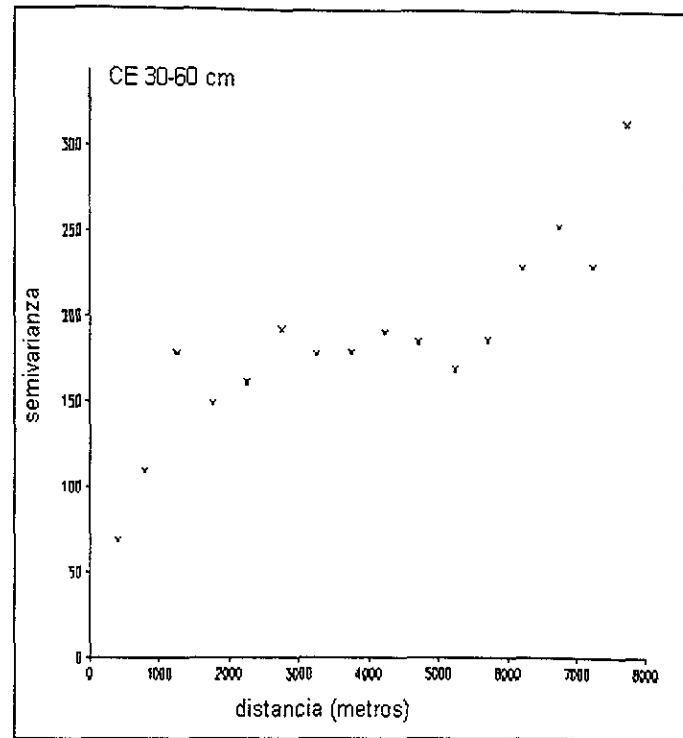
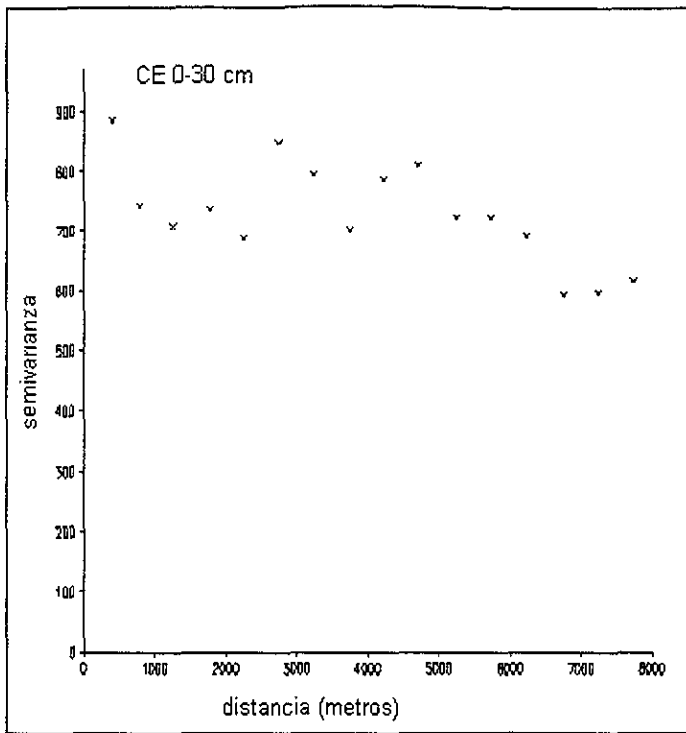


Fig. 6.3.2c: Ajuste de modelos a los semivariogramas de CE en las distintas profundidades del suelo para los datos localizados dentro de la Zona de Estudio (año 1971).

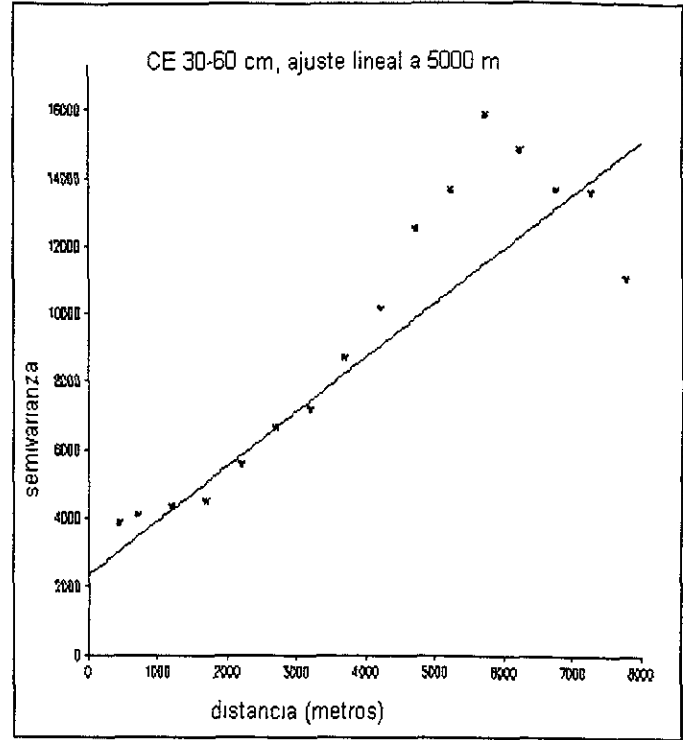
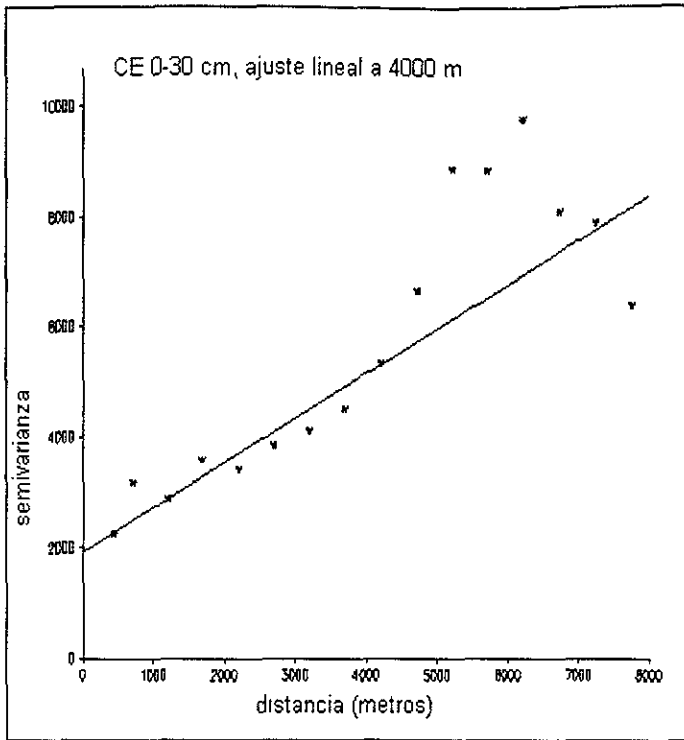


Fig. 6.3.2d: Ajuste de modelos a los semivariogramas de CE en las distintas profundidades del suelo para los datos localizados dentro de la Zona de Estudio (año 1998).

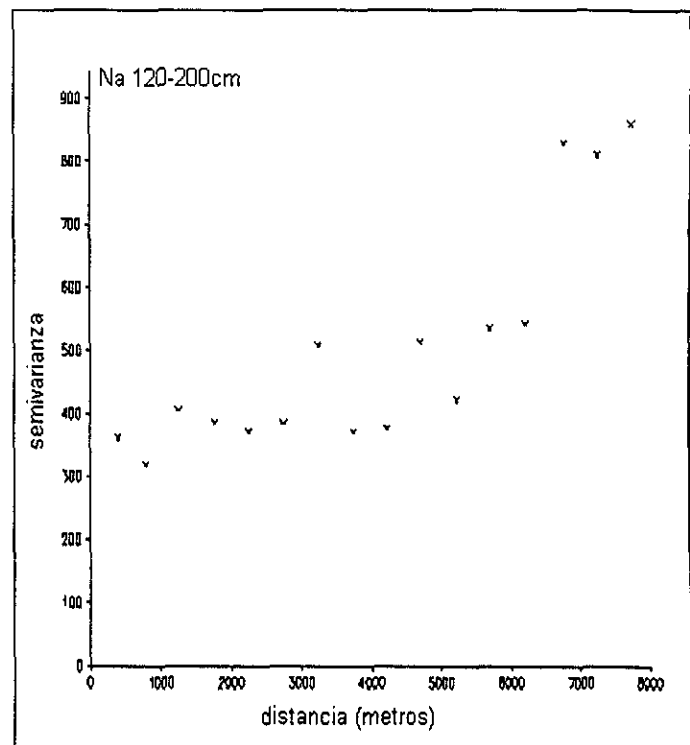
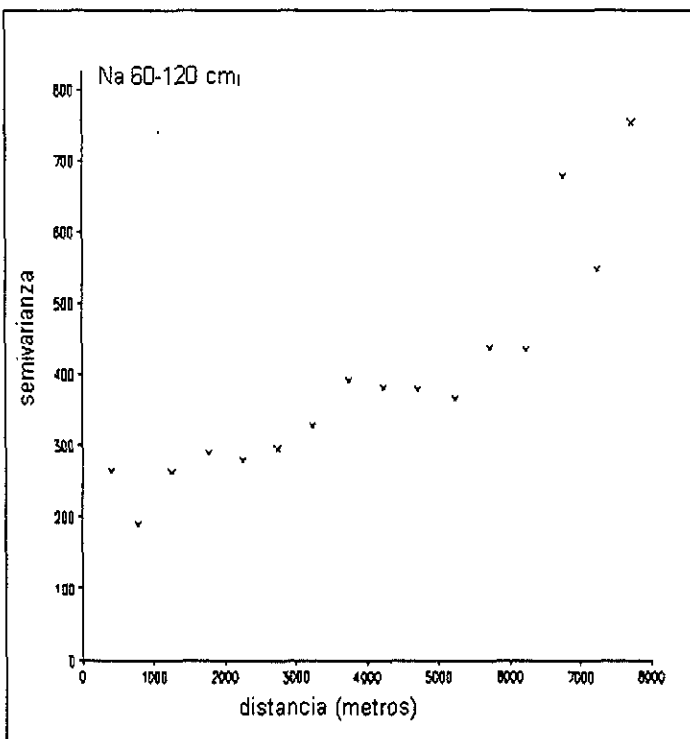
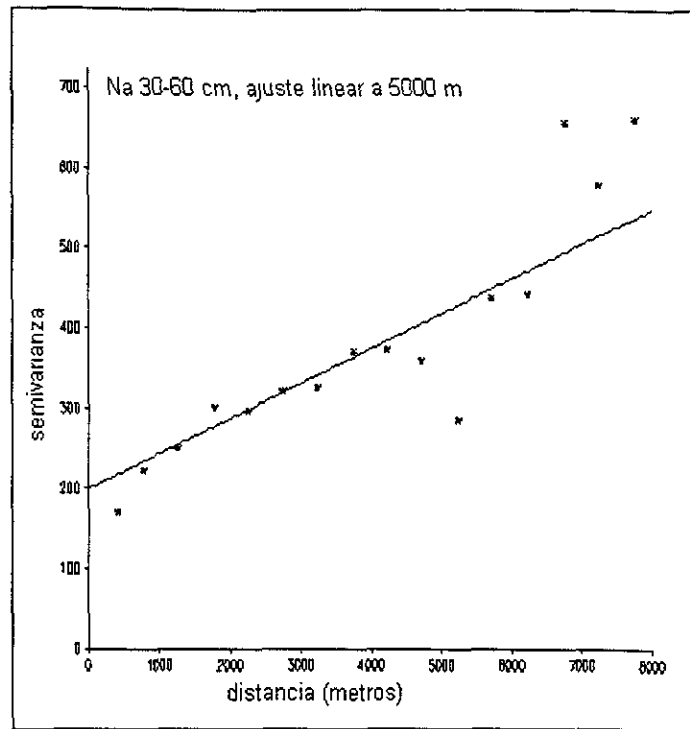
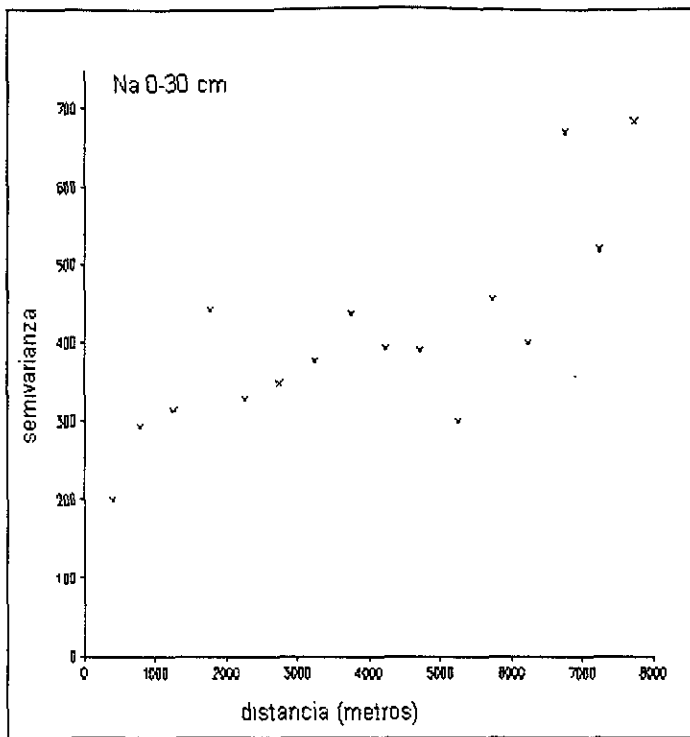


Fig. 6.3.2e: Ajuste de modelos a los semivariogramas de Na en las distintas profundidades del suelo para los datos localizados dentro de la Zona de Estudio (año 1971).

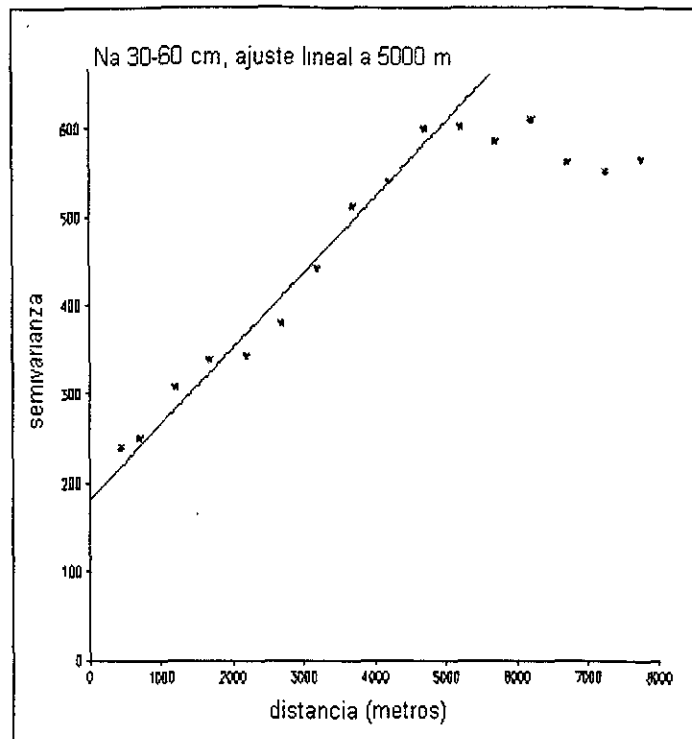
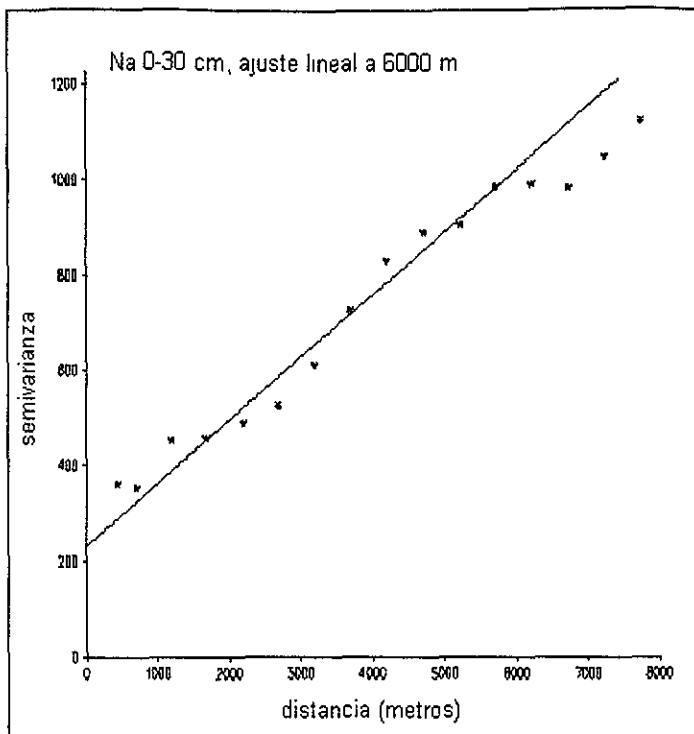


Fig. 6.3.2f: Ajuste de modelos a los semivariogramas de Na en las distintas profundidades del suelo para los datos localizados dentro de la Zona de Estudio (año 1998).

6.4 Análisis geoestadístico: interpolación de los datos mediante Kriging Ordinario.

Las figuras 6.4a a 6.4x muestran la interpolación de los datos mediante Kriging Ordinario dentro de la Zona de Estudio, además del error estándar para cada estimación realizada.

En el caso de las estimaciones de pH del año 1971, en todas las profundidades se observa que los valores más bajos (clases 8.6-8.9 y 9.0-9.4 en las figuras 6.4a, 6.4c, 6.4e y 6.4g) se localizan en la parte Este de la Zona de Estudio, aumentando estos valores en forma gradual en dirección Oeste (clases 9.5-9.9 y 10.0-10.5). Los valores más altos ocupan un área menor hacia la parte Sur. Es importante hacer notar, que el área de valores más bajos de pH (8.6-8.9) tiene un mayor tamaño conforme aumenta la profundidad (ej. Fig. 6.4e y Fig. 6.4g). El error estándar para todas las profundidades de pH del año 1971 (Figuras 6.4b, 6.4d, 6.4f y 6.4h, ver apéndice III) es mayor hacia los límites de la Zona de Estudio, en donde hay menos observaciones, encontrándose el área con el mayor error estándar en la profundidad de 0-30 cm (Fig. 6.4b).

Para el año de 1998, se puede observar un importante cambio en la distribución espacial de los valores de pH (Fig. 6.4i y Fig. 6.4j). El área con los valores más altos se encuentra en la parte Norte de la Zona de Estudio, aunque ésta es de menor tamaño hacia el Noreste (clase 10.0-10.5). Los valores de pH disminuyen en forma gradual hacia la parte Sur, encontrándose el área de menor pH (clase 8.6-8.9) hacia Sureste, además de que en la profundidad de 0-30 cm, también se presenta un área muy localizada en el límite Sur de la Zona de Estudio. Aunque para ambas profundidades el patrón en la distribución espacial de los valores de pH es muy similar, los valores más bajos ocupan una menor área en la profundidad de 30-60 cm. En cuanto al error estándar, en las dos profundidades éste es mayor hacia el extremo Noreste, es decir, en donde termina la rejilla de muestreo para este año (Fig. 6.4j y Fig. 6.4i, ver apéndice III).

La única profundidad de CE que se interpoló mediante Kriging Ordinario en el año de 1971, fue la de 60-120 cm, ya que como se mencionó anteriormente, los semivariogramas de las demás profundidades (0-30 cm, 30-60 cm y 120-200 cm) no presentaron una estructuración de los datos, no se aprecia la dependencia espacial, siendo la varianza nugget la que más contribuye a la semivarianza total; por esta razón no fue posible el ajuste de ningún modelo. En la figura 6.4m, se observa que para la profundidad de 60-120 cm, los valores de CE más bajos se encuentran en dirección Noreste, presentándose incluso, valores por debajo de los 16 dSm^{-1} , el cual representa el límite de tolerancia para casi todos los cultivos, incluyendo especies resistentes (Richards et al. 1973). En la mayor parte de la Zona de Estudio, los valores de CE estimados se encuentran dentro de la clase de $31\text{-}50 \text{ dSm}^{-1}$. La figura 6.4n (ver apéndice III) muestra que el error estándar es menor en la parte central, aumentando hacia los límites de la Zona de Estudio, en donde se tiene el menor número de observaciones.

En las dos profundidades del año de 1998 (0-30 cm y 30-60 cm), la CE muestra una distribución espacial en la cual los valores más altos (clases $151\text{-}200 \text{ dSm}^{-1}$, y $>200 \text{ dSm}^{-1}$) se encuentran hacia el Noroeste, disminuyendo en forma gradual hacia la parte Sureste de la Zona de Estudio (Fig. 6.4o y Fig. 6.4q). Entre los valores más bajos, se localiza un área que incluye valores de 16 dSm^{-1} , aunque, en la profundidad de 30-60 cm, éstos cubren una menor extensión; sin embargo, en esta última profundidad, se encuentra un área dentro de la clase $17\text{-}30 \text{ dSm}^{-1}$ no presente para la profundidad de 0-30 cm (dirección Noreste), además de que los valores entre $31\text{-}50 \text{ dSm}^{-1}$ llegan hasta el límite Noreste de la Zona de Estudio. El error estándar aumenta conforme se tienen menos observaciones, es decir, hacia los límites de la rejilla de muestreo, presentándose el área de menor error estándar en la segunda profundidad (Fig. 6.4p y Fig. 6.4r, ver apéndice III). La diferencia en las clases de error estándar de 1971 con respecto a 1998, obedecen a que la distribución estadística de los datos tiene un mayor rango en éste último año.

Al igual que para la variable anterior, la mayoría de los semivariogramas de PSI de 1971 presentaron una muy alta varianza nugget, por lo que la única profundidad a la cual se le pudo ajustar un modelo, y posteriormente hacer interpolaciones mediante Kriging Ordinario, fue la de 30-60 cm del año 1971; en este caso, los valores más bajos de PSI se localizan hacia el Noreste de la Zona de Estudio, y aumentan gradualmente hacia la parte Sur, hasta alcanzar los intervalos comprendidos en la clase 81-90 de PSI (Fig. 6.4s). Nuevamente, el error estándar tiene el valor más bajo en la parte central, y aumenta hacia las orillas de la Zona de Estudio (Fig. 6.4t, ver apéndice III).

En el año de 1998, en ambas profundidades (0-30 cm y 30-60 cm), los valores más altos de PSI (91-100), se encuentran hacia el Noroeste, aunque éstos abarcan una menor extensión en la segunda profundidad (Fig. 6.4u y 6.4w); por otra parte, los valores de PSI más bajos (clases 40-50 y 61-60), se encuentran hacia el Sureste, y abarcan una mayor área, inclusive llegando hacia el límite Sur de la Zona de Estudio, en la profundidad de 0-30 cm. El error estándar, al igual que en las dos variables anteriores, es mayor hacia el límite Noreste, en donde hay menos datos; el área de mayor tamaño en cuanto a los valores de error estándar más altos, se presenta en la profundidad de 30-60 cm (Fig. 6.4v y Fig. 6.4x, ver apéndice III).

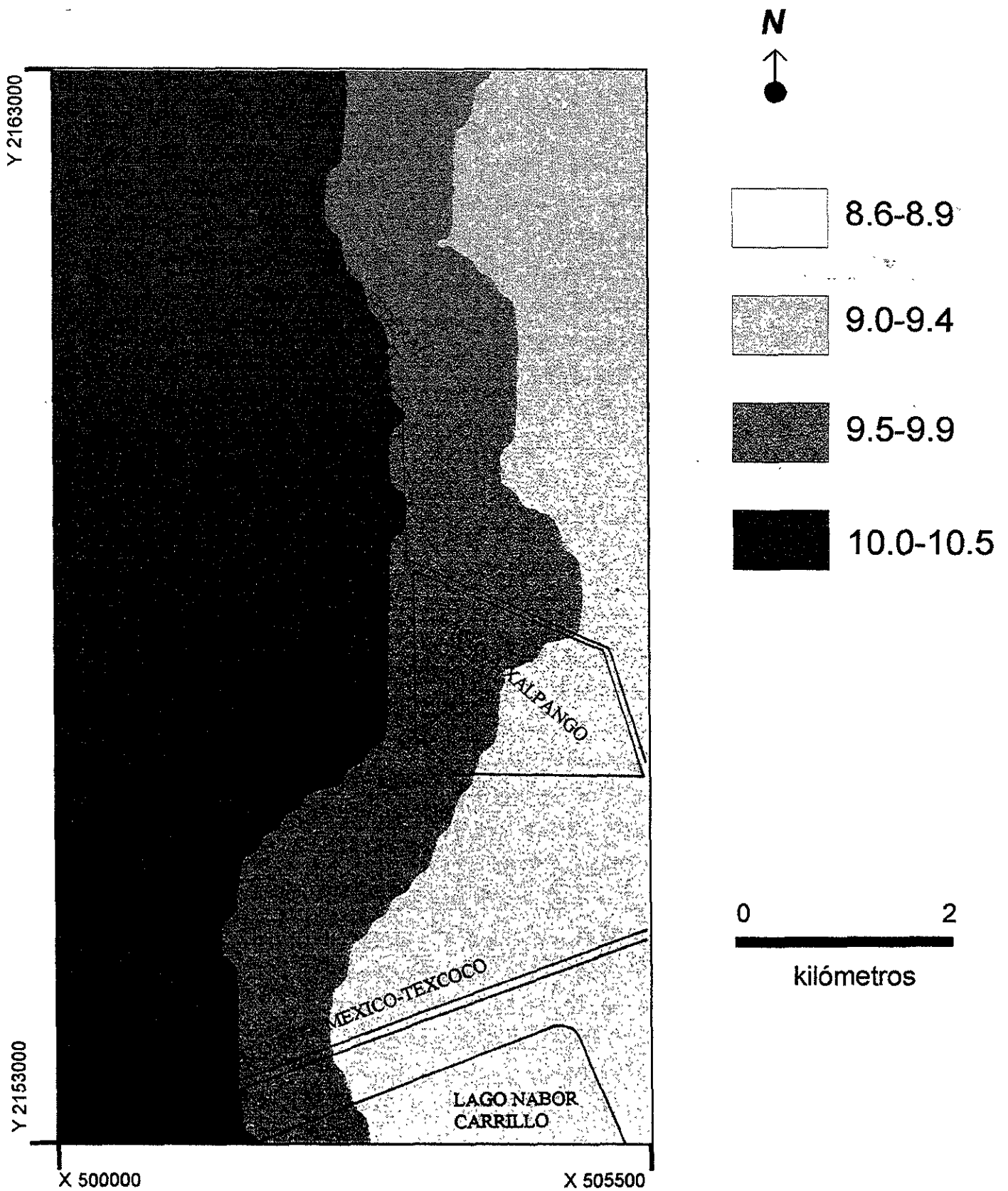


Fig. 6.4a: Estimaciones de los valores de pH para una profundidad en el suelo de 0-30 cm (1971).

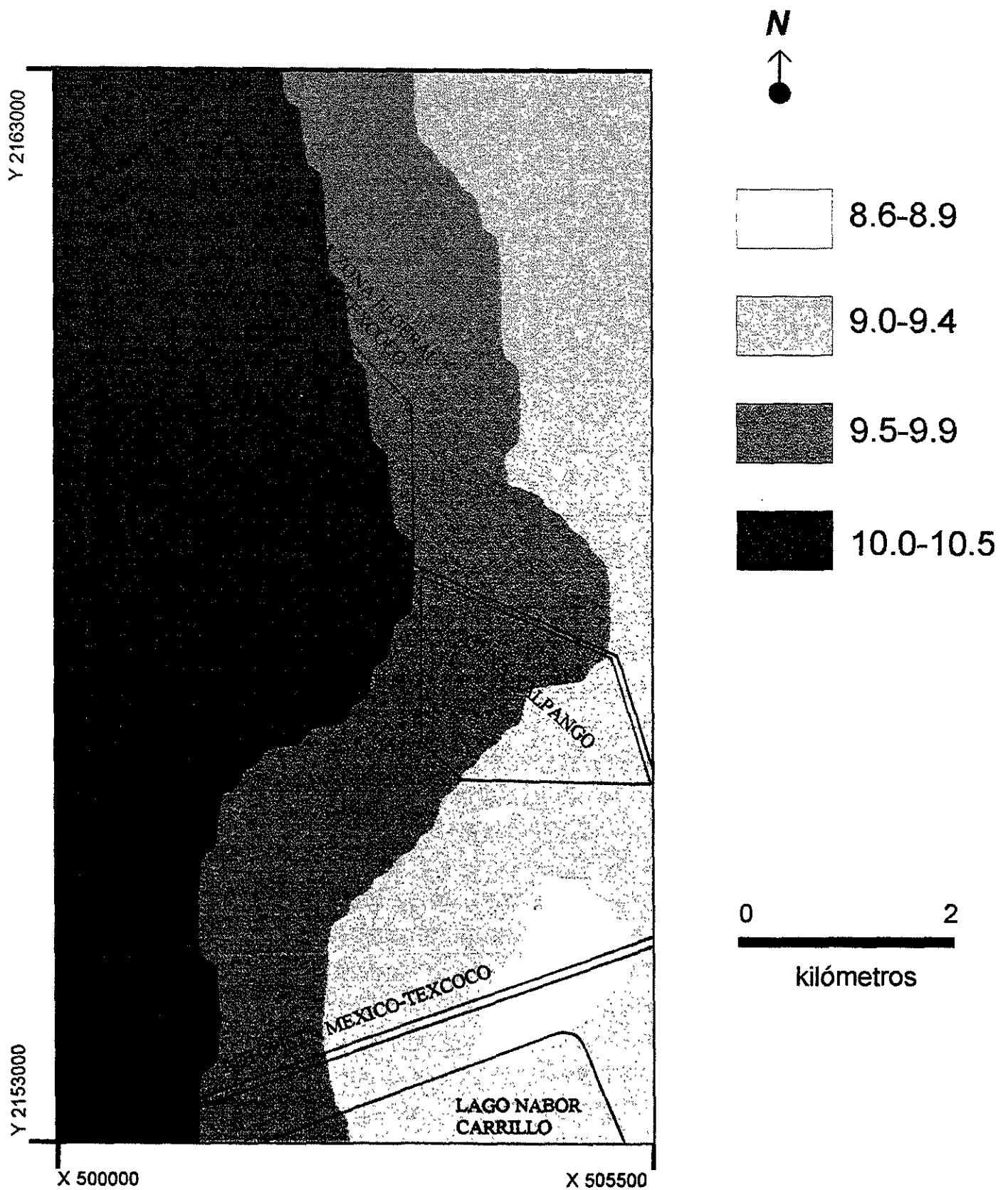


Fig. 6.4c: Estimaciones de los valores de pH para una profundidad en el suelo de 30-60 cm (1971).



Fig. 6.4e: Estimaciones de los valores de pH para una profundidad en el suelo de 60-120 cm (1971).

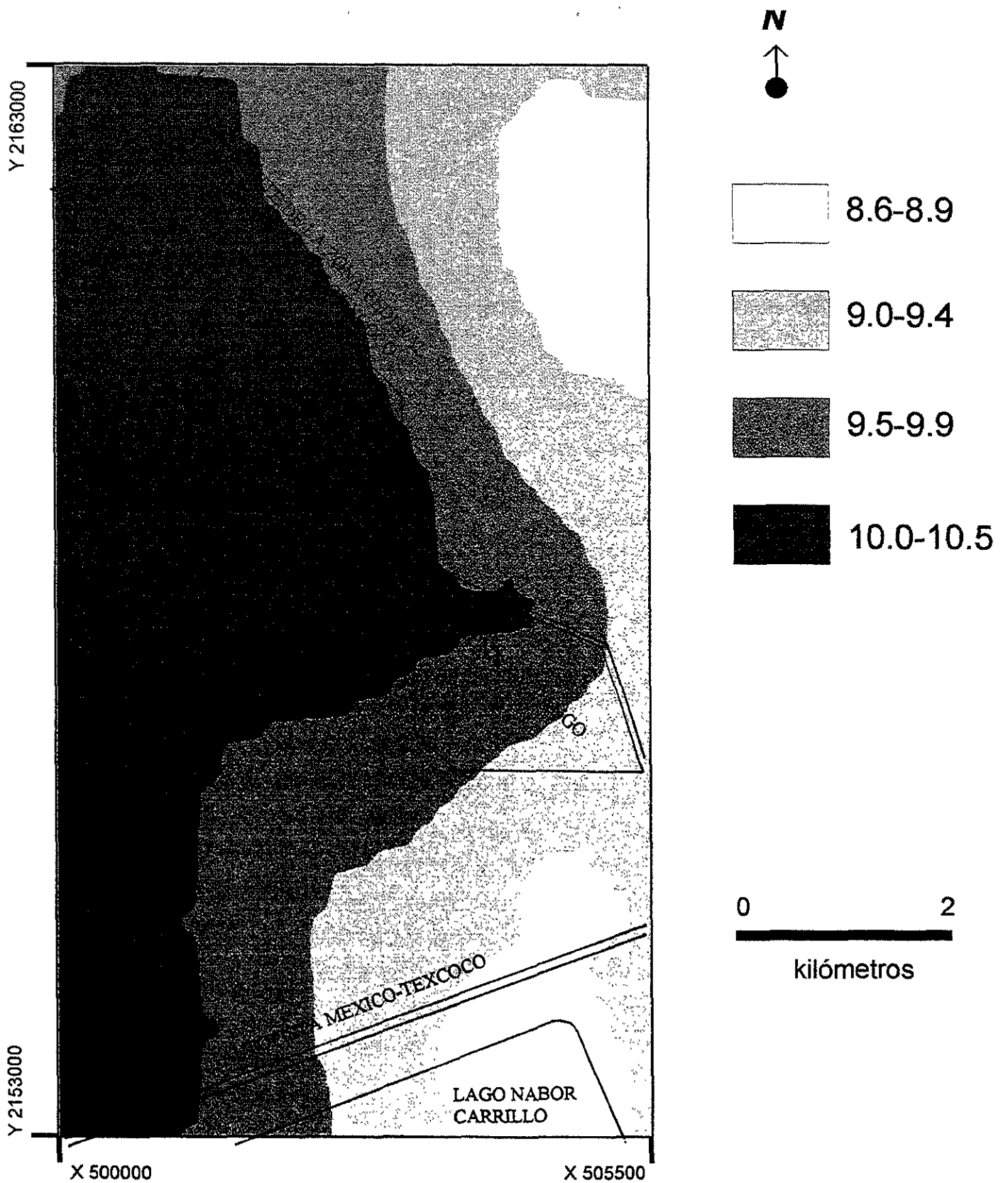


Fig. 6.4g: Estimaciones de los valores de pH para una profundidad en el suelo de 120-200 cm (1971).

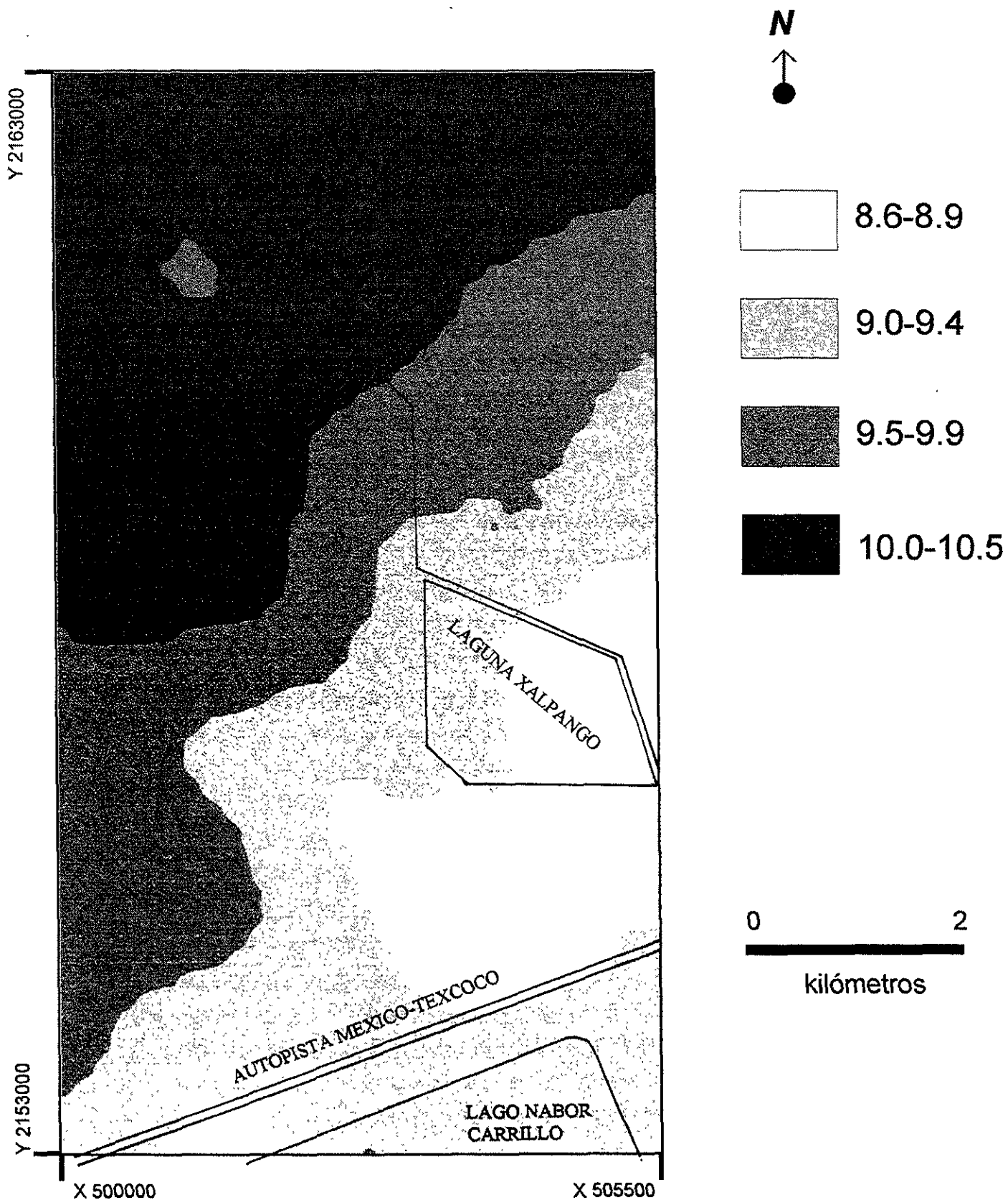


Fig. 6.4i: Estimaciones de los valores de pH para una profundidad en el suelo de 0-30 cm (1998).

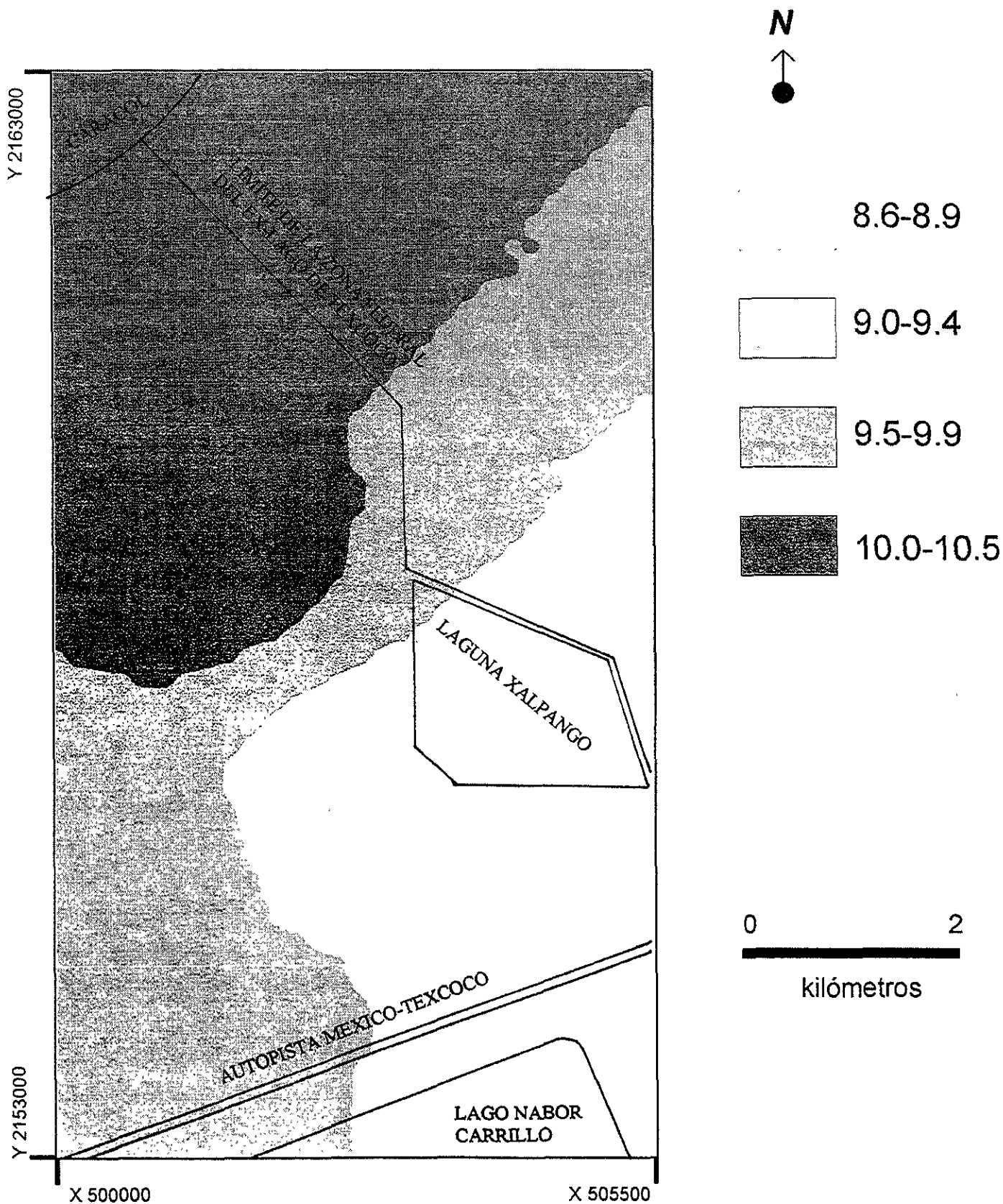


Fig. 6.4k: Estimaciones de los valores de pH para una profundidad en el suelo de 30-60 cm (1998).

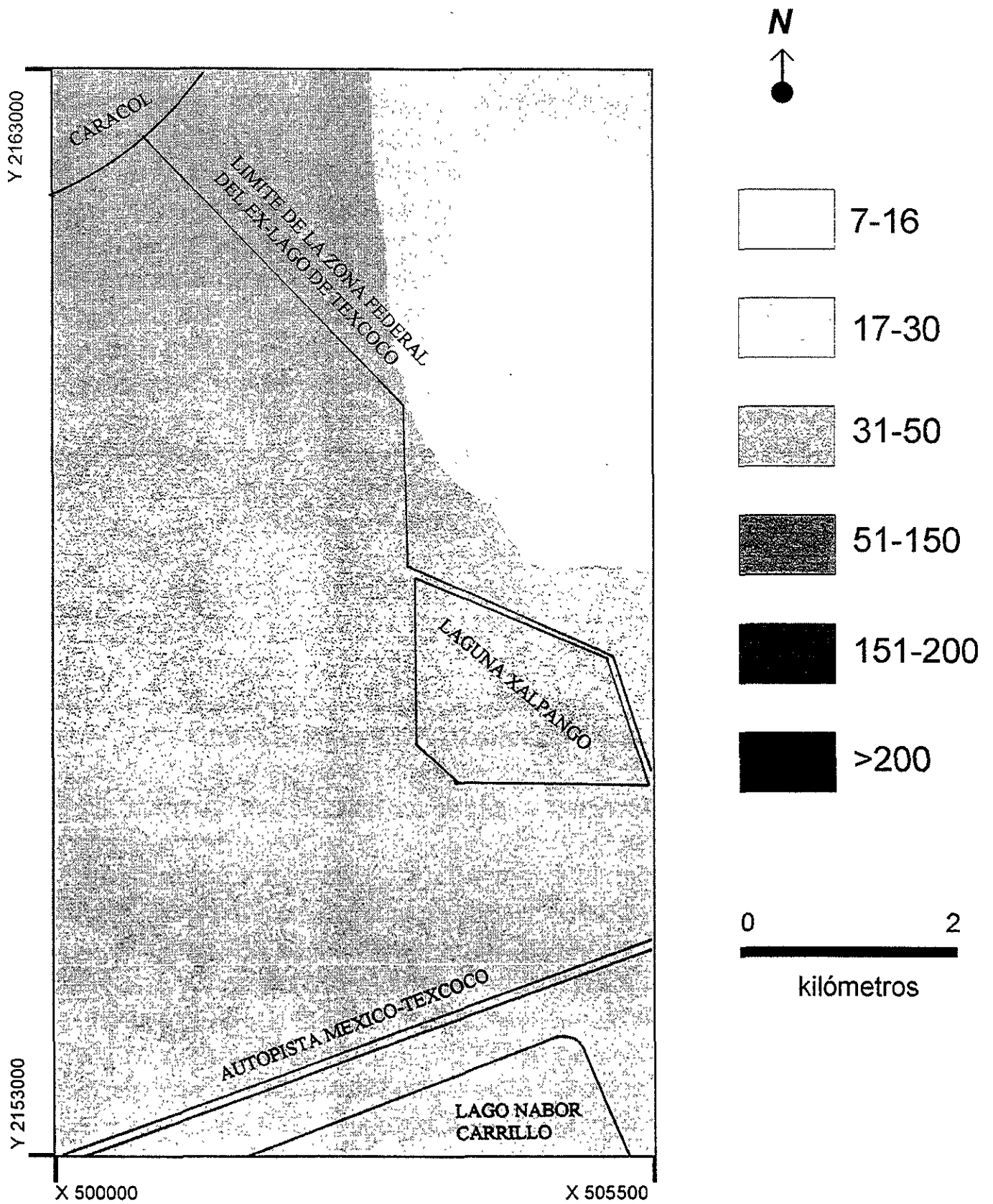


Fig. 6.4m: Estimaciones de los valores de CE (dSm⁻¹) para una profundidad en el suelo de 60-120 cm (1971).

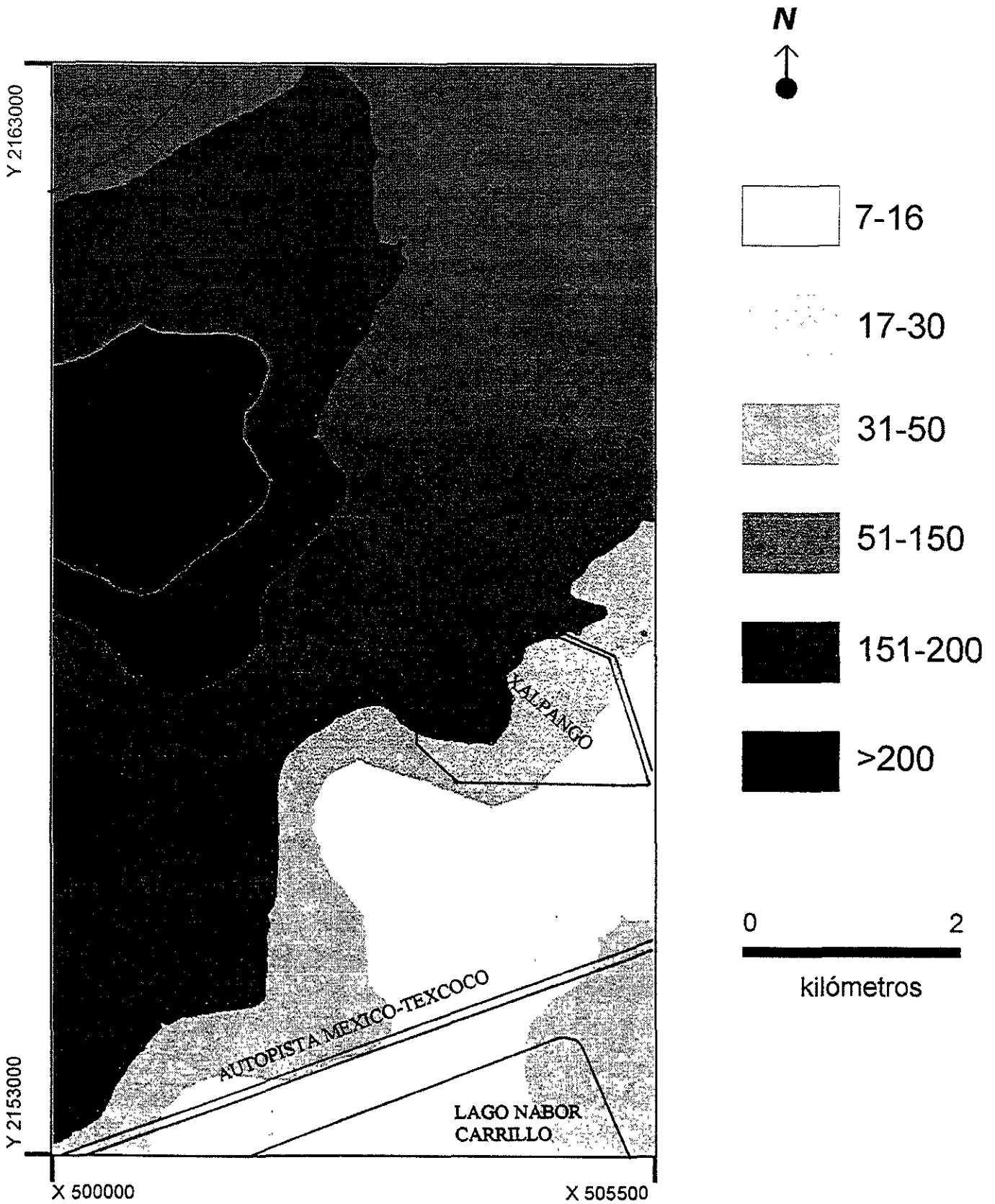


Fig. 6.4o: Estimaciones de los valores de CE (dSm^{-1}) para una profundidad en el suelo de 0-30 cm (1998).

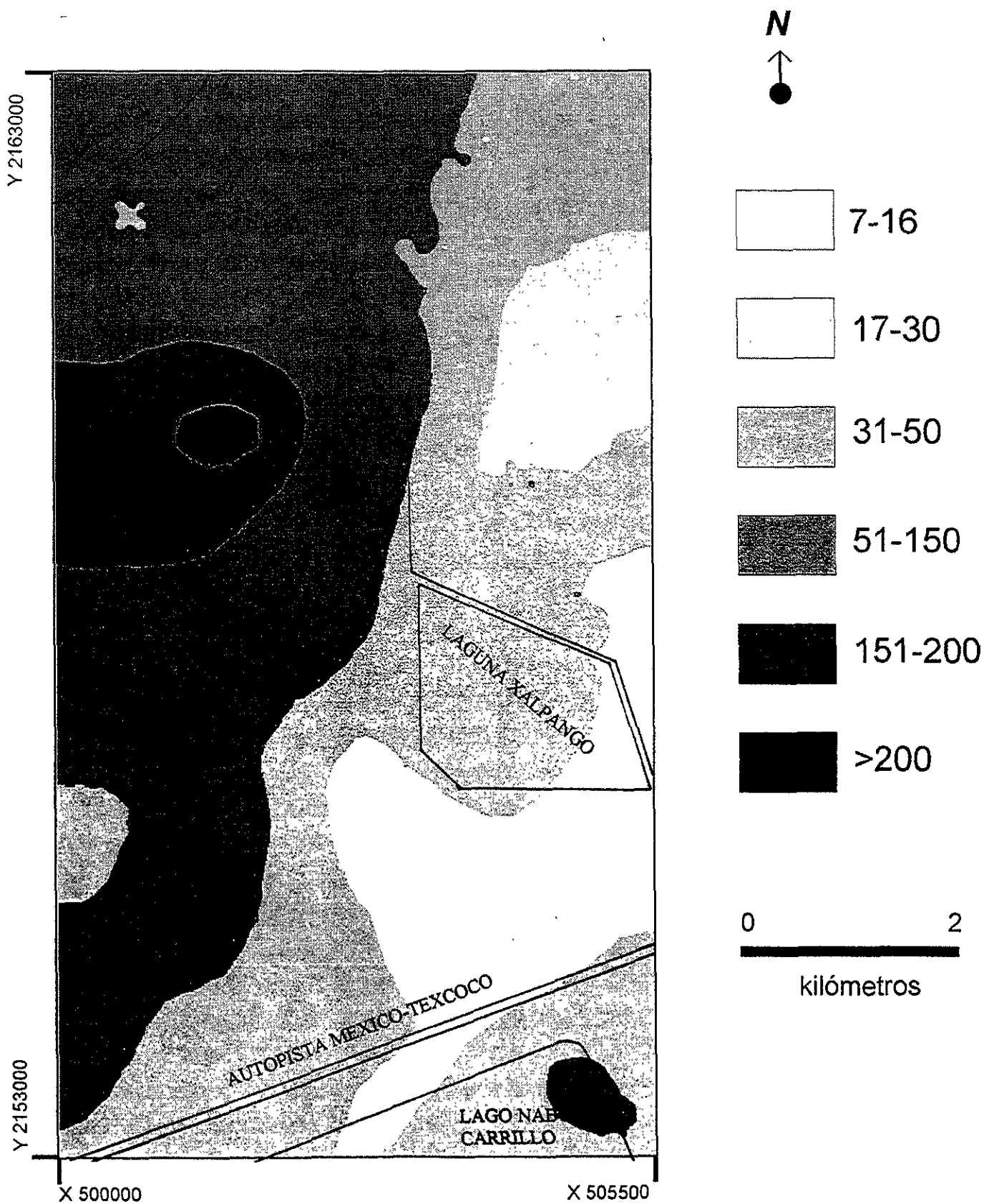


Fig. 6.4q: Estimaciones de los valores de CE (dSm⁻¹) para una profundidad en el suelo de 30-60 cm (1998).

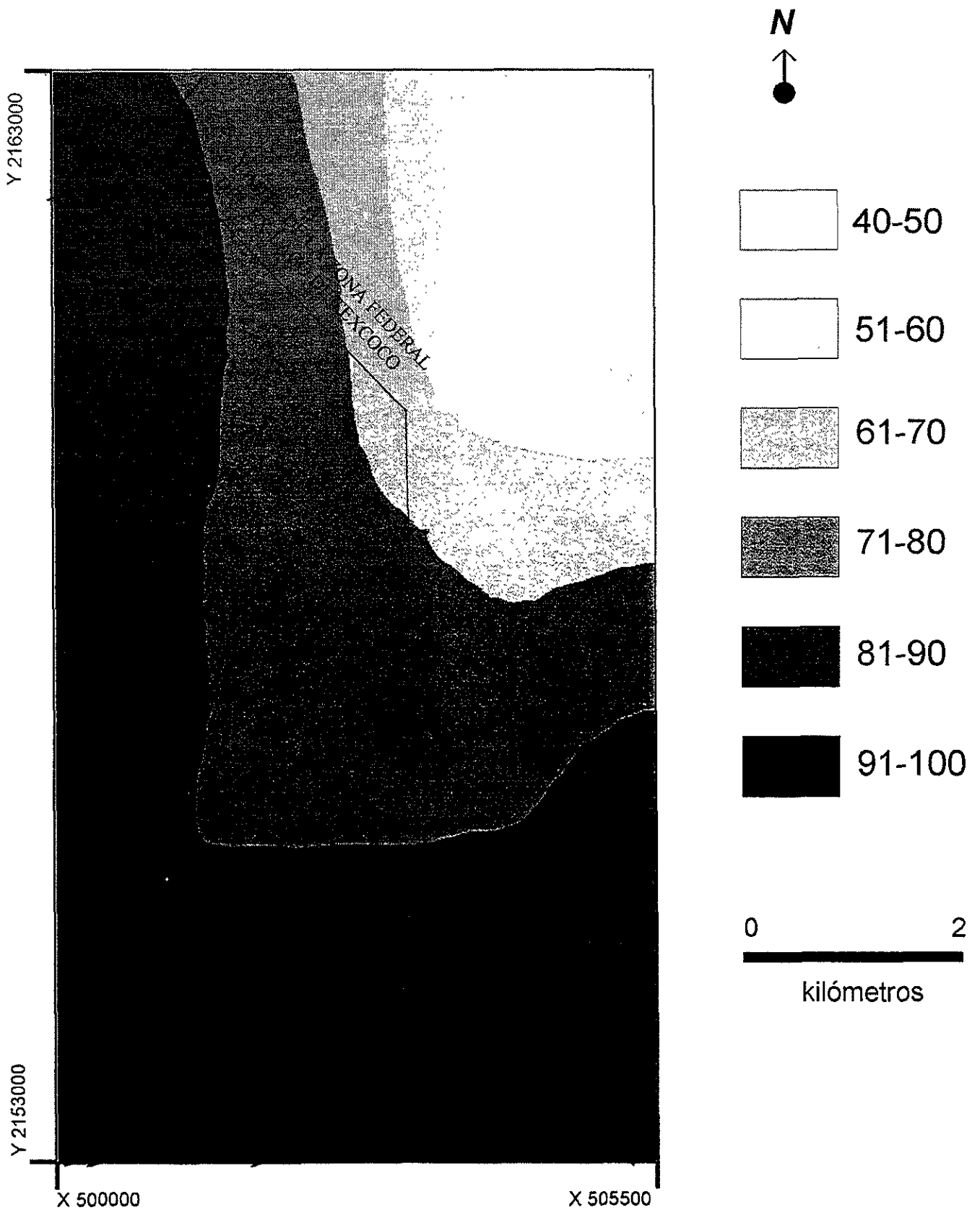


Fig. 6.4s: Estimaciones de los valores de Na (PSI) para una profundidad en el suelo de 30-60 cm (1971).

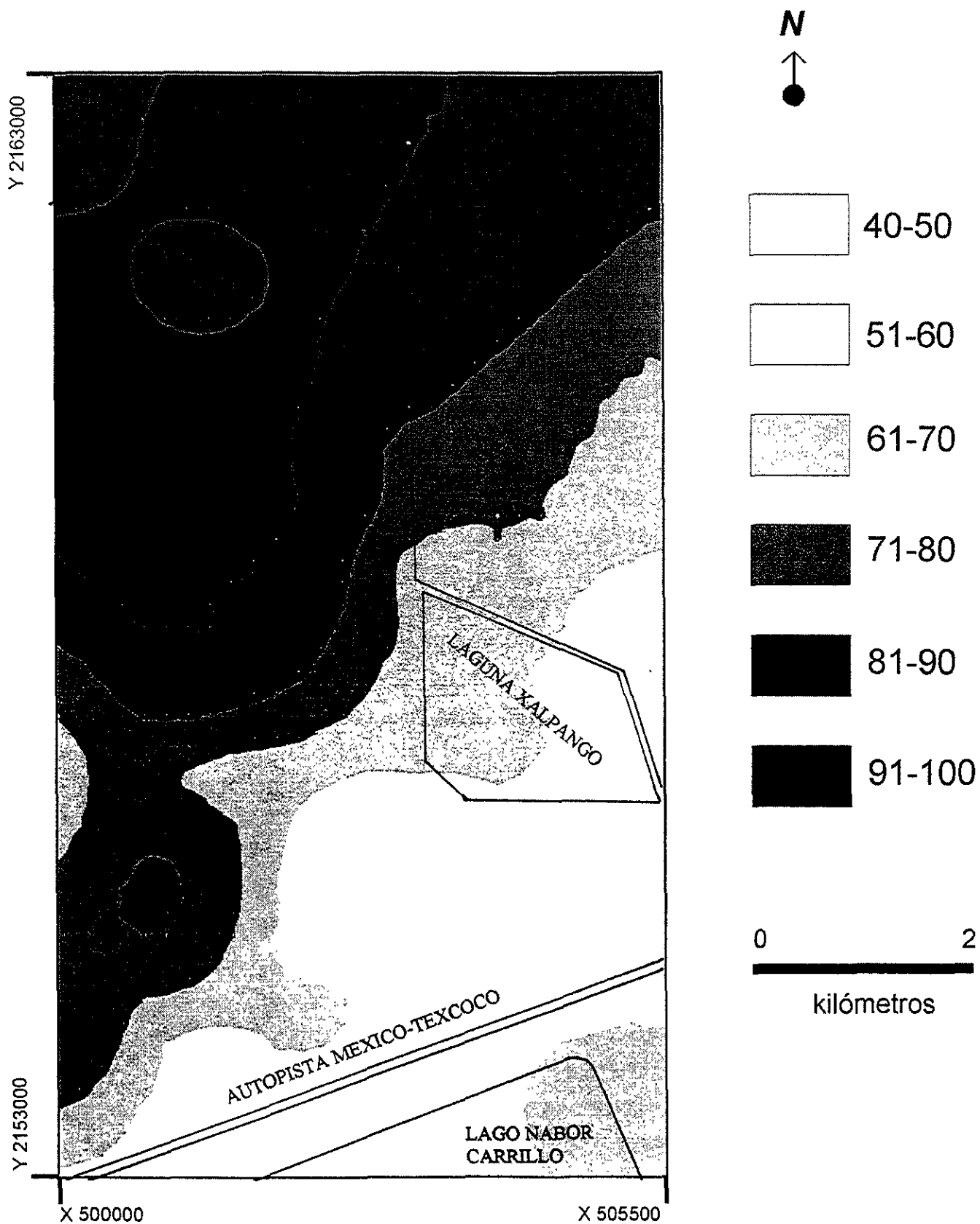


Fig. 6.4u: Estimaciones de los valores de Na (PSI) para una profundidad en el suelo de 0-30 cm (1998).

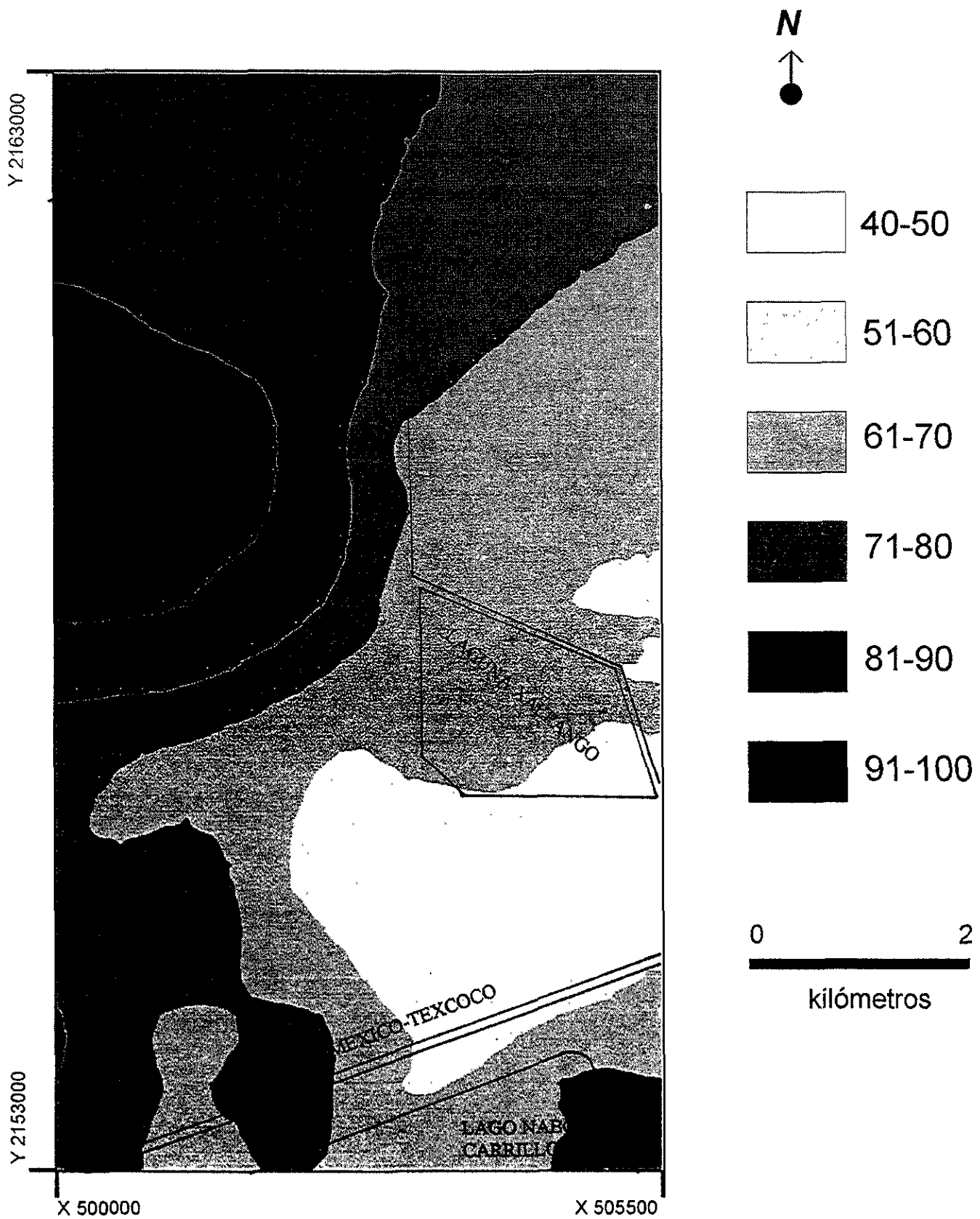


Fig. 6.4w: Estimaciones de los valores de Na (PSI) para una profundidad en el suelo de 30-60 cm (1998).

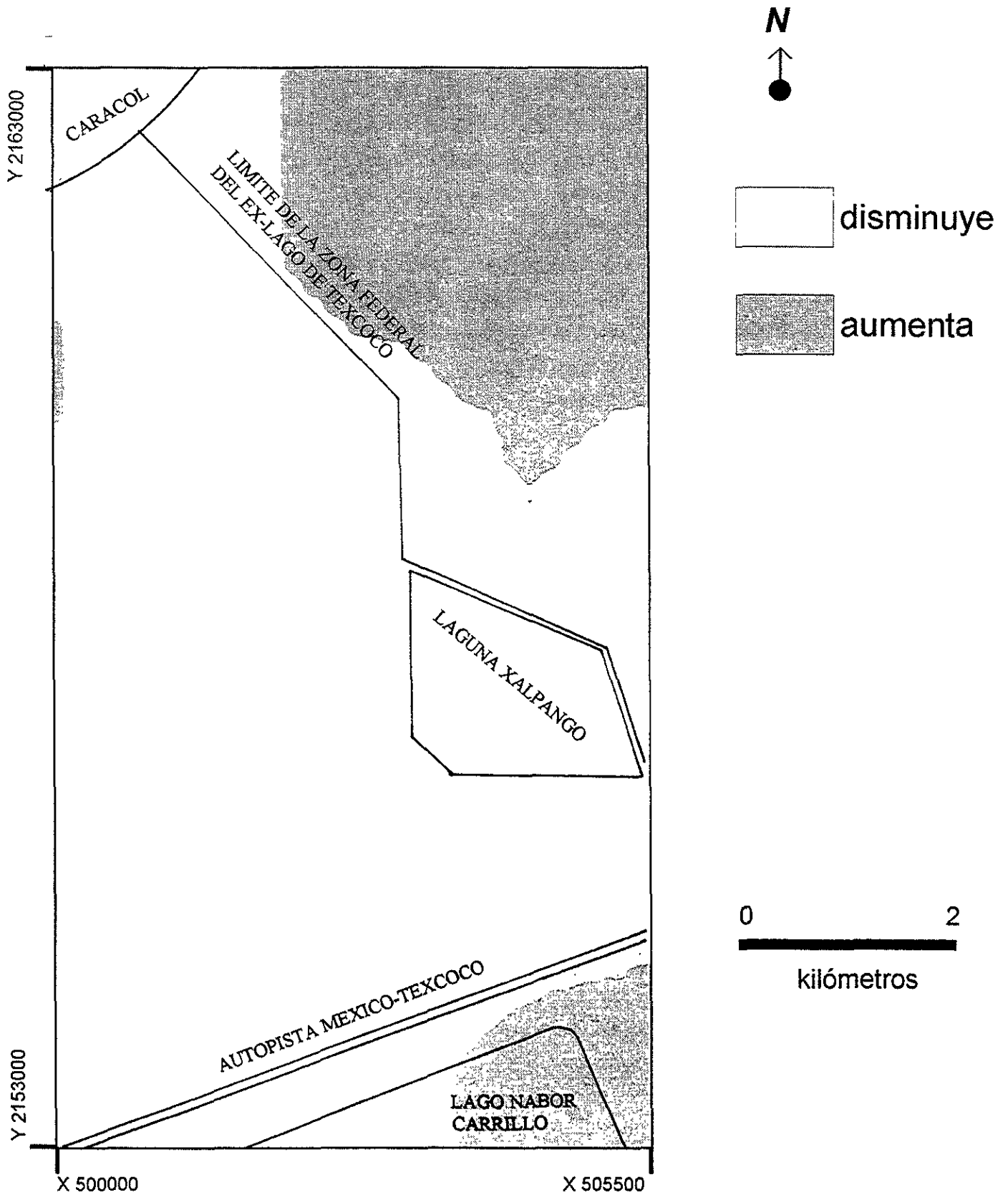


Fig. 6.5a: Cambio de los valores de pH estimados para 1998 respecto a los valores estimados para 1971 (profundidad 0-30 cm)

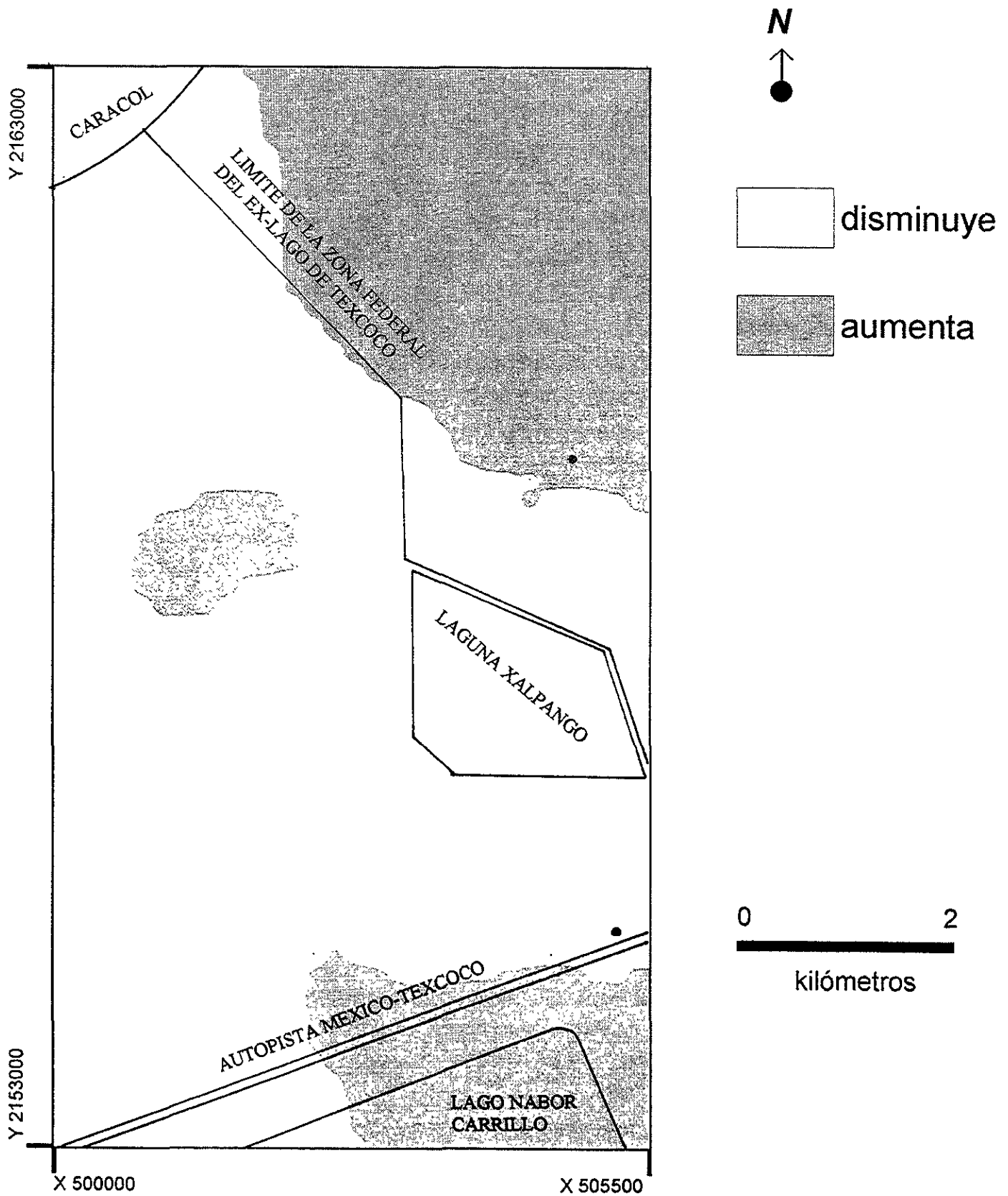


Fig. 6.5b: Cambio de los valores de pH estimados para 1998 respecto a los valores estimados para 1971 (profundidad 30-60 cm)

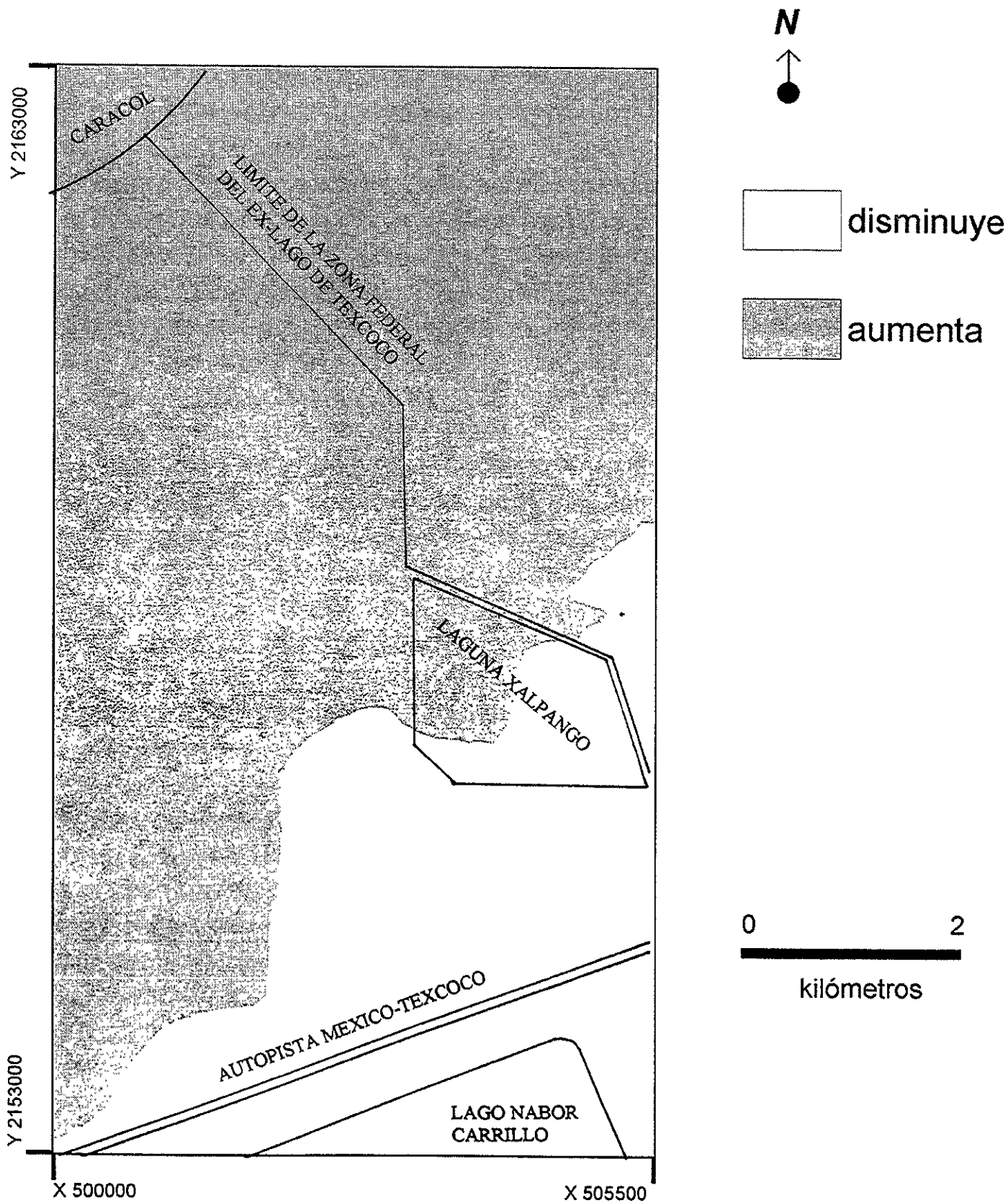


Fig. 6.5c: Cambio de los valores de CE estimados para 1998 respecto al valor promedio de los datos de 1971 (profundidad 0-30 cm)

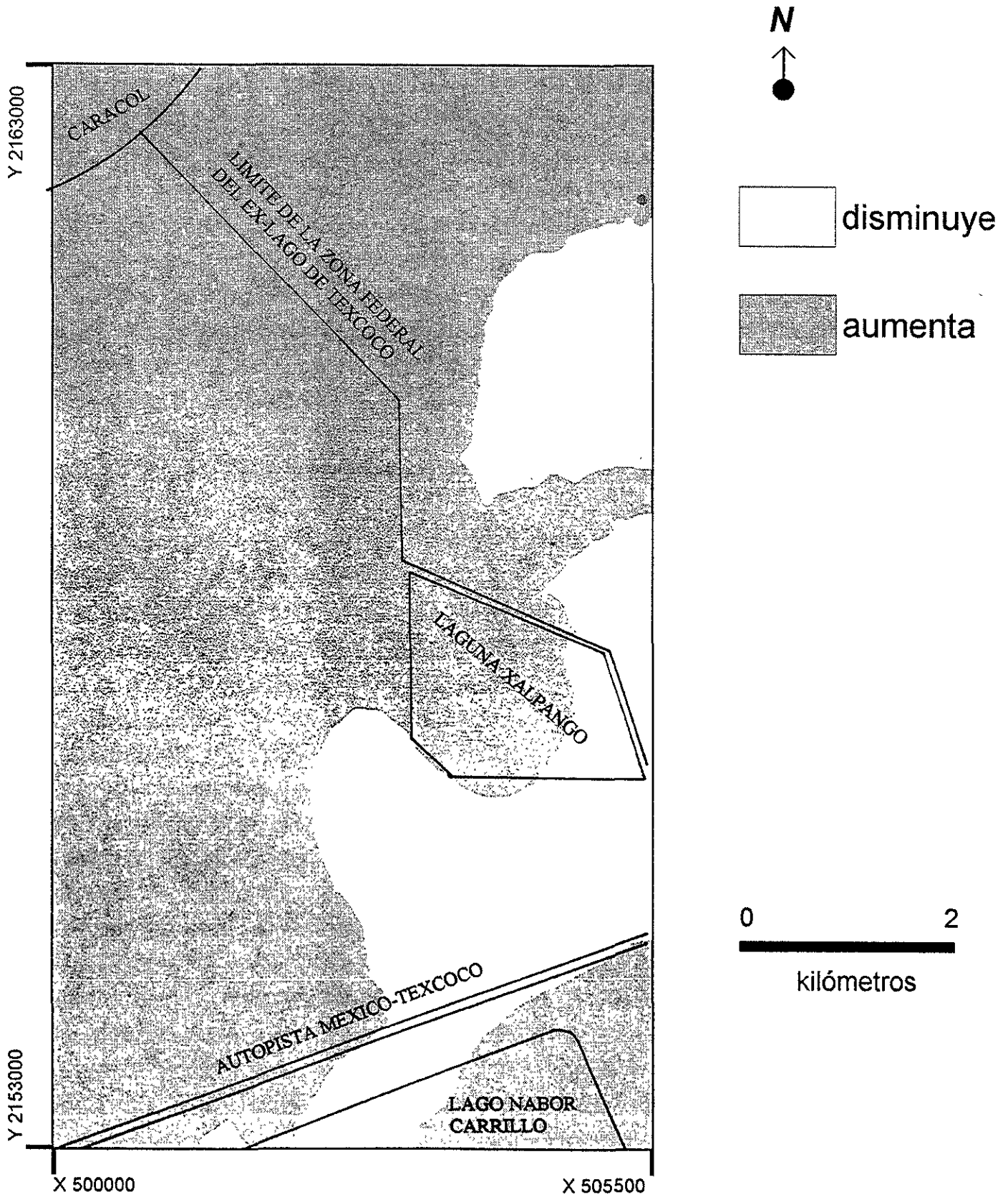


Fig. 6.5d: Cambio de los valores de CE estimados para 1998 respecto al valor promedio de los datos de 1971 (profundidad 30-60 cm)

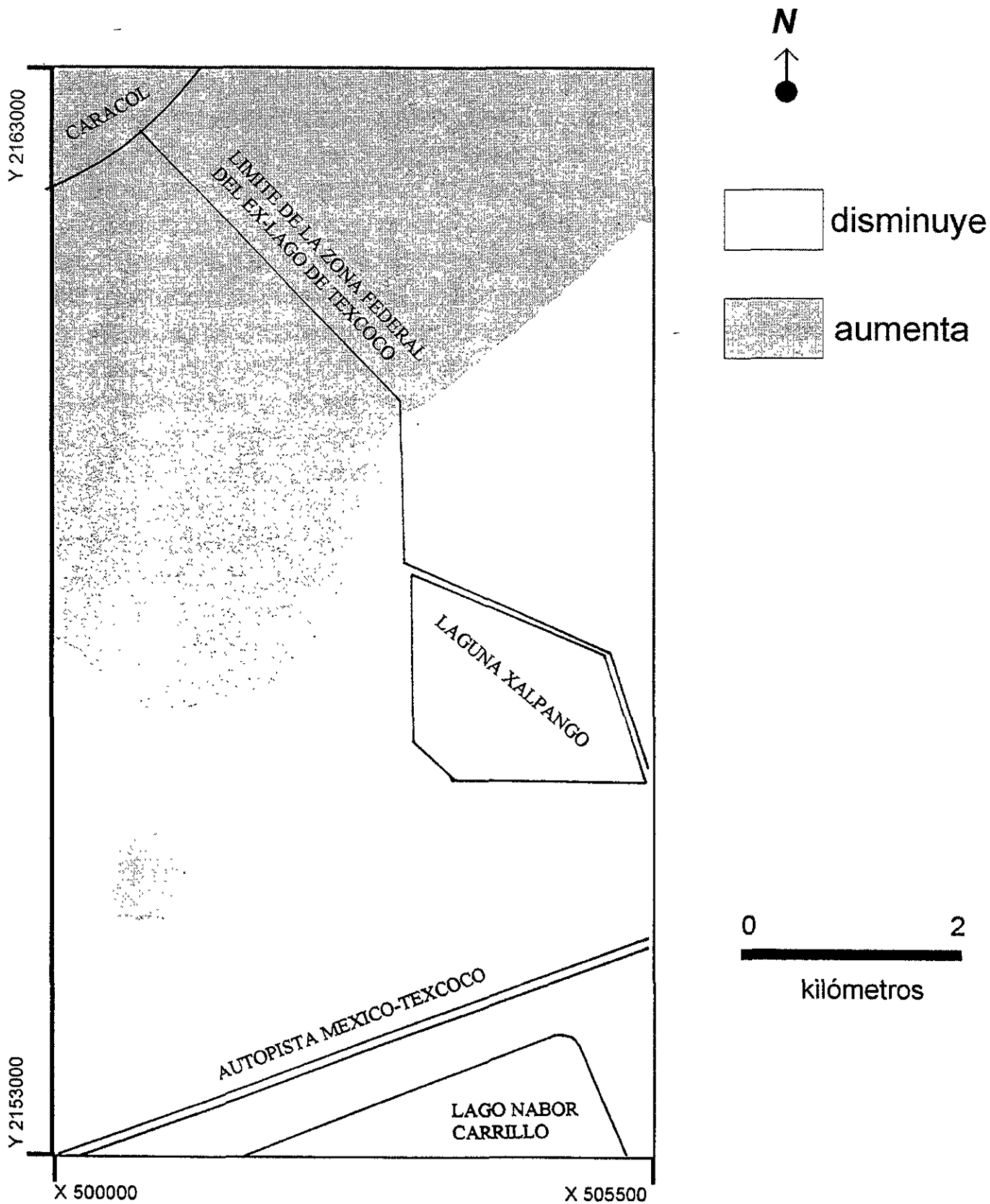


Fig. 6.5e: Cambio de los valores de Na estimados para 1998 respecto al valor promedio de los datos de 1971 (profundidad 0-30 cm)

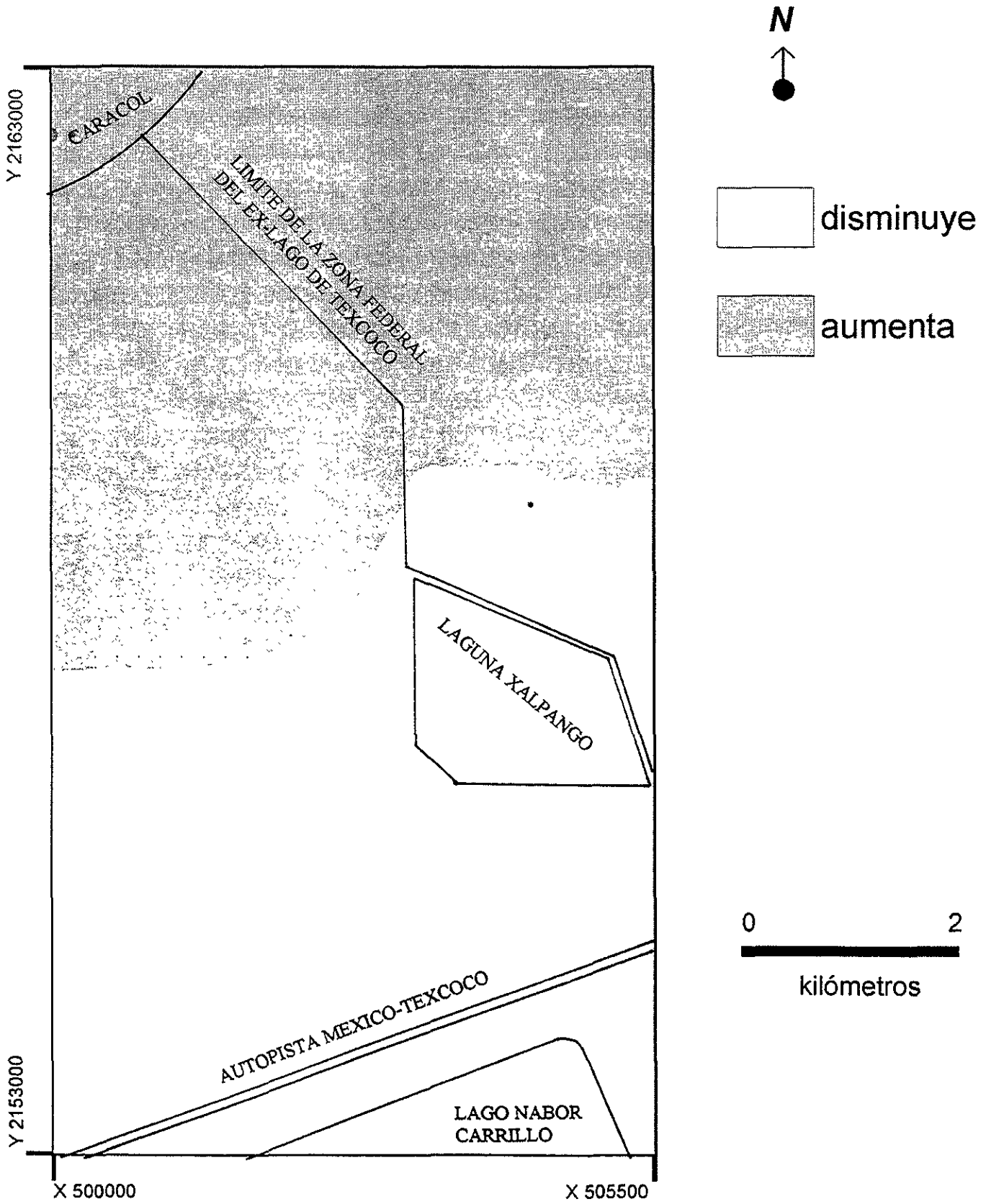


Fig. 6.5f: Cambio de los valores de Na estimados para 1998 respecto a los valores estimados para 1971 (profundidad 30-60 cm)

La Tabla 6.4.1 muestra los estadísticos descriptivos de las estimaciones de 1971 y 1998 dentro de la Zona de Estudio. Para el pH, todas las profundidades en ambos años tienen un valor promedio por arriba del rango que indica la presencia de suelos sódicos (8.5 (Brady y Weil 1996), además de presentar un sesgo negativo. En 1971, la profundidad con el valor promedio más alto corresponde a la de 0-30 cm (9.74), y el valor de varianza más alto se encuentra en la tercera y cuarta profundidades (0.21 tanto para 60-120 cm, como para 120-200 cm). En 1998, esta misma variable tiene el valor promedio más alto en la profundidad de 30-60 cm (9.64), y la varianza más baja también corresponde a esta profundidad (0.17).

En la misma tabla, se observa que para la CE, el promedio de las estimaciones de ambos años, tienen un valor superior al límite de tolerancia para la mayoría de los cultivos, (16 dSm⁻¹ (Richards et al. 1973)), siendo de 36.31 dSm⁻¹ para la profundidad de 60-120 cm de 1971, y de 96.34 dSm⁻¹ y 64.80 dSm⁻¹ para la primera y segunda profundidad del año 1998. La mayor varianza de las tres profundidades analizadas se encuentra en la profundidad de 0-30 cm del año de 1998 (98.71 para la profundidad de 60-120 cm de 1971, y en 1998, 3968.95 en los primeros 30 cm, y 2014.29 hasta 60 cm de profundidad). El coeficiente de sesgo para las profundidades de 0-30 cm y de 30-60 cm de 1998 es positivo, mientras que para la profundidad de 60-120 cm del año de 1971 es negativo. Es importante mencionar, que la gran diferencia con la CE en 1971 se debe a las diferencias en los rangos de valores que se presentan entre ambos años.

Finalmente, el PSI, tiene un valor promedio en las tres profundidades estimadas, superior al tolerable por la mayoría de las plantas (hasta un PSI de 13 (Brady y Weil 1996). El valor promedio de la profundidad de 30-60 cm de 1971 (PSI de 74.86) es mayor que en las dos profundidades del año de 1998 (PSI de 72.50 para los primeros 30 cm, y 72.04 hasta 60 cm de profundidad). La mayor varianza corresponde a la profundidad de 0-30 cm del año 1998, y en los tres casos el sesgo es negativo.

pH		media	mediana	varianza	d. estandar (a)	c. sesgo (b)	mínimo	máximo
profundidad	1971							
	0-30cm	9.74	9.86	0.18	0.42	-0.42	8.95	10.24
	30-60cm	9.69	9.82	0.17	0.41	-0.43	8.93	10.17
	60-120cm	9.61	9.81	0.21	0.46	-0.45	8.71	10.14
120-200cm	9.61	9.82	0.21	0.45	-0.46	8.81	10.16	
1998								
	0-30cm	9.54	9.61	0.26	0.51	-0.26	8.57	10.24
	30-60cm	9.64	9.69	0.17	0.41	-0.49	8.73	10.22
CE (dSm)								
profundidad	1971	media	mediana	varianza	d. estandar	c. sesgo	mínimo	máximo
	0-30cm	*	*	*	*	*	*	*
	30-60cm	*	*	*	*	*	*	*
	60-120cm	36.31	39.10	98.71	9.94	-1.10	8.10	52.96
120-200cm	*	*	*	*	*	*	*	
1998								
	0-30cm	96.34	86.00	3968.95	63.00	0.52	7.00	267.50
	30-60cm	64.80	47.70	2014.29	44.88	1.26	10.50	221.10
Na (PSI)								
profundidad	1971	media	mediana	varianza	d. estandar	c. sesgo	mínimo	máximo
	0-30cm	*	*	*	*	*	*	*
	30-60cm	74.86	80.19	158.10	12.57	-1.32	41.84	89.29
	60-120cm	*	*	*	*	*	*	*
120-200cm	*	*	*	*	*	*	*	
1998								
	0-30cm	72.50	74.77	284.50	16.87	-0.50	29.50	94.82
	30-60cm	72.04	71.37	162.30	12.74	-0.34	35.65	93.38
* no se ajustó ningún modelo								
(a) desviación estandar								
(b) coeficiente de sesgo								
Nota: el número de estimaciones de cada variable en cada una de las distintas profundidades es de 1428 para ambos años.								

6.5 Evaluación del cambio entre 1971 y 1998.

La comparación de las estimaciones de pH para la profundidad de 0-30 cm, entre el año de 1971 y 1998, se muestra en la figura 6.5a. Como se puede observar, la mayor parte de la Zona de Estudio presenta una disminución de los valores de pH. Sin embargo, hacia la parte Noreste y Sureste, además de una pequeña zona hacia el Noroeste, se encuentran dos áreas en donde ha habido un aumento con respecto al año de 1971. Para la profundidad de 30-60 cm de esta misma variable, el área donde disminuyen los valores de pH en 1998 presenta una distribución similar al caso anterior, aunque ésta abarca una menor extensión, y se incluye una zona de aumento no presente en la comparación hecha para la profundidad de 0-30 cm (Fig. 6.5b).

Como se mencionó en la metodología, el cambio de la CE en ambas profundidades se evaluó comparando los valores estimados para 1998, con el valor promedio de los datos de la Zona de Estudio en 1971. En el caso de la profundidad de 0-30 cm, sólo se aprecia que hubo una disminución con respecto al promedio de 1971 en dirección Sureste (Fig. 6.5c). Para la profundidad de 30-60 cm, en la mayoría de la Zona de Estudio se observa un aumento de la CE, encontrándose el área de disminución hacia el Este (Fig. 6.5d).

En el caso del Na, al evaluar el cambio en la profundidad de 0-30 cm de los valores estimados para 1998, contra el promedio de los datos de 1971, se observa que los valores para 1998 que disminuyen cubren la mayor extensión dentro de la Zona de Estudio, abarcando la parte Sur (a excepción de un área de pequeña extensión hacia el Suroeste), y llegan incluso a extenderse hacia el Noreste (Fig. 6.5e). En cuanto a la comparación de los valores estimados de 1998 respecto a los valores estimados de 1971, para la profundidad de 30-60 cm, el área en donde hubo una disminución se localiza en toda la parte Sur, y es la que cubre una mayor extensión (Fig. 6.5f).

Al hacer una comparación entre la profundidad de 0-30 cm y la de 30-60 cm, en la distribución espacial de cada una de las variables analizadas, se observa que el patrón que ambas profundidades siguen es similar, aunque se

presentan diferencias en la extensión que las áreas de aumento y disminución tienen. Por otra parte, la distribución de las tres variables en cada una de las profundidades estudiadas, coincide en que los valores de 1998 disminuyen con respecto a 1971 principalmente hacia el Sur, aunque éstos no abarcan la misma extensión; las principales diferencias en las tres variables se encuentran en la parte Norte de la Zona de Estudio, por ejemplo, el pH en ambas profundidades muestra una disminución en 1998, en dirección Noroeste, que no se observa en las otras dos variables. Sin embargo, es de suma importancia recordar que no todos los mapas en donde se muestra el cambio entre 1971 y 1998 se realizaron a partir de estimaciones, sino que para la CE y el PSI la evaluación del cambio se hizo a partir de una condición promedio del año de 1971 y las estimaciones de 1998.

Finalmente, la Tabla 6.5.1 muestra la comparación entre los años de 1971 y 1998, para los promedios de las estimaciones realizadas en cada profundidad (0-30 cm y 30-60 cm). En el caso del pH, los promedios de ambos años en las dos profundidades estudiadas son significativamente diferentes, mientras que para el PSI, en la profundidad de 30-60 cm no existe una diferencia significativa entre los años de 1971 y 1998.

Tabla 6.5.1**Comparación de las estimaciones de 1971 y 1998 dentro de la Zona de Estudio, mediante una prueba de t con un alfa del 5%.**

profundidad	n. de estimaciones (a)	t	p	
pH				
0-30 cm 1971 vs 1998	1428	11.92	<0.001	se rechaza H0 (b)
30-60 cm 1971 vs 1998	1428	3.61	<0.001	se rechaza H0
Na				
30-60 cm 1971 vs 1998	1428	0.83	0.41	se acepta H0
(a) número de estimaciones				
(b) H0 implica que los dos promedios son iguales				

7. DISCUSIONES.

La variabilidad espacial del suelo como componente del paisaje y su análisis cuantitativo, han tomado gran importancia en los últimos 30 años; esta variabilidad se considera como un continuo, y el propósito de su análisis, es el separar este continuo en unidades o clases, naturales o artificiales, que sean más homogéneas para aquellas propiedades del suelo bajo estudio; se espera que suelos dentro de un mismo ambiente y con características parecidas, tengan un comportamiento similar, por lo que es posible predecir y comprender los patrones en la distribución del suelo y en la evolución del paisaje; el conocer cómo se distribuyen los gradientes de las diferentes propiedades del suelo, también nos permite establecer en forma más precisa, las respuestas que éstos tengan a diferentes usos y técnicas de manejo. (Wilding y Drees 1983, Wilding 1985).

Dentro del estudio de la variabilidad espacial de cualquier atributo del suelo, se consideran tres pasos esenciales: (1) el diseño del muestreo, (2) la medición de las distintas propiedades, ya sea en campo o en laboratorio, y (3) los métodos de análisis utilizados para predecir valores en sitios no muestreados (Laslett y McBratney 1990).

Los muestreos realizados en 1971 y 1998 a partir de los cuales se obtuvieron las respectivas bases de datos, presentan características importantes que deben tomarse en cuenta. Como se mencionó anteriormente, el muestreo de 1971 incluyó tanto a la zona federal como a áreas circundantes; este muestreo fue "selectivo", aunque no se especifica el criterio utilizado; se asume sin embargo, que los sitios de muestreo se pudieron haber elegido buscando escoger las zonas más representativas, o bien pudo tratarse de un muestreo aleatorio; el número total de muestras por cada profundidad fue de 200, y los intervalos a las que éstas se tomaron son irregulares (SRH 1971). Todos estos factores afectan el análisis que posteriormente se hizo de los datos.

El diseño del muestro de suelos, debe buscar aportar la información requerida para que los objetivos planteados dentro de cualquier estudio se cumplan. Al revisar los objetivos del Estudio Agrológico Espacial del Ex-Lago de Texcoco (SRH 1971), encontramos que estos van encaminados a “determinar la posibilidad de mejorar los suelos del Lago para fines agrícolas”, “buscar la posibilidad de establecer y mantener una cubierta vegetal capaz de disminuir tolvaneras” y “recomendar soluciones prácticas para el uso y manejo adecuado de los suelos del Ex-Lago de Texcoco”. En general, se buscó relacionar los datos obtenidos con la información de la literatura, y con aquella generada hasta el momento para la zona del Ex-Lago. Uno de los resultados principales es el mapa de “Salinidad y Sodicidad”, en donde los datos del muestreo de suelos se clasifican de acuerdo al grado de afectación por salinidad y/o sodicidad, según la tabla elaborada en este mismo estudio, aunque el criterio utilizado no se especifica.

Bajo estas circunstancias, vale la pena cuestionarse sobre los siguientes aspectos:

- a. ¿Cuál fue el criterio para delimitar el área de muestreo?, ¿Por qué se incluyeron zonas agrícolas, de pastizales y sin vegetación dentro de una misma “unidad” de muestreo?
- b. ¿Cuál fue en sí el diseño del muestreo?, ¿Cómo se seleccionaron el número de observaciones y el intervalo entre éstas?
- c. ¿Cuál fue el criterio utilizado para determinar los intervalos de clases de grado de afectación por salinidad y/o sodicidad? ¿Cómo se delimitó el área correspondiente a cada una de ellas según el mapa de “Salinidad y Sodicidad”?

En cuanto al muestreo de 1998, es importante mencionar que los datos obtenidos se incluyen dentro de una primera fase de evaluación de las condiciones actuales dentro de la zona federal, por lo que no existe todavía ningún reporte al respecto. Sin embargo, también debemos tomar en cuenta distintas características de este muestreo, como el que éste fue sistemático (se

utilizó una rejilla ya existente con coordenadas X y Y definidas, en la que la distancia mínima entre puntos es de 500 m), que las observaciones sólo corresponden a la zona federal, y que se tomaron 223 muestras compuestas.

En primer lugar, el área de muestreo tanto de 1971 como de 1998, es uno de los factores que influyó en la delimitación de la Zona de Estudio, ya que si recordamos el concepto de "Cuasiestacionaridad" , las diferencias entre puntos de muestreo se asumen como estacionarias sólo dentro de áreas limitadas, lo cual permite utilizar métodos geoestadísticos para el análisis de variables espaciales (Webster 1997). Además, en este trabajo se buscó comparar la situación pasada y actual considerando principalmente la zona federal. Esta delimitación, tuvo como consecuencia que se contara con un menor número de observaciones para el análisis, especialmente para el año de 1971 (57 y 161 observaciones en 1971 y 1998 respectivamente). De esta forma, dentro de los estadísticos descriptivos para la Zona de Estudio, los valores de tendencia central, y de dispersión de los datos son distintos al total de datos muestreados (Tablas 6.1.1 y 6.2.2).

Otros factores que se deben considerar, son el diseño del muestreo y el intervalo entre observaciones para el año de 1971 y 1998. En el primer caso, si suponemos que el muestreo seleccionó puntos considerados como "representativos", el principal problema es que la manera de elegir los sitios de muestreo depende completamente de la persona que lo efectúa (Ortiz-Olguín 1996), por lo que se pierde objetividad, y se puede dar preferencia a una parte de la población a costa del resto (Webster y Oliver 1990). Por otra parte, si el muestreo fue aleatorio, esto quiere decir que cualquier punto dentro del área de muestreo tuvo las mismas posibilidades de ser seleccionado; no obstante, de esta forma se corre el riesgo de que los sitios de muestreo no se hayan distribuido uniformemente en toda el área, situación que sólo se corrige cuando se cuenta con un alto número de observaciones (Webster 1997). En cuanto al muestreo de 1998, al haber sido sistemático se aseguró una distribución uniforme de los sitios de muestreo dentro del área, aunque puede presentarse un problema

si la rejilla de muestreo fue colocada en forma paralela a algún gradiente en la distribución de sales del suelo, con lo cual quedaría sobrerrepresentado (Ortiz-Olguín 1996). Finalmente, los intervalos entre observaciones son importantes, ya que de estos depende que se detecte o no, la escala a la cual se da la variabilidad espacial.

Otro aspecto que influye en la variabilidad de los datos presentes, es el error que se pudiera haber presentado durante la medición de las variables en el laboratorio. Sin embargo, se considera que éste es sólo de 15 a 20% del error total, mientras que errores en el muestreo contribuyen con el restante 80-85% (Hauser 1973). Como se mencionó anteriormente, no se cuenta con la metodología específica que se siguió en el laboratorio para la medición de los datos de los muestreos de 1971 y 1998. Esto es importante, ya que por ejemplo, se ha reportado que el medir el pH en agua, implica un mayor error que medirlo en cloruro de calcio (CaCl_2); además siempre hay cierto error asociado a los instrumentos de medición que puede afectar los datos obtenidos (Laslett y McBratney 1990).

Los estadísticos descriptivos de los datos, nos ayudan a resumir y caracterizar la variación de las propiedades del suelo medidas. Generalmente, estas propiedades presentan distribuciones de frecuencia no normales. Esta no normalidad de los datos se debe principalmente a dos factores: los puntos extremos y el sesgo (Wilding y Drees 1983). Uno de los principales efectos que tuvo la delimitación de la Zona de Estudio, fue que en ésta se presentaron, tanto como para 1971 como para 1998, un menor número de puntos extremos. Este efecto es mayor para el año de 1971, ya que al no incluir puntos extremos localizados en zonas agrícolas y de pastizal, se pudieron homogenizar en cierta forma los datos. Sin embargo, los datos dentro de la Zona de Estudio continuaron presentando un sesgo similar al total de los datos muestreados en ambos años. Para contrarrestar el sesgo, se probaron distintas transformaciones, aunque la mejoría en este sentido no fue considerable para ninguna de las tres variables.

Los métodos geoestadísticos nos permiten analizar el comportamiento de la variación de una propiedad conforme la distancia entre puntos de muestreo aumenta. Para este propósito es que se elaboraron los semivariogramas que en este trabajo se presentan. Un factor muy importante a considerar, es sí la variación es isotrópica o anisotrópica, es decir, la variabilidad espacial que un atributo del suelo presente, puede o no, tener el mismo comportamiento en diferentes direcciones. Los semivariogramas que se graficaron en distintas direcciones (con ángulos de 0, 45, 90 y 135 grados respectivamente, figuras 6.3.1a a 6.3.f), parecen indicar que la semivarianza en todos éstos tiende a un valor similar, o por lo menos a un rango relativamente no muy amplio, lo cual se tomó como una indicación de isotropía; sin embargo, ésto no queda del todo claro, debido a que se contó con pocos pares de puntos en cada una de las direcciones graficadas, principalmente en lo que respecta a los datos de 1971.

Al graficar los semivariogramas en una sólo dirección, es cuando realmente se observa la influencia de todos los factores relacionados con la variabilidad espacial. Errores de muestreo o de medición de los datos quedan reflejados en la varianza nugget que se presente. También se observa como la semivarianza se incrementa conforme la distancia entre puntos aumenta. Si pensamos en como se calcula la semivarianza, podemos entender como se ve afectada por los factores antes mencionados: tomamos un par de puntos separados por una distancia "x", medimos la diferencia en el valor de ambas muestras y la elevamos al cuadrado; lo mismo se hace para todos los pares de puntos separados por esa distancia "x", el resultado de éstos se suma y se divide por el doble de número de puntos que se tengan (Clark 1979). Como se mencionó anteriormente, la autocovarianza de los datos se refiere a que puntos más cercanos espacialmente tienden a tener valores similares, mientras que puntos más alejados entre sí se parecen menos. Si hubiéramos considerado el total del área muestreada para el año 1971, hubiéramos obtenido un semivariograma que al estimar la semivarianza a una distancia, por ejemplo, de 1,000 m, hubiera incluido pares de puntos en zonas sin

vegetación y en zonas agrícolas, pero también se hubieran comparado pares de puntos incluidos en las dos zonas, por lo que la semivarianza final sería muy alta. Al restringirnos a la Zona de Estudio, el número de pares de puntos se reduce de manera importante, y de todas formas, se siguen incluyendo pares de puntos en áreas circundantes a la zona federal. Evidentemente, entre menos observaciones, la semivarianza es más "inestable", lo que quiere decir que diferencias importantes en algunos valores de los datos, con respecto al resto, pueden tener un efecto mayor. Es por esta razón que errores en el diseño de muestreo y/o en la medición de los datos pueden incrementar estas diferencias.

Cuando la distancia entre dos observaciones es cero, la semivarianza también es cero. Si observamos los semivariogramas para las tres variables del año 1971, en todos los casos la ordenada al origen tiene un valor diferente de cero. En la mayoría de los casos, esta varianza nugget es la que más contribuye a la semivarianza total, y por lo mismo se dice que los datos no presentan una estructuración, no es posible observar la correlación espacial existente. Para el pH, al excluir valores por debajo de 8.5, en cierta forma se le dió una estructura a las observaciones, por lo que posteriormente se pudo ajustar un modelo. Esto no fue posible para la CE y el PSI, lo cual pudiera relacionarse con la escala de las unidades que ambos tienen. El valor de pH mínimo considerado en los semivariogramas fue de 8.5, y el máximo tomando en cuenta todas las profundidades fue el de 10.6; los valores máximos de la CE se encuentran en un intervalo de 65.0 a 140.0 para las cuatro profundidades estudiadas, mientras que los valores mínimos van de 0.6 a 3.0; el PSI tiene valores mínimos que van de 2 a 10, y valores máximos entre 96 y 100. Cuando para el pH se excluyeron los valores por debajo de 8.5, éstos correspondieron a sólo 4 observaciones fuera de la zona federal, las cuales contribuían con casi la mitad de la varianza. Sin embargo, la dispersión de los datos para la CE y el PSI es mucho mayor, aún excluyendo los datos fuera de la zona federal.

Los semivariogramas de las tres variables del año 1998, también presentan una varianza nugget. Estos semivariogramas ejemplifican dos aspectos

importantes que también deben ser considerados. En primer lugar, a diferencia del muestreo de 1971, las observaciones se distribuyeron de manera uniforme exclusivamente dentro de la zona federal; se cuenta con suficientes datos, pero la distancia mínima entre observaciones fue, a excepción de pocos casos, de 500 m. Esta distancia mínima de muestreo, posiblemente no corresponde a la escala a la cual se da la variación espacial, por lo que los valores de la semivarianza son más altos de los que podría esperarse si la distancia mínima entre puntos fuera menor. En segundo lugar, a las tres variables en ambas profundidades estudiadas, se les ajustó un modelo. Al observar los semivariogramas de pH, CE y PSI del año de 1998 la pregunta que surge es ¿cuál es la distancia máxima en la cual los datos todavía se relacionan espacialmente? Por ejemplo, en los semivariogramas de pH y PSI en los primeros 30 cm de profundidad, no se aprecia que la semivarianza deje de incrementarse conforme la distancia aumente; en cambio, la semivarianza del pH y el PSI para la profundidad de 30-60 cm, no se incrementa después de los 5000 m (Fig. 6.3.2a y Fig. 6.3.2f). Realmente en los primeros 30 cm, no es claro hasta qué distancia podríamos considerar que los datos presentan una correlación espacial, aunque es de suponer que en algún punto, al aumentar la distancia, los datos ya no estarán correlacionados.

De acuerdo a la literatura, la semivarianza parece incrementarse indefinidamente conforme el tamaño del área de estudio aumente; la semivarianza estimada puede estar sujeta a un mayor o menor error, dependiendo del número de pares de puntos que se comparen a cada intervalo de distancia; se sugiere graficar el semivariograma aproximadamente hasta un quinto de la distancia máxima entre puntos de muestreo, aunque esto depende de las características del área bajo estudio; muchos semivariogramas se comportan de forma lineal en intervalos de distancia cortos, y la estimación de las semivarianzas, está sujeta a un mayor error conforme la distancia entre puntos aumenta; además, cuando un semivariograma es utilizado para hacer

interpolaciones mediante Kriging, generalmente, sólo se consideran distancias relativamente cortas (Webster 1993).

De acuerdo a mi experiencia durante un muestreo realizado en el mes de marzo de 1999 dentro de la zona federal, a distancias tan cortas como 10 m, se pueden encontrar diferentes situaciones, como un área sin vegetación y otra cubierta por pasto salado, lo cual indicaría diferentes grados de salinización del suelo. Al graficar los semivariogramas, los intervalos de distancia se escogieron a fin de incluir el suficiente número de pares en cada uno de éstos (cada 500 m). La mayor distancia a la cual se ajustó un modelo fue de 5000 m, y en general el porcentaje de variabilidad explicado por el modelo lineal fue, o el más alto, o se encontraba entre los más altos con respecto a los otros modelos (Tabla 6.3.1); además, cuando éste no tenía el valor más alto, debemos de tener en cuenta que se debía principalmente a la variabilidad entre puntos separados por más de 5000 m, que al considerarlos, otros modelos se ajustaron mejor. Sin embargo, las distancias que realmente nos interesan para la interpolación de datos mediante Kriging, son las más cortas.

Otro factor muy importante, es el hecho de que a cada profundidad se le ajustó un mismo modelo para las tres variables, debido a que se considera que éstas están influenciadas por los mismos procesos. Si observamos los semivariogramas de la CE para el año de 1998 (Fig. 6.3.2d), podemos ver que la semivarianza tiene una forma parecida a una "campana". Para ambas profundidades, el modelo lineal fue el que se ajustó mejor a una distancia no mayor a 5000 m, e incluso, el porcentaje de variabilidad explicado por el modelo lineal fue el mayor, bajo cualquier circunstancia, al compararlo con otros modelos (Tabla 6.3.1). La forma que los semivariogramas presenten se relaciona con la variabilidad espacial que los datos tienen. Esta variabilidad espacial, sin contar errores por el muestreo o por mediciones, son el reflejo de los patrones de distribución de la salinidad. Aunque en este caso no podemos decir cual es el significado exacto de la forma de los semivariogramas estimados, principalmente conforme la distancia entre puntos aumenta, sí debemos prestar atención a una

característica presente en los mismos: la forma de los semivariogramas de pH y PSI en los primeros 30 cm es similar, patrón que se repite en la profundidad de 30-60 cm (Fig. 6.3.2a y Fig. 6.3.2f). Es de esperar, que estas dos variables tengan un comportamiento parecido, ya que existe una clara relación entre el pH y el sodio, cuando la concentración de sodio aumenta el pH también lo hace, por lo que los valores de ambas variables pueden presentar una distribución espacial similar. En el caso de la CE, la forma del semivariograma en las dos profundidades es diferente al del pH y PSI. Su significado puede ser más difícil de interpretar, ya que el valor de la CE depende de la concentración de sodio con respecto al tipo y concentración de las distintas sales neutras presentes.

Una vez graficados los semivariogramas, obtenemos las ponderaciones necesarias para realizar estimaciones mediante Kriging. Si no se hubiera presentado la varianza nugget, el valor de las observaciones y de las estimaciones para un mismo punto sería equivalente. No obstante, una de las principales ventajas de los métodos geoestadísticos es que al momento de interpolar, los errores, ya sea de muestreo o por medición en laboratorio, son considerados, por lo cual podemos obtener la varianza de las estimaciones, y a partir de ésta, el error estándar.

La salinización del suelo también es un proceso dinámico en tiempo, presentándose variaciones importantes entre la temporada de lluvias y la de secas. Al observar los mapas de las estimaciones de pH de las cuatro profundidades de 1971, podemos notar dos patrones en el gradiente de los valores; en primer lugar, en todas las profundidades, los valores aumentan hacia el Oeste; por otro lado, el área de valores más altos disminuye conforme la profundidad aumenta (figuras 6.4a, 6.4c, 6.4e y 6.4g). Desafortunadamente, aunque sabemos que el muestreo de 1971 se realizó durante la temporada de secas, el Estudio Agrológico del Ex-Lago del mismo año, no reporta con exactitud las fechas de este muestreo. Esto es de suma importancia, ya que como se recordará, entre mayor sea la evapotranspiración con respecto a la precipitación, las sales tenderán a acumularse en mayor cantidad hacia la superficie. Sin

embargo, por lo anterior, podemos suponer que la disminución del área de valores más altos de pH conforme la profundidad aumenta, se relaciona con el hecho de que en el momento del muestreo, la evaporación causó un ascenso de las sales hacia las primeras profundidades. Para la CE, la única profundidad que se interpoló mediante Kriging fue la de 60-120 cm (Fig. 6.4m). En lo que corresponde únicamente a la zona federal, realmente no se observa un gradiente, clasificándose toda el área dentro de la clase de 31-50 dSm^{-1} . Fuera de la zona federal, se encuentran los valores más bajos hacia el Noreste. Los valores PSI de la profundidad 30-60 cm del año 1971, dentro de la zona federal, se encuentran en su mayoría dentro de las clases de 81-90 y 91-100, y al igual que para la CE, los valores más bajos se encuentran fuera de la zona federal, hacia el Noreste (Fig. 6.4s).

Estas diferencias en la distribución de los gradientes de pH, CE y PSI, son consecuencia de las condiciones presentes en el área del Ex-Lago. Además del régimen de evapotranspiración, debemos tener en cuenta las depositaciones de sedimentos lacustres, antiguos y recientes, y las características del manto freático en la zona. El tipo de sales presentes y su origen, se ven reflejados en la distribución de estas tres variables. Debido a que no se cuenta con la información específica de las diferencias en el área de Ex-Lago, en cuanto a los procesos antes mencionados, debemos considerar factores indicadores de los mismos. Un ejemplo sería la vegetación, ya que es de esperarse, que los valores más bajos en las tres variables, se encuentren asociados a la presencia de comunidades vegetales.

Al revisar el mapa de vegetación del Estudio Agrológico Espacial del Ex-Lago de 1971 (SRH 1971), observamos que la parte de la Zona de Estudio correspondiente a la zona federal, presentaba algunos manchones, muy dispersos en el Sur, de comunidades de *Suaeda sp.* La única variable en la que se observa cierta relación con la presencia de estas comunidades es la del pH. Además, en toda la Zona de Estudio, el mapa de vegetación antes mencionado indica la presencia de *Distichlis spicata* en la mayor parte del extremo Este

(principalmente hacia el Noreste), encontrándose también una pequeña comunidad de *Eragrostis obtusiflora* hacia el Sureste. Los valores más bajos de las tres variables en todas las profundidades que se interpolaron mediante Kriging, se encuentran localizados precisamente hacia el extremo Noreste de la Zona de Estudio. Sin embargo, es importante aclarar, que para el pH esta área con valores más bajos hacia el Noreste, no se ve reflejada en la profundidad de 0-30 cm, lo cual podría indicar que efectivamente, las sales en el momento del muestreo se encontraban principalmente concentradas en éstos primeros 30 cm, debido al régimen de evapotranspiración; aún así, podemos suponer que es en esta área en donde las condiciones para la vegetación eran más favorables.

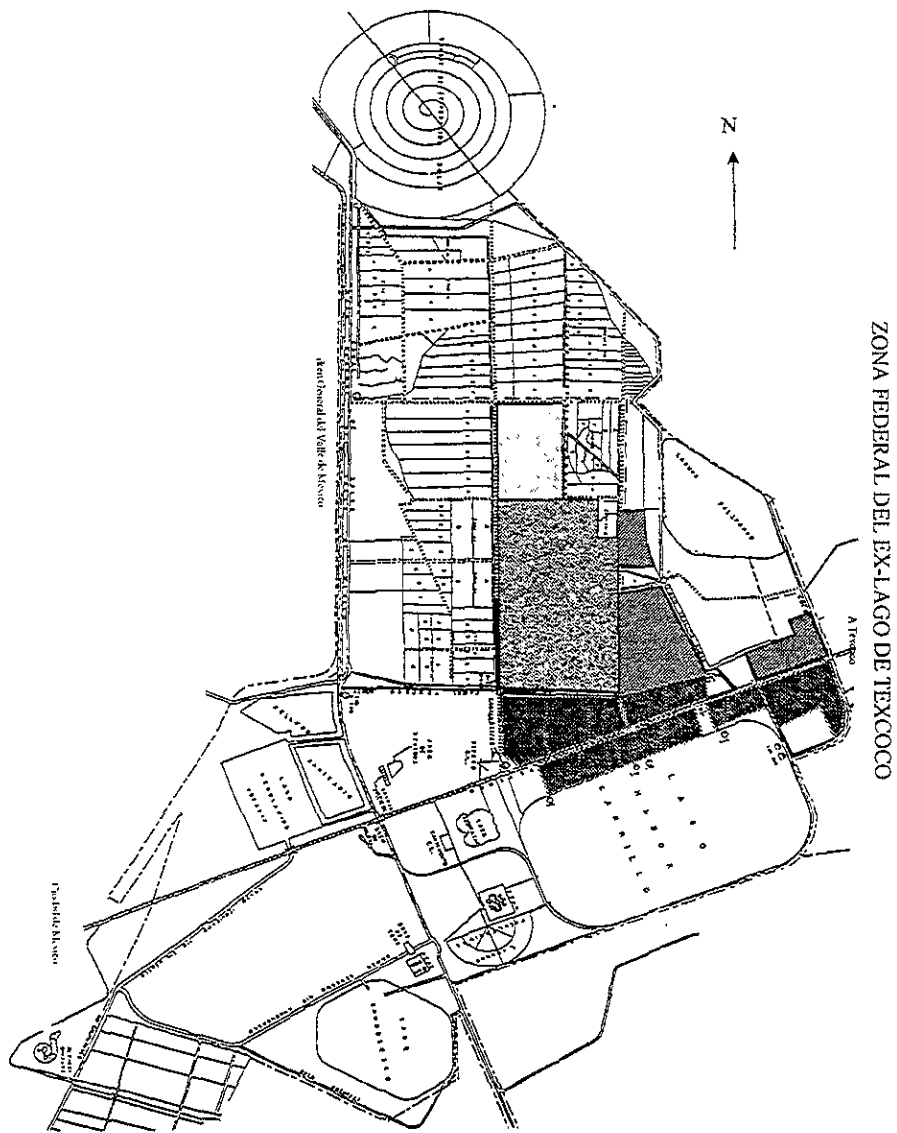
De acuerdo al Estudio Agrológico del Ex-Lago realizado en 1971 (SRH 1971), durante el trabajo de campo realizado, se observaron áreas inundadas con aguas negras, en donde los suelos no presentaron muchos problemas de sales solubles y de sodio, lo cual permitió que se estableciera una vegetación menos tolerante a condiciones de salinidad. Al observar los mapas que se realizaron para el estudio del año de 1971, en éstos se ubican áreas inundadas, aunque sólo una pequeña parte de éstas se localiza dentro de la Zona de Estudio; sin embargo, estos cuerpos de agua también se encuentran hacia el Este.

Para las estimaciones realizadas del año de 1998, se tiene la ventaja de contar con la distribución espacial de las tres variables en ambas profundidades. El pH, la CE y el PSI indican que el área con valores más bajos, localizados hacia el Sur de la Zona de Estudio, es mayor en los primeros 30 cm (clases: pH 8.6-8.9, CE 7-16, y PSI 40-50, figuras 6.41, 6.4k, 6.4o, 6.4q, 6.4u y 6.4w). No obstante, la CE en la profundidad de 0-30 cm, presenta una mayor área correspondiente a los valores más altos que la profundidad de 30-60 cm, localizándose en ambos casos hacia el Oeste (clases 51-150, 151-200 y >200). Es interesante notar que las tres variables tienen una distribución similar de acuerdo a cada profundidad, en particular el pH y el PSI. También es muy importante recordar que el muestreo de 1998 se realizó en mayo, mes de inicio de la temporada de lluvias en la zona del Ex-Lago.

Según el mapa de vegetación del Estudio Agrológico de 1996 (CNA 1996), y el mapa "Avances del programa de Forestación de la zona federal del Ex-Lago de Texcoco" (CNA-UNAM 1997), dentro de la zona federal la vegetación, principalmente de pastizal, se encuentra localizada en el Sureste y en algunas áreas hacia el Noreste. Fuera de la zona federal, en el extremo Noreste de la Zona de Estudio, se encuentran también áreas de pastizal y algunas zonas agrícolas. Por lo tanto, dado que el muestreo de 1998 se restringió a la zona federal, es importante tener en cuenta que las interpolaciones que se hicieron fuera de ésta, no deben ser consideradas, ya que no corresponden a las condiciones actuales del suelo.

Otra condición muy importante que influye en los valores de pH, CE y PSI, es el manejo que la zona federal ha tenido en los últimos años. De acuerdo al mapa de avances del programa de forestación, gran parte de la vegetación presente coincide con los sitios en donde se ha introducido subdrenaje (CNA-UNAM 1997).

La figura 7.1 muestra la localización del subdrenaje, así como las fechas en las que éste fue introducido; de esta forma, es posible relacionar la presencia de este subdrenaje con el gradiente de las tres variables dentro de la Zona de Estudio. Para las tres variables, en ambas profundidades, mientras más tiempo tiene el subdrenaje, los valores son más bajos, mismos que como se mencionó anteriormente, se encuentran hacia la parte Sureste de la Zona de Estudio. Sin embargo, una considerable área al sur de la Laguna Xalpango, no cuenta con subdrenaje.







- 
 Zona con subdrenaje construido de 1985-1989
- 
 Zona con subdrenaje construido de 1992-1993
- 
 Zona con subdrenaje construido en 1996
- 
 Zona con subdrenaje construido en 1997 y 1998

Fig. 7.1 Localización de las zonas con subdrenaje parcelario (CNA 1998).

la zona federal, han disminuido; de la CE y del PSI, podemos decir que hacia el Sureste en el primer caso, y hacia el Sur y parte del Noreste para el PSI, han disminuido con respecto a una condición promedio en 1971. En la profundidad de 30-60 cm, el área de disminución del pH y de la CE es menor que para los primeros 30 cm, aunque para el PSI es muy similar; en los tres casos, el área de disminución se encuentra hacia el Sur.

Es a partir de toda la información anteriormente mencionada, que surgen varias preguntas:

1. ¿Cuál es en sí el efecto del diseño de los muestreos de 1971 y 1998? ¿por qué la distribución de los datos no es normal?, ¿hasta que punto puede relacionarse la no-normalidad de los datos con estos errores? La importancia del diseño de muestreo radica, en que de acuerdo a éste, y a los errores en las mediciones de las tres variables, será la precisión no sólo de los datos, sino de las estimaciones que a partir de éstos se realicen.
2. Si no se hubieran presentado errores de muestreo y de medición ¿Cuál sería la correlación espacial existente?, ¿A qué escala se presentaría?, ¿Cuál sería el significado de los modelos ajustados a esta correlación?

Estas preguntas pueden contestarse si comenzamos por realizar un muestreo lo más preciso posible. En primer lugar, debemos de considerar la delimitación del área de estudio, ¿qué extensión va a tener?, ¿hasta dónde se puede considerar que es una "unidad" de muestreo homogénea?, datos de zonas sin vegetación, y datos de zonas cubiertas por pastizal y con subdrenaje, ¿pueden ser considerados como una misma población? Por otra parte, también es importante determinar el número de observaciones que se van a realizar y las distancias entre éstas. Una opción para conocer a que escala se da la variabilidad espacial es mediante un muestreo anidado, el cual se basa en la idea de que la población puede dividirse en clases a diferentes niveles para formar una jerarquía; por ejemplo, el nivel principal son todos aquellos puntos separados

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

A partir de este trabajo se puede concluir que:

1. La distribución espacial del pH, CE y PSI, es diferente de acuerdo a la profundidad y año en que se realizaron los muestreos. En el año de 1971 se observa que los valores de las tres variables antes mencionadas, aumentan en dirección Oeste dentro de la zona federal, además de que el área con valores más bajos es mayor conforme la profundidad aumenta. En el año de 1998, los valores de pH, CE y PSI más bajos se encuentran hacia la parte Sur de la zona federal, y el área con valores más bajos disminuye conforme la profundidad es mayor.

2. Aunque debe considerarse que la comparación entre 1971 y 1998 se realizó a partir de estimaciones de dos bases de datos que no fueron tomados en la misma época del año, es posible apreciar que los valores de las tres variables estudiadas disminuyen en 1998 con respecto 1971, principalmente hacia la parte Sur de la zona federal.

Mediante las técnicas de manejo utilizadas, la zona federal del Ex-lago de Texcoco ha mejorado las condiciones edáficas en la parte Sur, lo cual se ve reflejado en la vegetación presente (Cruickshank-García 1995). Es importante establecer criterios ecológicos que permitan clasificar la distribución espacial de los valores de las variables estudiadas.

A pesar de que los estudios realizados en la zona han aportado importante información respecto a las condiciones del Ex-Lago, es necesario considerar los siguientes aspectos:

a) Los objetivos que se planteen deben ser lo más específicos posibles, con lo cual se podrá emplear un diseño metodológico que permita el cumplimiento de los mismos.

b) El diseño de muestreo utilizado, debe considerar la variabilidad espacial que se presenta en la zona, en cuanto a las variables indicadoras de salinidad. Este diseño de muestreo es también consecuencia de los objetivos que se planteen, por lo que de su precisión dependerá hasta que punto se aporta la información necesaria para alcanzar él o los propósitos que se tengan.

c) Para poder considerar la escala a la cual se da la variabilidad espacial de la salinización en la zona, es necesario que se planteen estrategias que consideren diferentes distancias de muestreo, como es el caso del muestreo anidado mencionado anteriormente. Un muestreo aleatorio tiene la desventaja de que si los sitios de muestreo no se distribuyen uniformemente, esta situación sólo se corrige con alto número de observaciones. En un muestreo sistemático, aunque la distribución de las observaciones es uniforme, puede estar sobrerrepresentando un gradiente de salinidad, además de que se tendrían que tomar en cuenta intervalos de muestreo relativamente cortos, con lo cual el número de muestras necesarias, se vería incrementado, e implicaría un esfuerzo y costo desmesurado.

d) En este sentido, basado en el punto anterior, es importante definir zonas relativamente homogéneas dentro de la zona federal del Ex-Lago de Texcoco, que reflejen las condiciones ambientales presentes, y/o que consideren las distintas prácticas de manejo empleadas. De acuerdo a la delimitación que se realice, y a los criterios utilizados en la misma, será posible clasificar zonas para las cuales se haga un diseño de muestreo específico.

e) Para evitar en la mayor forma posible errores en los datos, es necesario que los métodos de laboratorio utilizados se estandaricen, y que las mediciones que se realicen sean calibradas.

f) Los métodos de análisis de datos siempre deben ser reportados con el mayor detalle posible. Es importante considerar métodos cuantitativos, que permitan una comparación más precisa de las estimaciones que se realicen.

e) Es importante conocer los procesos de salinización y su comportamiento en la zona federal del Ex-Lago. De esta forma, se podrá dar un contexto más específico a la información que se aporte en los diferentes estudios agrológicos.

f) Es fundamental, que si uno de los objetivos principales dentro del Proyecto Lago de Texcoco, es el establecimiento de una cubierta vegetal, se defina en forma específica cómo ésta se ve afectada por el proceso de salinización. La vegetación es entonces, el criterio más importante para poder evaluar los procesos y los cambios que se presenten en la zona, en particular, aquellos relacionados con las distintas técnicas de manejo utilizadas.

g) De acuerdo a la literatura, y a los mapas de cambio presentados en este trabajo, las condiciones edáficas en la zona federal del Ex-Lago han mejorado hacia la parte Sur. Sin embargo, es necesario determinar hasta qué punto, y qué ha sucedido en las zonas en donde no se ha reportado un cambio o las condiciones hayan empeorado.

h) Es necesario que la información que se genere en la zona del Ex-Lago se integre, por ejemplo, dentro de un Sistema de Información Geográfica. Tanto la información que ya se tenga sobre la zona, como aquella que se aporte en futuros estudios deben ser consideradas, ya que ambas son importantes para poder evaluar y monitorear las condiciones de salinización en la zona federal, así como

los cambios en las mismas; además es una herramienta importante para planear de manera óptima las actividades futuras.

i) En particular, en este trabajo, no se pudieron realizar análisis de otros años, ya sea porque las bases de datos no reportaban las coordenadas de los sitios de muestreo, o los datos no estaban disponibles. Si además se hubiera contado con la información específica sobre los métodos de análisis utilizados, las estimaciones a partir de éstos se podrían comparar con aquellas realizadas mediante métodos geoestadísticos.

9. LITERATURA CITADA.

- 📖 ALCOCER, J., y Williams, W.D., 1996, Historical and recent changes in Lake Texcoco, a saline lake in Mexico: *International Journal of Salt Lake Research*, núm 5, p. 45-61.
- 📖 ARONSON, J., y Le Floch, E., 1997, Restoration Ecology of salt-affected, arid and semiarid lands, *in* Choukr-Allah, Redouane, ed., *Halophytes and Biosaline Agriculture*, Marcel Dekker, Inc., Nueva York, p.55-71.
- 📖 BAILEY, T.C., y Gatrell, A.C., 1995, *Interactive Spatial Data Analysis*, Longman Scientific & Technical, Nueva York, 410 p.
- 📖 BARROW, Christopher J., 1994, *Land Degradation. Development and Breakdown of Terrestrial Environments*, Cambridge University Press, Cambridge, 193 p.
- 📖 BRADSHAW, Anthony D., 1997, What do we mean by Restoration? *in* Ubranska, K.M., Webb, N.R., y Edwards, P.J., ed., *Restoration Ecology and Sustainable Development*, Cambridge Press, Cambridge, p. 8-14.
- 📖 BRADY, N.C., y Weil, R.R., 1996, *The Nature and Properties of Soils*, Prentice Hall, Londres, 326 p.
- 📖 BURROUGH, P.A., 1987, Spatial aspects of ecological data, *in* Jongman, R.H.G., ter Braak, C.J.F, y van Tongeren, O.F.R, ed., *Data Analysis in Community and Landscape Ecology*, Pudoc Wageningen, p. 213-251.
- 📖 CLARK, Isobel, 1979, *Practical Geoestistics*, Applied Science Publishers LTD, Londres, 129 p.
- 📖 COMISION NACIONAL DEL AGUA, 1996, *Estudio Agrológico Detallado de 3,000 hectáreas en la zona federal del Ex-Lago de Texcoco*, Departamento del Distrito Federal, Proyecto Lago de Texcoco, Ciudad de México, 129 p.
- 📖 CRUICKSHANK-GARCIA, Gerardo, 1995, *Proyecto del Lago de Texcoco. Rescate Hidrológico*, Zepeda-Reyes, G.A., ed., Comisión Nacional del Agua, Ciudad de México, 111 p.

- 📖 CHOUKR-ALLAH, Redouane, 1997, The potential of Halophytes in the development and rehabilitation of arid and semi-arid zones, *in* Choukr-Allah, Redouane, ed., Halophytes and Biosaline Agriculture, Marcel Dekker, Inc., Nueva York, p.3-13.
- 📖 FAO, ISRIC, e ISSS, 1994, World Reference Base for Soil Resources (borrador), Spaagaren O.C., ed., International Society of Soil Science, International Soil Reference and Information Centre, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Wageningen/Roma, 160 p.
- 📖 GORHAM, John, 1997, Mechanisms of salt-tolerance of Halophytes, *in* Choukr-Allah, Redouane, ed., Halophytes and Biosaline Agriculture, Marcel Dekker, Inc., Nueva York, p.31-53.
- 📖 GUITJENS, J.C., 1996, Spatial and temporal variabilities in salinity, *in* Tanji, Kenneth K., ed., Agricultural Salinity Assessment and Management, American Society of Civil Engineers, Nueva York, p. 327-348.
- 📖 GUTIERREZ-CASTORENA, Ma. del Carmen, Los suelos de la ribera oriental del Ex-Lago de Texcoco, Colegio de Postgraduados, Tesis Doctoral, Montecillo, México, 158 p.
- 📖 HAUSER, G.F., 1973, Errors in soil test data and their prevention, Food and Agricultural Organization, Soils Bulletin, The calibration of soil test for fertilizer recommendations, núm. 18, Roma, p. 5-8.
- 📖 JURINAK, J.J., 1996, The chemistry of salt affected soils and waters, *in* Tanji, Kenneth K., ed., Agricultural Salinity Assessment and Management, American Society of Civil Engineers, Nueva York, p. 42-63.
- 📖 LASLETT, G.M., y Mc Bratney, A.B., 1990, Estimation and implications of instrumental dirft, random measurement and nugget variance of soil attributes -a case study for soil pH: *Journal of Soil Science*, núm 3, p. 451-472.
- 📖 LÄUCHLI, A., y Epstein, E., 1996, Plant responses to saline and sodic conditions, *in* Tanji, Kenneth K., ed., Agricultural Salinity Assessment and Management, American Society of Civil Engineers, Nueva York, p. 42-63.
- 📖 MILLE , W.R., y Donahue, L.R., 1995, Soils in our Environment, Prentice Hall, Nueva York, 320 p.

- 📖 OLDEMAN, L.R., 1994, The global extent of soil degradation, *in* Greenland, D.J. y Szabolcs, István., ed., Soil Resilience and Sustainable Land Use, Cab International, Bristol, p. 99-117.
- 📖 ORTIZ-OLGUIN, M., 1992, Distribución y Extensión de los suelos afectados por sales en México y el mundo, Universidad Autónoma de Chapingo, Publicaciones del Departamento de Suelos, Chapingo, México, 36 p.
- 📖 ORTIZ-OLGUIN, M., 1996, El muestreo de suelos salinos y sódicos, Universidad Autónoma de Chapingo, Publicaciones del Departamento de Suelos, Chapingo, México, 27 p.
- 📖 PARKER, V.T., y Pickett, S.T.A., 1997, Restoration as an ecosystem process: implications of the modern ecological paradigm, *in* Ubranska, K.M., Webb, N.R., y Edwards, P.J., ed., Restoration Ecology and Sustainable Development, Cambridge University press, Cambridge, p. 7-31.
- 📖 RHOADES, J.D., 1996, Overview: Diagnosis of salinity problems and selection of control practices, *in* Tanji, Kenneth K., ed., Agricultural Salinity Assessment and Management, American Society of Civil Engineers, Nueva York, p. 18-41.
- 📖 RICHARDS, L.A., Allison, L.E., Brown, J.W., Hayward, L.A., 1973, Diagnóstico y Rehabilitación de Suelos Salinos y Sódicos, Richards, L.A., ed., Limusa, Ciudad de México, 172 p.
- 📖 SECRETARIA DE AGRICULTURA Y RECURSOS HIDRAULICOS, 1981, Caracterización de la afectación salina de los suelos del Ex-lago de Texcoco, Reporte no. 1, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Comisión del Lago de Texcoco, Programa Agrícola, Departamento de Salinidad y Drenaje, Ciudad de México, 47 p.
- 📖 SECRETARIA DE AGRICULTURA Y RECURSOS HIDRAULICOS, 1981, Caracterización de la afectación salina de los suelos del Ex-lago de Texcoco, Reporte no. 2, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Comisión del Lago de Texcoco, Programa Agrícola, Departamento de Salinidad y Drenaje, Ciudad de México, 68 p.

- 📖 SECRETARIA DE AGRICULTURA Y RECURSOS HIDRAULICOS, 1981, Estudio Agrológico Detallado del Ex-Lago de Texcoco, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Comisión del Lago de Texcoco, programa Agrícola, Departamento de Salinidad y Drenaje, Ciudad de México, 135 p.
- 📖 SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS, 1971, Estudio Agrológico Espacial del Ex-Lago de Texcoco, Estado de México, Secretaría de Recursos Hidráulicos, Dirección General de Irrigación y Control de Ríos, Dirección Agrícola, Serie de Estudios, núm. 2, Ciudad de México, 145 p.
- 📖 SHALHEVET, J., 1993, Plants under salt and water stress, *in* Fowden, L., Mansfield, T., y Stoddart, J., ed., Plant Adaptation to Environmental Stress, Science Publishers, Gran Bretaña, p. 133-154.
- 📖 SZABOLCS, István, 1979, Review of Research on Salt-affected Soils, United Nations Educational Scientific and Culture Organization, Paris, 137 p.
- 📖 SZABOLCS, István, 1989, Salt-affected Soils, C.R.C. Press, Inc., Boca Raton, Florida, 274 p.
- 📖 UBRANSKA, K.M., Webb, N.R., y Edwards, P.J., 1997, Why Restoration?, *in* Ubranska, K.M., Webb, N.R., y Edwards, P.J., ed., Restoration Ecology and Sustainable Development, Cambridge University press, Cambridge, p. 3-7.
- 📖 VARGAS-HERNANDEZ, M., 1991, Aplicaciones geoestadísticas a la ciencia del suelo. Variabilidad espacial: aspectos prácticos, Universidad Autónoma de Chapingo, Departamento de Suelos, Area de Informática, Monografías y manuales en estadística y computación aplicadas, Chapingo, México, 36 p.
- 📖 WEBSTER, R., y Oliver, M.A., 1990, Statistical Methods in Soils and Land Resource Survey, Oxford University Press, Oxford, 316 p.
- 📖 WEBSTER, R., y Oliver, M.A., 1991, Sample adequately to estimate variograms of soil properties: Journal of Soil Science, v. 43, núm. 92, p. 177-192.

- 📖 WEBSTER, R., y Oliver, M.A., 1991, How geostatistics can help you: Soil Use and Management, v.7, núm. 4, p. 206-217.
- 📖 WEBSTER, Richard, 1993, Dealing with spatial variation, *in* Soil Monitoring, Birkhäuser Verlag Basel, p.295-307.
- 📖 WEBSTER, Richard, 1997, Notas del curso "Advanced Geoestistics", 120 p. (inédita).
- 📖 WILDING, L.P., y Dress, L.R., 1983, Spatial variability and pedology, *in* Wilding, L.P., Smeck, E., y Hall, G.F., ed., Pedogenesis and Soil Taxonomy I. Concepts and Interactions, Elsevier Science Publishers Co., Amsterdam, p.83-116.
- 📖 WILDING, L.P., 1985, Spatial variability: its documentation, accomodation and implication to soil surveys, *in* Pudoc Wageninge, I.S.S.S, y S.S.S.A, Soil Spatial Variability Workshop, Las Vegas, 1984, p. 166-194.
- 📖 ZARATE-ZARATE, R., 1991, Definición e impacto de la degradación de la tierra, Universidad Autónoma de Chapingo, Folleto del Departamento de Suelos, Chapingo, México, 41 p.

Mapas (no incluidos en los Estudios Agrológicos).

- 📖 E14A29 1:50, 000, "Cuautitlán", INEGI.
- 📖 E14A39 1:50, 000, "Ciudad de México", INEGI.
- 📖 E14B21 1: 50, 000, "Texcoco", INEGI.
- 📖 E14B31 1: 50, 000, "Chalco", INEGI.
- 📖 Estudio Topográfico en la zona federal del Ex-Lago de Texcoco 1: 10, 000, SMARNAP, CNA, Gerencia Lago de Texcoco, 1996.
- 📖 Avances del Programa de Forestación zona federal del Ex-Lago de Texcoco, escala aproximada 1:20, 000, SMARNAP, CNA, Gerencia Lago de Texcoco, 1996.

Programas de cómputo utilizados en el análisis de los datos.

☐ Genstat 5 version 4.1 para windows, 1998, Rothamsted Experimental Station, Inglaterra.

☐ Ilwis 2.1 para windows, 1997, ITC, Holanda.

Nota: los datos del muestreo de 1998 fueron proporcionados por la gerencia del Lago de Texcoco (CNA).

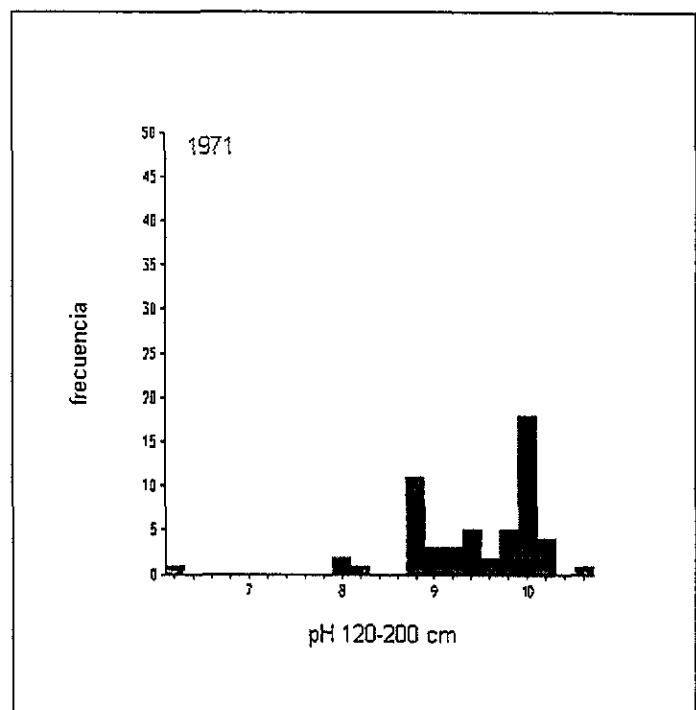
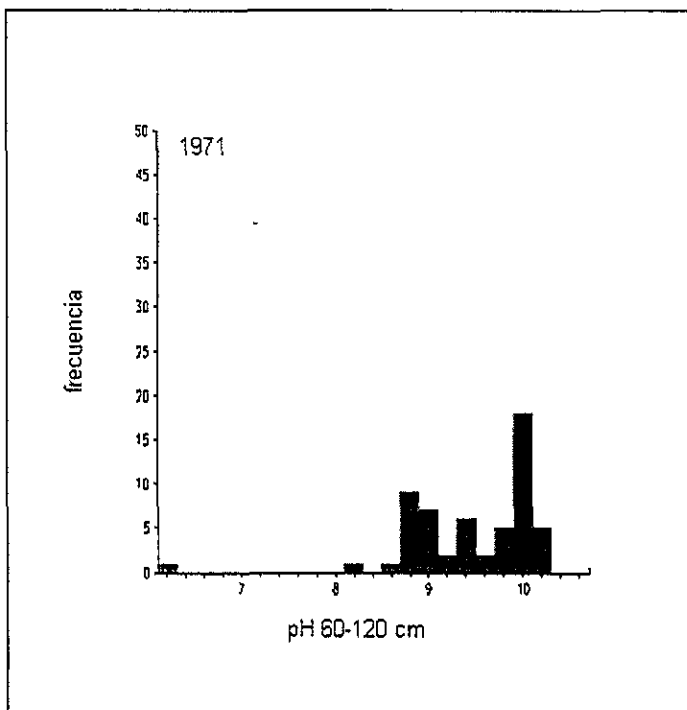
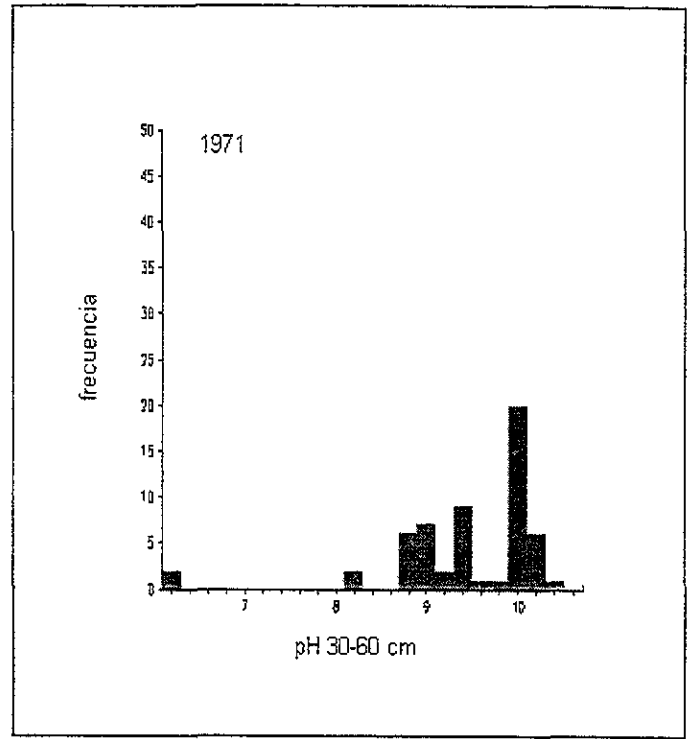
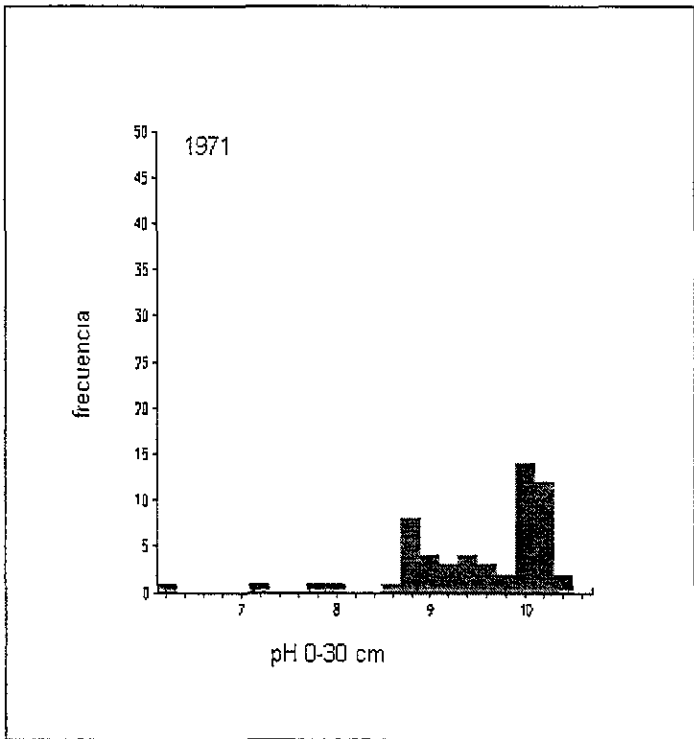


Fig. 6.2.2a: Histogramas de pH para los datos localizados dentro de la Zona de Estudio (año 1971).

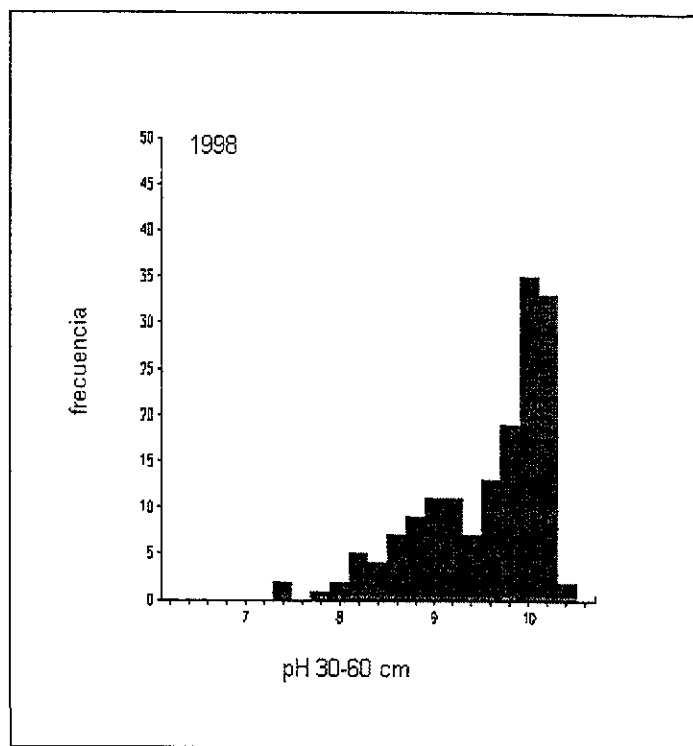
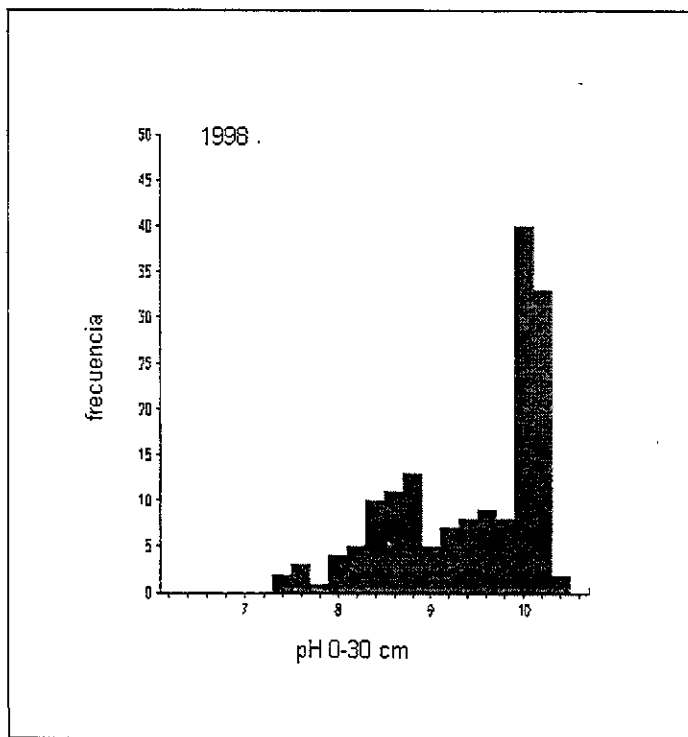


Fig. 6.2.2b: Histogramas de pH para los datos localizados dentro de la Zona de Estudio (año 1998).

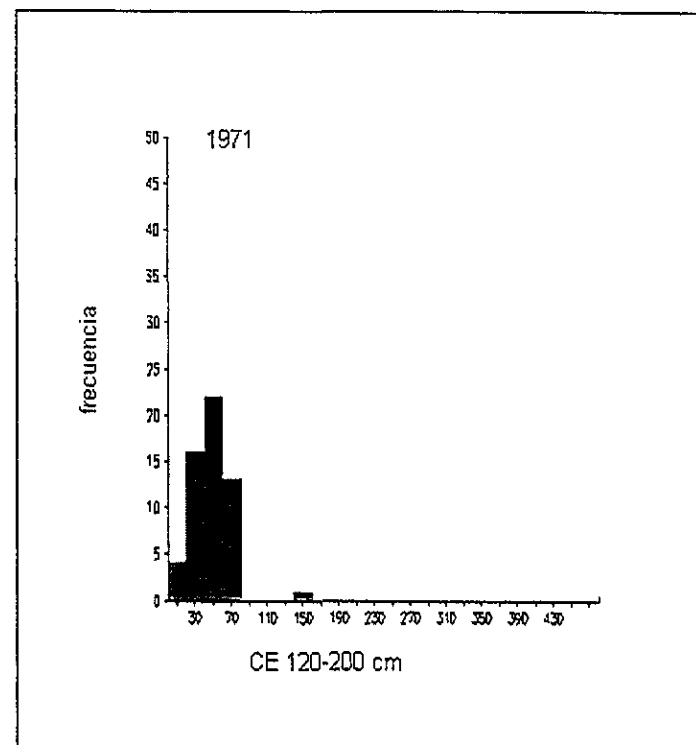
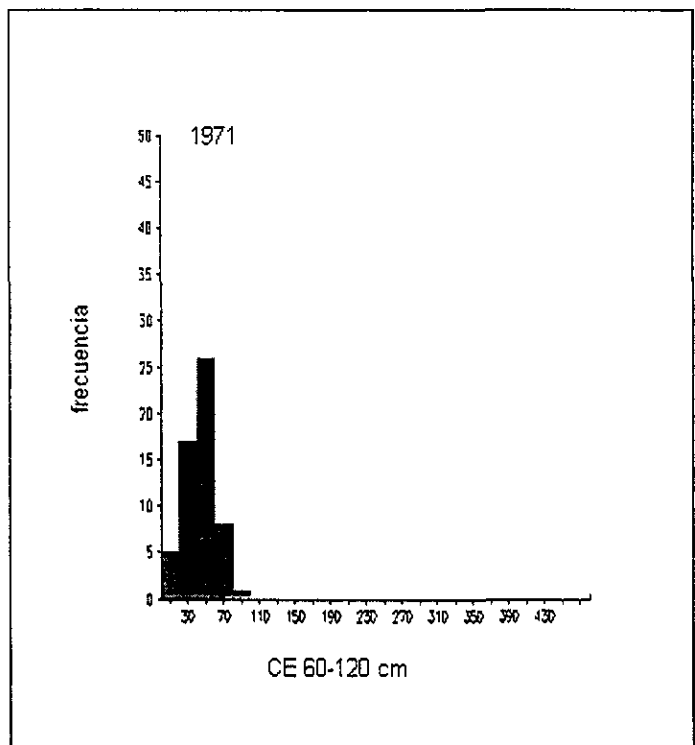
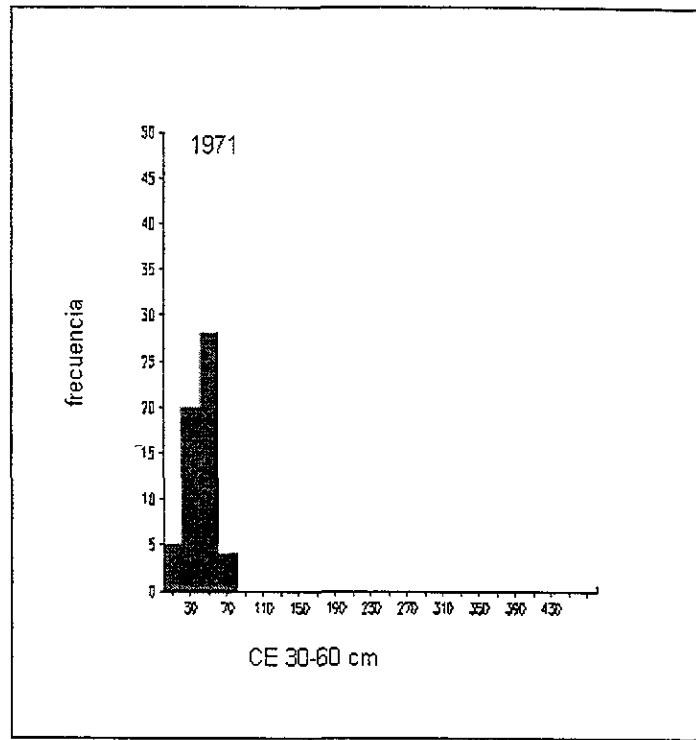
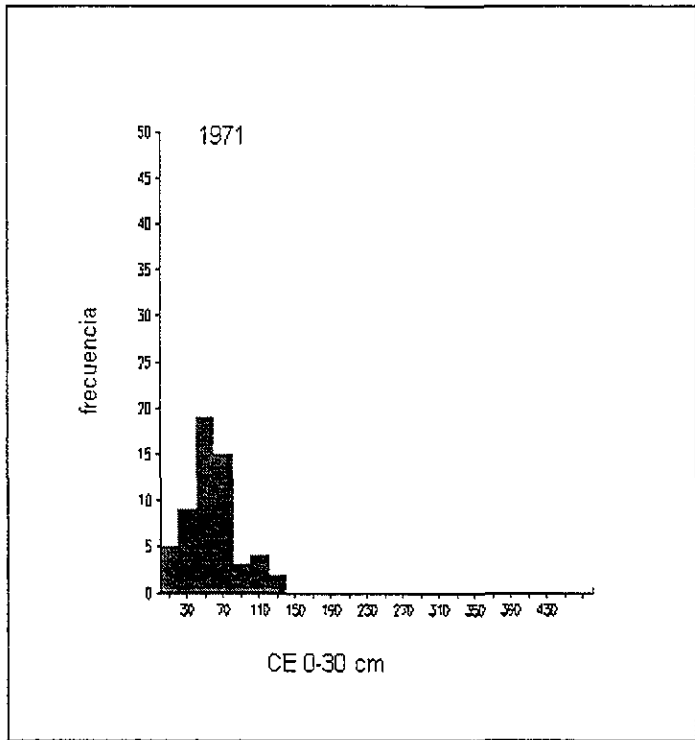


Fig. 6.2.2c: Histogramas de CE para los datos localizados dentro de la Zona de Estudio (año 1971).

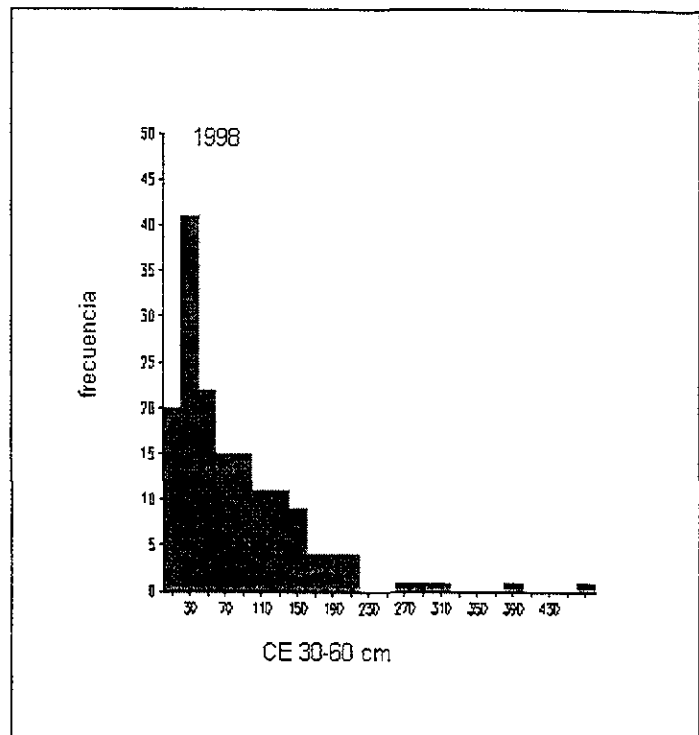
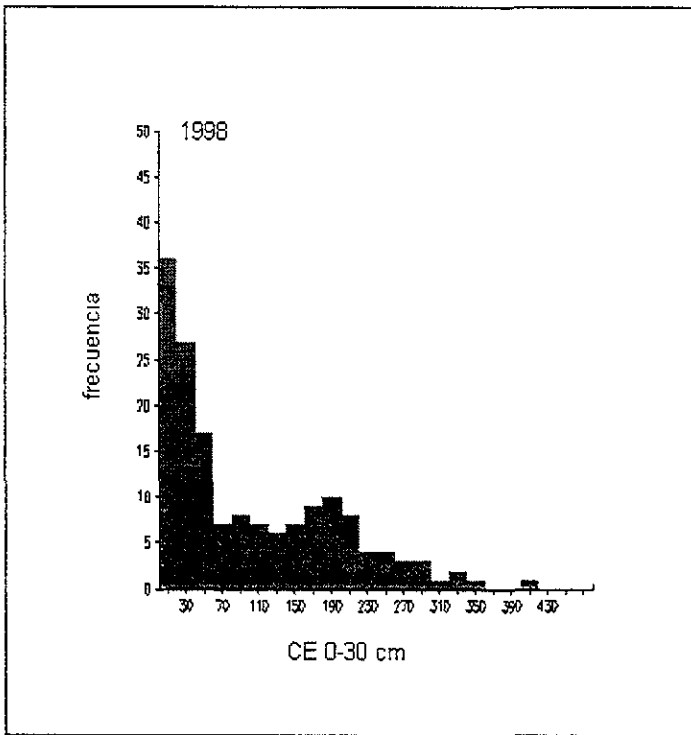


Fig. 6.2.2d: Histogramas de CE para los datos localizados dentro de la Zona de Estudio (año 1998).

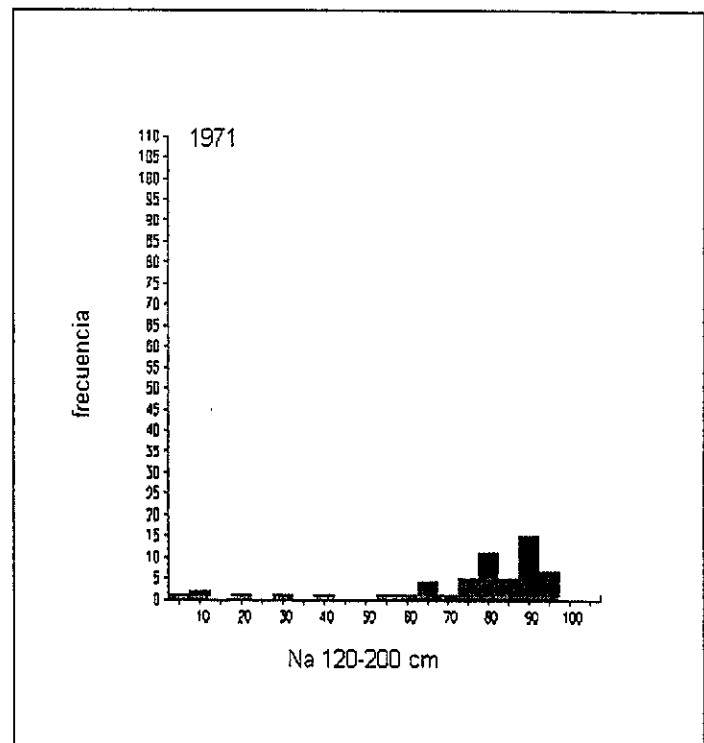
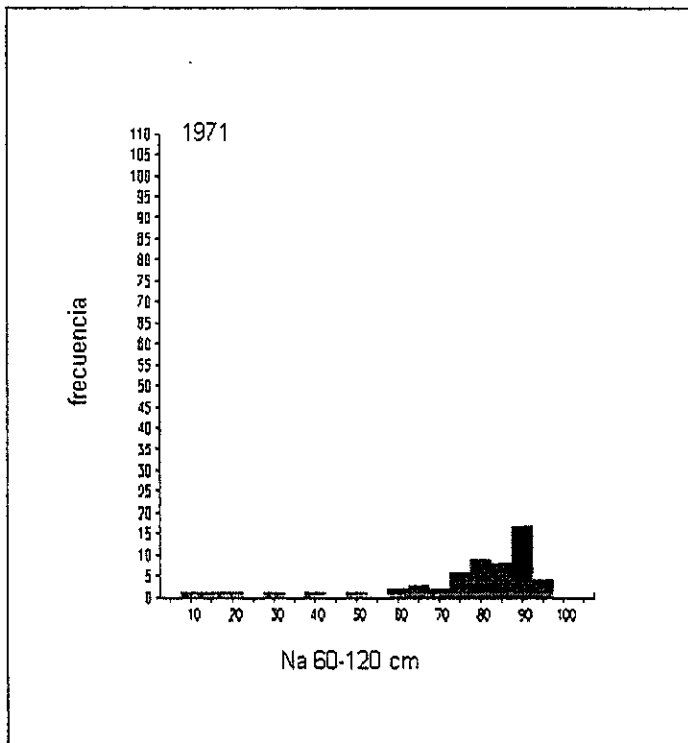
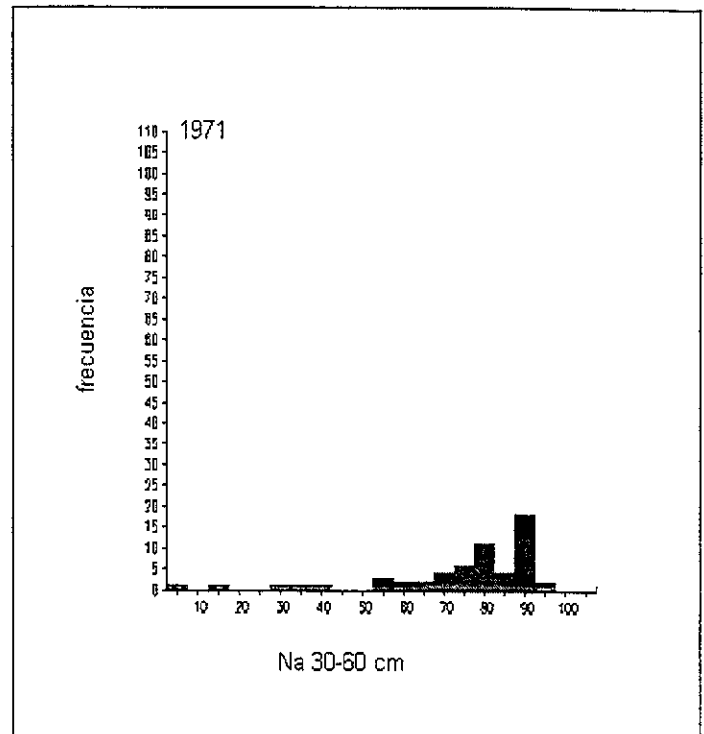
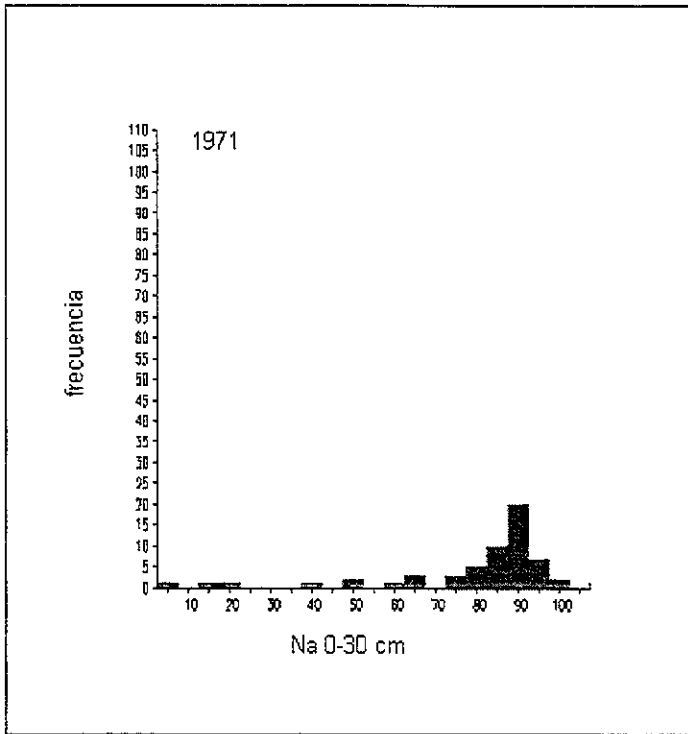


Fig. 6.2.2e: Histogramas de Na para los datos localizados dentro de la Zona de Estudio (año 1971).

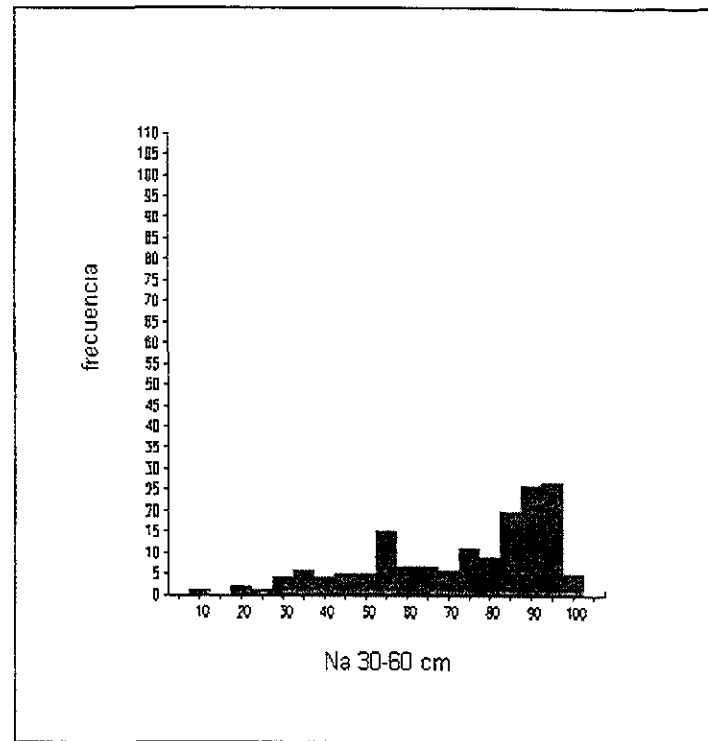
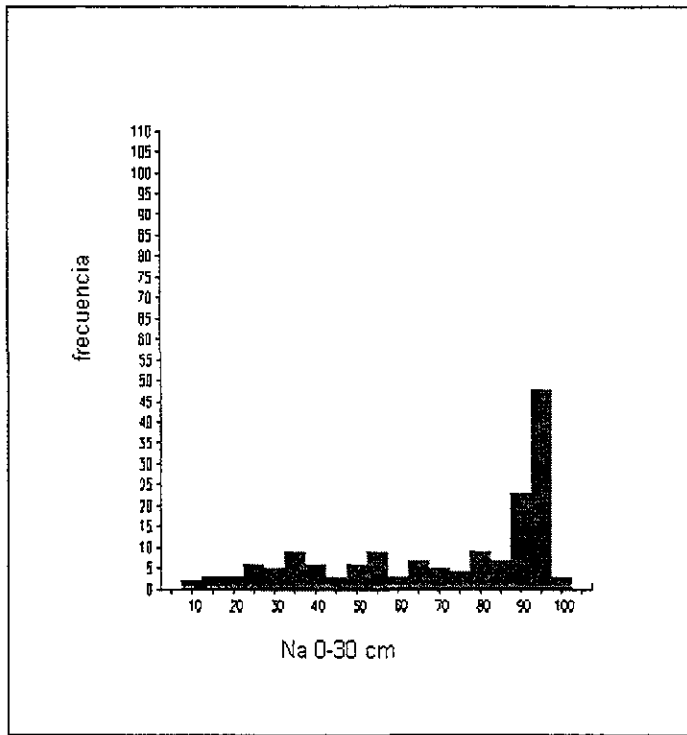


Fig. 6.2.2f: Histogramas de Na para los datos localizados dentro de la Zona de Estudio (año 1998).

Tabla 6.2.2			
Comparación de las distintas profundidades de los datos de 1971 y 1998 localizados dentro de la Zona de Estudio, mediante una prueba de t con un alfa del 5%.			
pH			
profundidad	t	p	
1971			
0-30 cm vs 30-60 cm	0.33	0.74	se acepta H0 (a)
0-30 cm vs 60-120 cm	0.30	0.76	se acepta H0
0-30 cm vs 120-200 cm	0.51	0.61	se acepta H0
30-60 cm vs 60-120 cm	0.06	0.95	se acepta H0
30-60 cm vs 120-200 cm	0.16	0.87	se acepta H0
60-120 cm vs 120-200 cm	0.24	0.81	se acepta H0
1998			
0-30cm vs 30-60 cm	1.53	0.13	se acepta H0
CE			
profundidad	t	p	
1971			
0-30 cm vs 30-60 cm	4.26	<0.001	se rechaza H0
0-30 cm vs 60-120 cm	3.54	<0.001	se rechaza H0
0-30 cm vs 120-200 cm	2.26	0.03	se rechaza H0
30-60 cm vs 60-120 cm	0.95	0.35	se acepta H0
30-60 cm vs 120-200 cm	2.07	0.04	se rechaza H0
60-120 cm vs 120-200 cm	1.25	0.21	se acepta H0
1998			
0-30cm vs 30-60 cm	2.28	0.02	se rechaza H0
Na			
profundidad	t	p	
1971			
0-30 cm vs 30-60 cm	1.40	0.16	se acepta H0
0-30 cm vs 60-120 cm	0.95	0.35	se acepta H0
0-30 cm vs 120-200 cm	1.16	0.25	se acepta H0
30-60 cm vs 60-120 cm	0.46	0.65	se acepta H0
30-60 cm vs 120-200 cm	0.15	0.88	se acepta H0
60-120 cm vs 120-200 cm	0.27	0.78	se acepta H0
1998			
0-30cm vs 30-60 cm	0.78	0.44	se acepta H0
(a) H0 implica que los dos promedios son iguales.			
Nota: el número de observaciones de cada variable en cada una de las distintas profundidades es de 57 para el año de 1971, y de 161 para el año de 1998.			

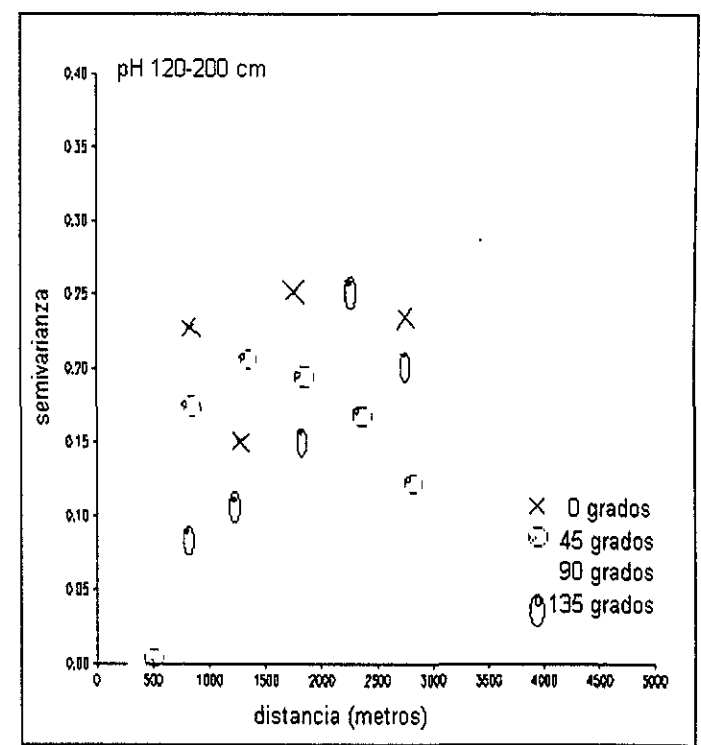
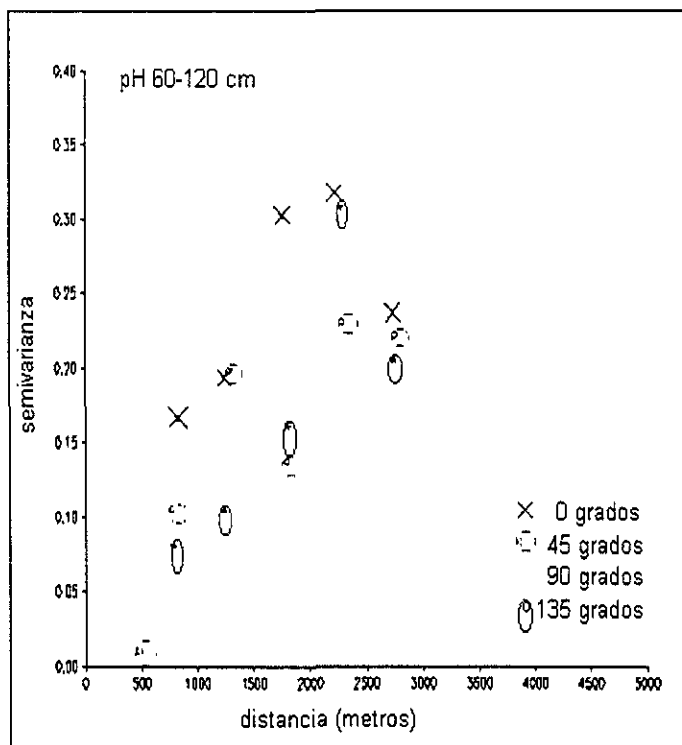
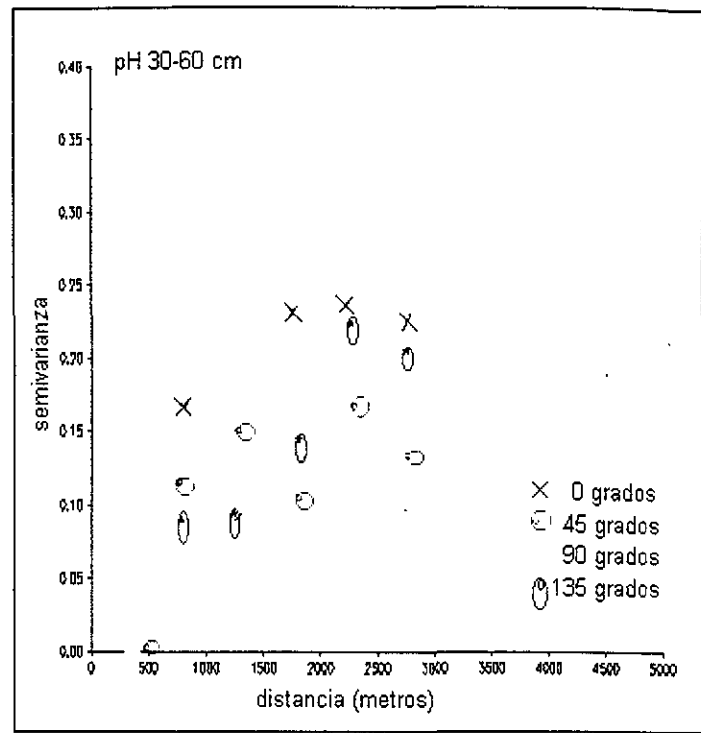
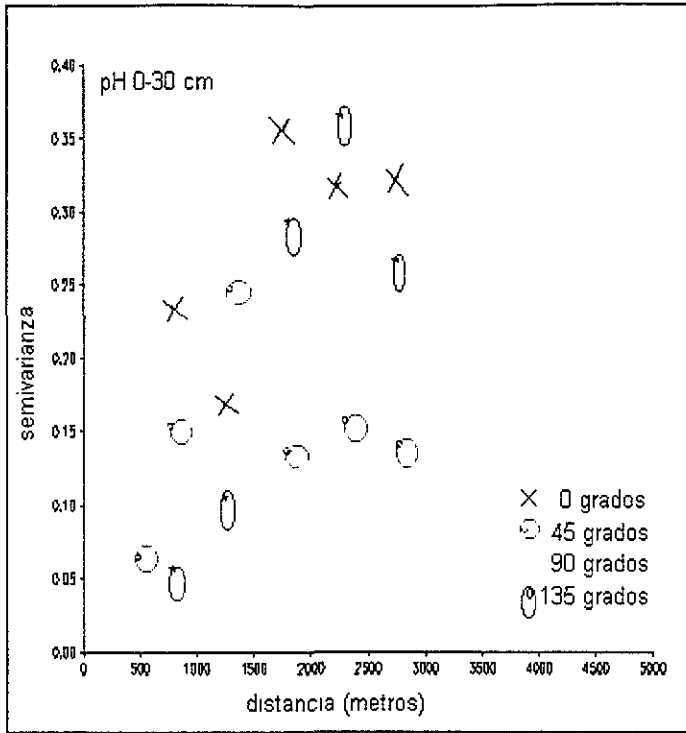


Fig. 6.3.1a: Semivariogramas de pH en distintas direcciones para los datos localizados dentro de la Zona de Estudio (año 1971).

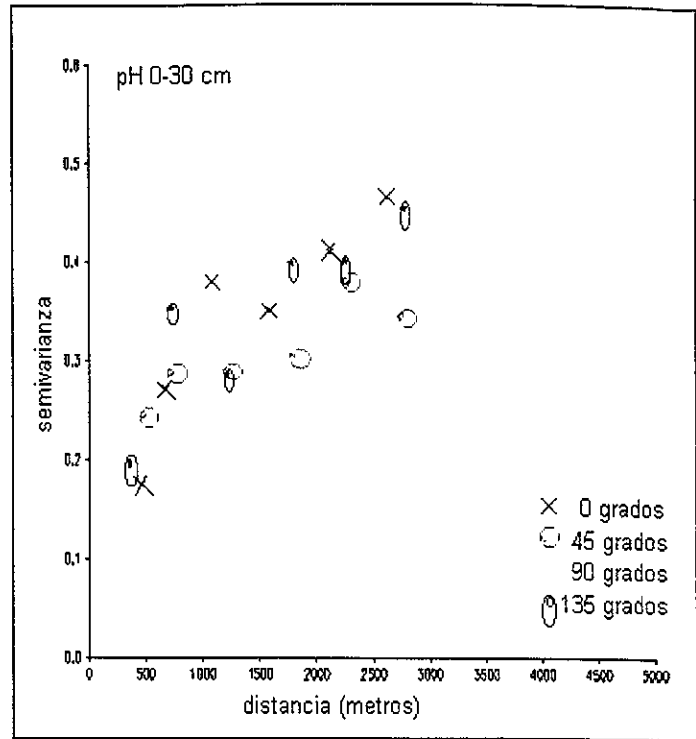
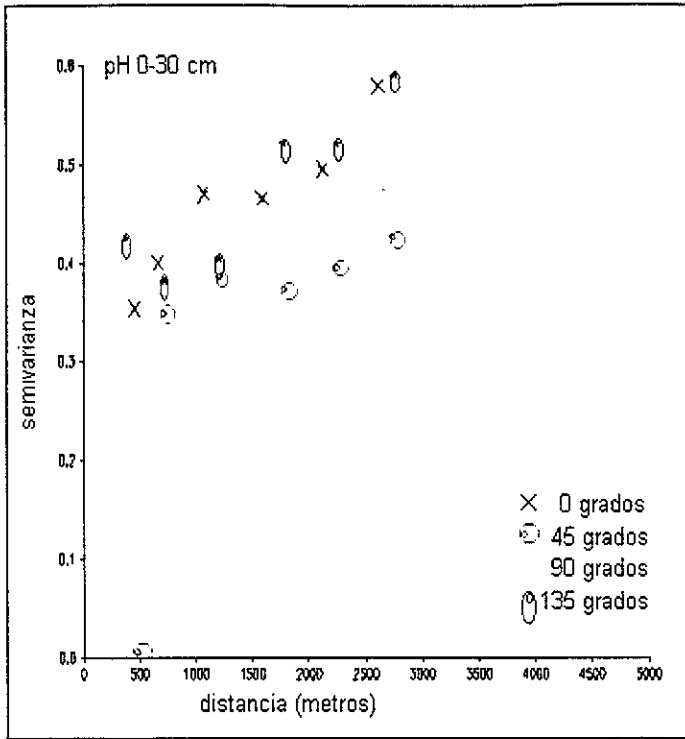


Fig. 6.3.1b: Semivariogramas de pH en distintas direcciones para los datos localizados dentro de la Zona de Estudio (año 1998).

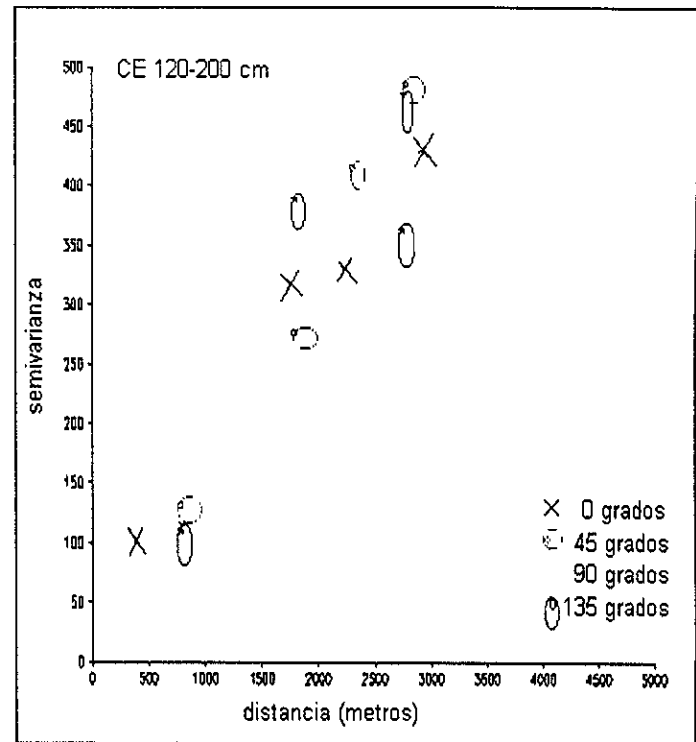
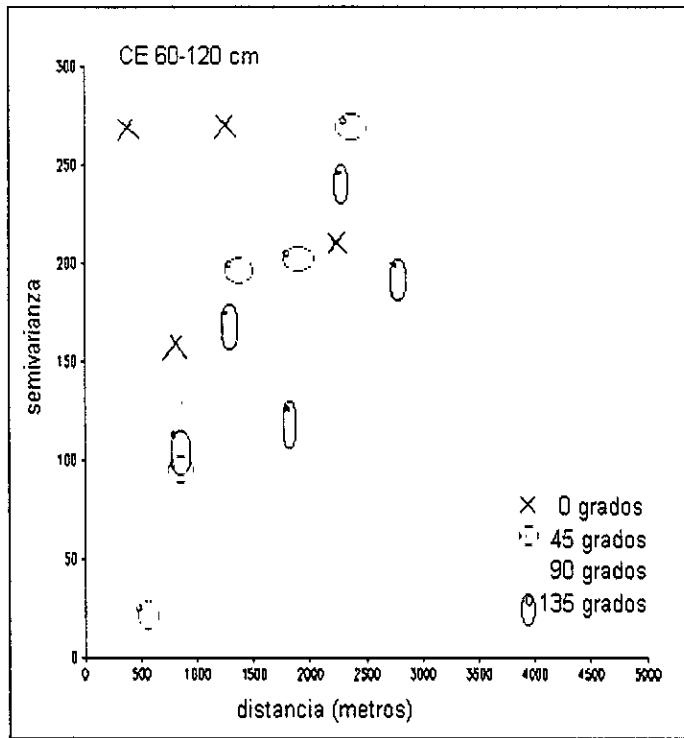
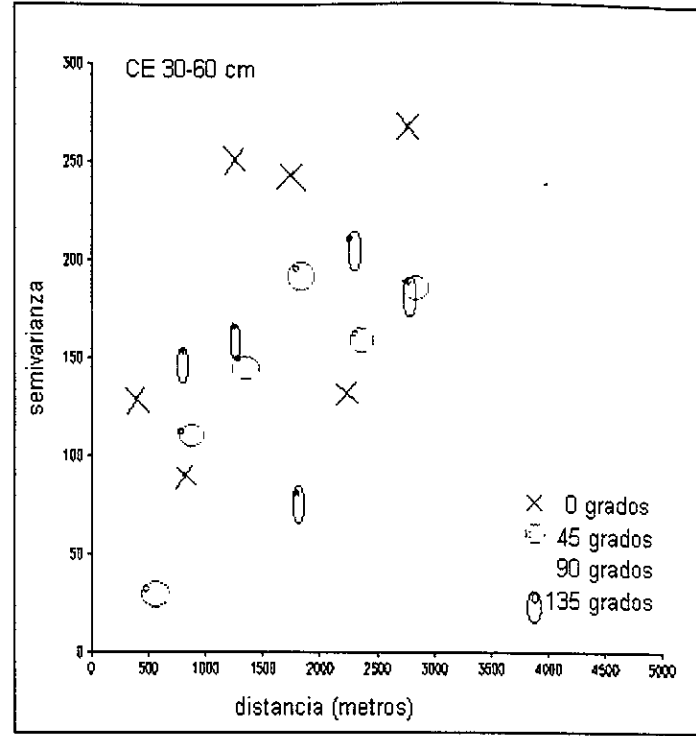
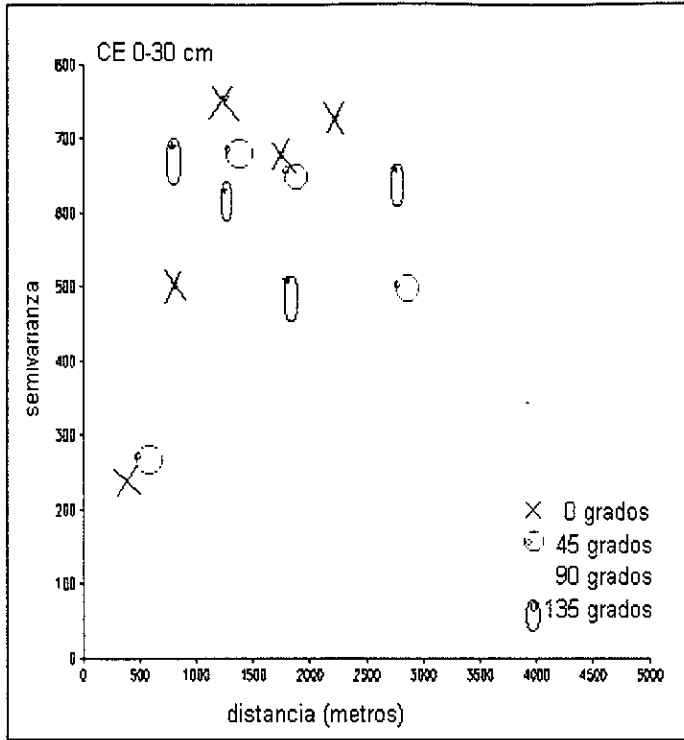


Fig. 6.3.1c: Semivariogramas de CE en distintas direcciones para los datos localizados dentro de la Zona de Estudio (año 1971).

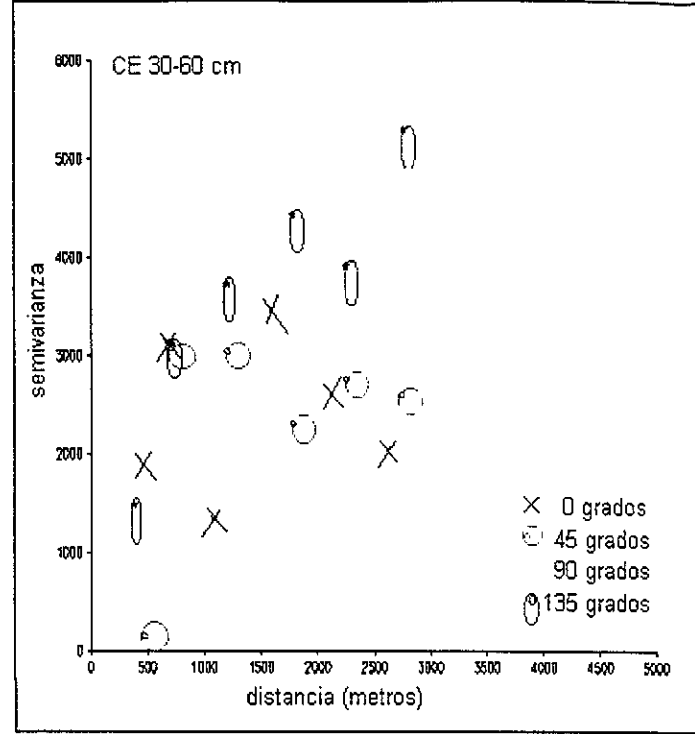
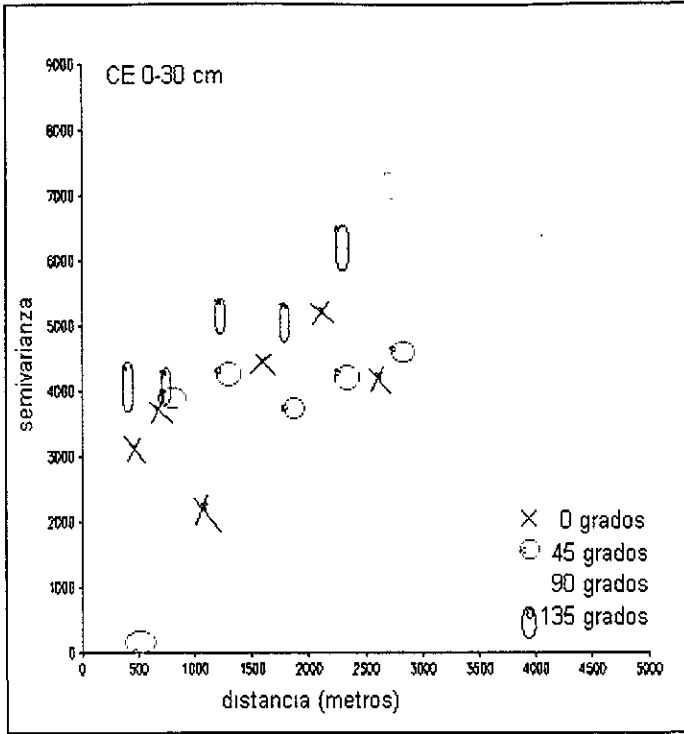


Fig. 6.3.1d: Semivariogramas de CE en distintas direcciones para los datos localizados dentro de la Zona de Estudio (año 1998).

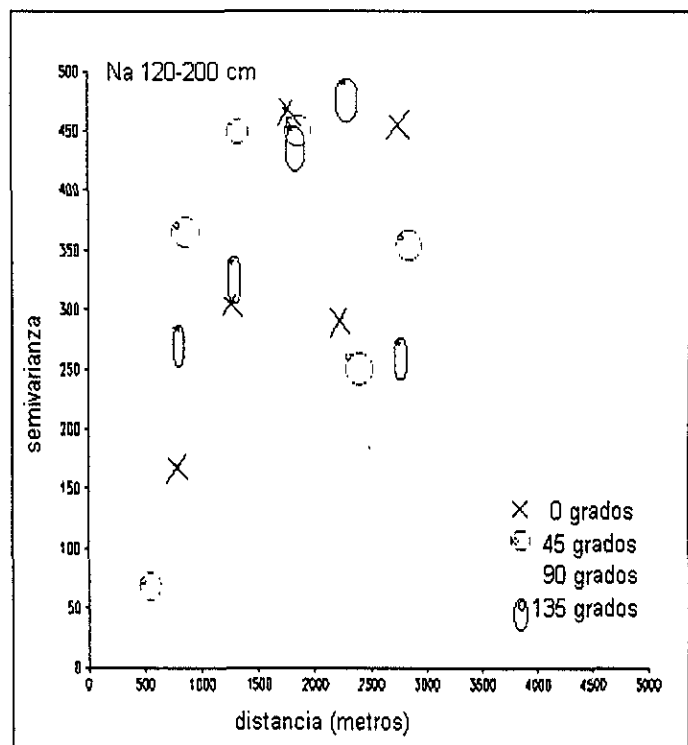
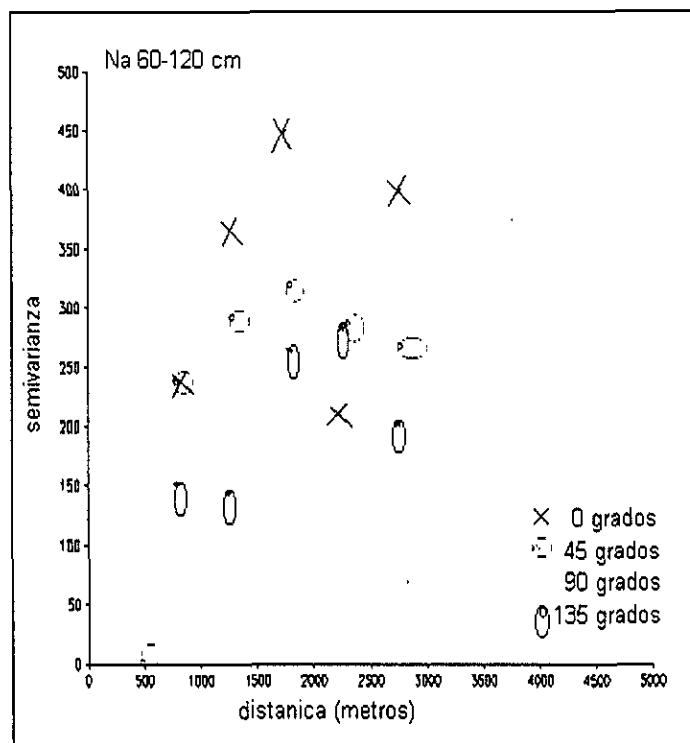
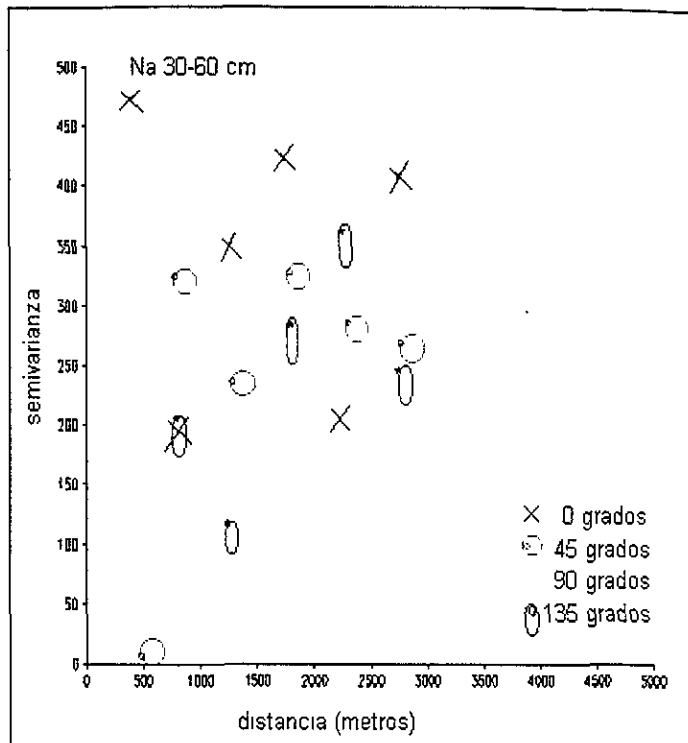
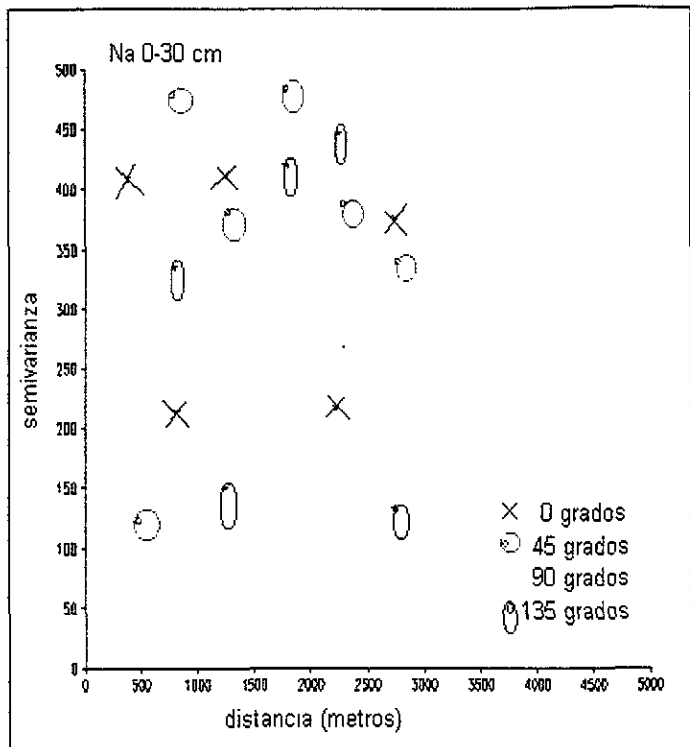


Fig. 6.3.1e: Semivariogramas de Na en distintas direcciones para los datos localizados dentro de la Zona de Estudio (año 1971).

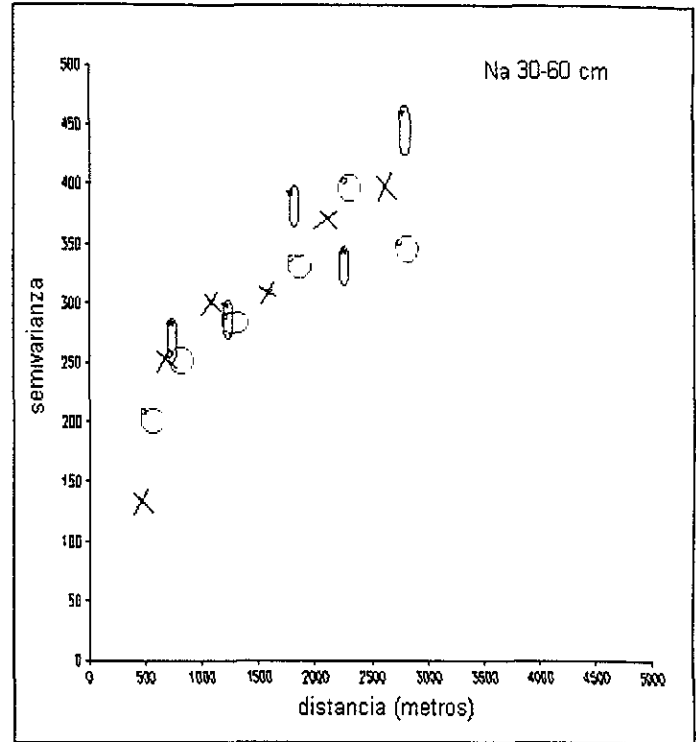
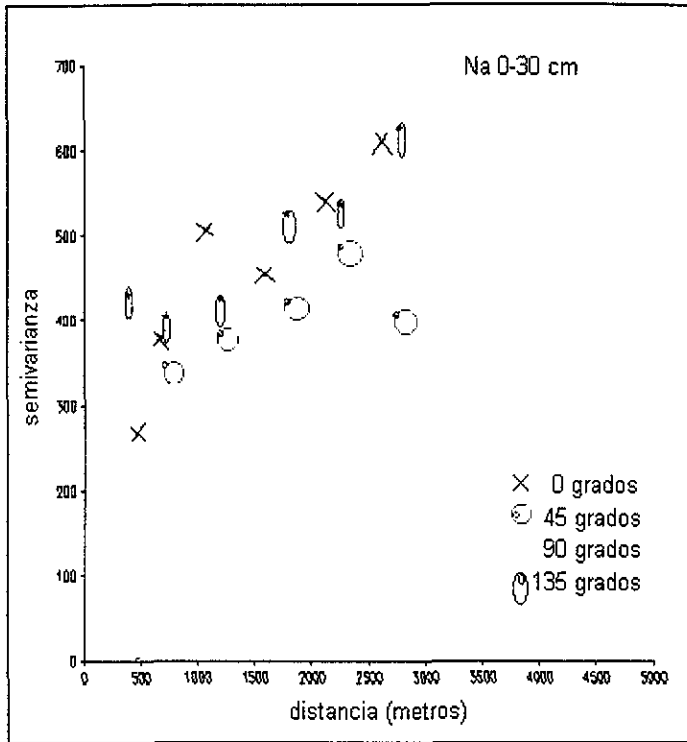


Fig. 6.3.1f: Semivariogramas de Na en distintas direcciones para los datos localizados dentro de la Zona de Estudio (año 1998).

Tabla 6.3.1
Parámetros de los criterios utilizados para la selección del modelo de ajuste, a los semivariogramas
de los datos de 1971 y 1998 localizados dentro de la Zona de Estudio, continuación...

CE 1988						profundidad 30-60 cm								
profundidad 0-30 cm			profundidad 30-60 cm			Modelo			razón					
Modelo	%varianza	error media	razón	distancia (m)	Modelo	% varianza	error media	razón	distancia (m)	Modelo	% varianza	error media	razón	distancia (m)
Whittle	88.20	-0.2014	1.66	8000	Whittle	78.40	0.9215	*	8000	Whittle	78.40	0.9215	1.22	8000
Exponencial	86.30	0.4555	1.32	8000	Exponencial	*	*	*	8000	Exponencial	*	*	*	8000
Esférico	88.40	0.5011	2.01	8000	Esférico	76.70	0.9273	*	8000	Esférico	76.70	0.9273	1.19	8000
Circular	89.20	0.5388	2.75	8000	Circular	*	*	*	8000	Circular	*	*	*	8000
Potencial	85.50	0.4257	1.92	8000	Potencial	76.80	0.9119	*	8000	Potencial	76.80	0.9119	0.93	8000
Lineal	93.70	0.4025	1.19	4000	Lineal	81.60	0.8076	*	4000	Lineal	81.60	0.8076	1.14	5000
Na 1971														
profundidad 0-30 cm														
Modelo	%varianza	error media	razón	distancia (m)	otras profundidades									
Whittle	*	*	*	*	No se ajustó ningún modelo debido a la no estructuración de los datos									
Exponencial	*	*	*	*										
Esférico	*	*	*	*										
Circular	*	*	*	*										
Potencial	*	*	*	*										
Lineal	87.20	0.6921	0.61	5000										
Na 1998														
profundidad 0-30 cm														
Modelo	%varianza	error media	razón	distancia (m)	profundidad 30-60 cm									
Whittle	90.70	-0.0191	0.82	8000	Whittle	92.10	-0.0011	0.93	8000	Whittle	92.10	-0.0011	0.93	8000
Exponencial	95.20	-0.0186	0.85	8000	Exponencial	94.70	-0.0010	0.94	6000	Exponencial	94.70	-0.0010	0.94	6000
Esférico	95.60	-0.0179	0.86	8000	Esférico	94.90	-0.0009	0.94	6000	Esférico	94.90	-0.0009	0.94	6000
Circular	95.70	-0.0175	0.88	8000	Circular	95.00	-0.0010	0.94	6000	Circular	95.00	-0.0010	0.94	6000
Potencial	89.50	-0.0193	0.82	8000	Potencial	93.50	-0.0010	0.93	8000	Potencial	93.50	-0.0010	0.93	8000
Lineal	95.40	-0.0186	0.86	6000	Lineal	96.20	-0.0009	0.95	5000	Lineal	96.20	-0.0009	0.95	5000
% varianza= porcentaje de variabilidad explicado por el modelo * no se pudo ajustar a los datos														

Tabla 6.3.1
Parámetros de los criterios utilizados para la selección del modelo de ajuste, a los semivariogramas
de los datos de 1971 y 1998 localizados dentro de la Zona de Estudio.

pH 1971									
profundidad 0-30 cm					profundidad 30-60 cm				
Modelo	%varianza	error media	razón	distancia (m)	Modelo	% varianza	error media	razón	distancia (m)
Whittle	85.00	0.0108	0.88	8000	Whittle	87.30	0.0046	1.00	8000
Exponencial	85.10	0.0098	0.91	8000	Exponencial	86.60	0.0041	1.03	8000
Esférico	84.30	0.0117	0.86	8000	Esférico	86.60	0.0040	1.03	8000
Circular	83.80	0.0121	0.86	8000	Circular	87.60	0.0043	1.04	6000
Potencial	84.90	0.0115	0.87	8000	Potencial	85.30	0.0046	0.93	8000
Lineal	86.00	0.0107	0.89	5000	Lineal	90.60	0.0047	0.95	5000
profundidad 60-120 cm									
Modelo	%varianza	error media	razón	distancia (m)	Modelo	% varianza	error media	razón	distancia (m)
Whittle	87.40	-0.0024	0.89	8000	Whittle	80.10	-0.0020	0.81	8000
Exponencial	87.60	-0.0024	0.84	6000	Exponencial	79.30	-0.0022	0.80	6000
Esférico	89.00	0.0004	0.82	6000	Esférico	82.40	-0.0015	0.81	6000
Circular	89.10	-0.0003	0.82	6000	Circular	83.50	-0.0012	0.82	5000
Potencial	83.60	-0.0031	0.81	8000	Potencial	77.40	-0.0026	0.80	8000
Lineal	86.00	-0.0029	0.86	6000	Lineal	71.00	-0.0030	0.77	6000
pH 1998									
profundidad 0-30 cm					profundidad 30-60 cm				
Modelo	%varianza	error media	razón	distancia (m)	Modelo	% varianza	error media	razón	distancia (m)
Whittle	96.40	0.0045	1.07	8000	Whittle	87.20	-0.0022	1.18	8000
Exponencial	95.40	0.0040	1.01	8000	Exponencial	91.60	-0.0021	1.16	6000
Esférico	96.10	0.0042	1.14	8000	Esférico	93.10	-0.0020	1.16	6000
Circular	96.20	0.0032	1.15	8000	Circular	94.10	-0.0019	1.15	6000
Potencial	94.80	0.0035	1.22	8000	Potencial	94.80	-0.0019	1.12	8000
Lineal	94.80	0.0033	1.15	5000	Lineal	96.90	-0.0018	1.13	5000
CE 1971									
profundidad 60-120 cm					otras profundidades				
Modelo	%varianza	error media	razón	distancia (m)	No se ajustó ningún modelo debido a la no estructuración de los datos				
Whittle	61.80	0.3113	0.81	8000					
Exponencial	76.90	0.2525	0.88	4000					
Esférico	75.90	0.2441	0.90	4000					
Circular	76.30	0.2259	0.90	4000					
Potencial	65.80	0.3002	0.83	8000					

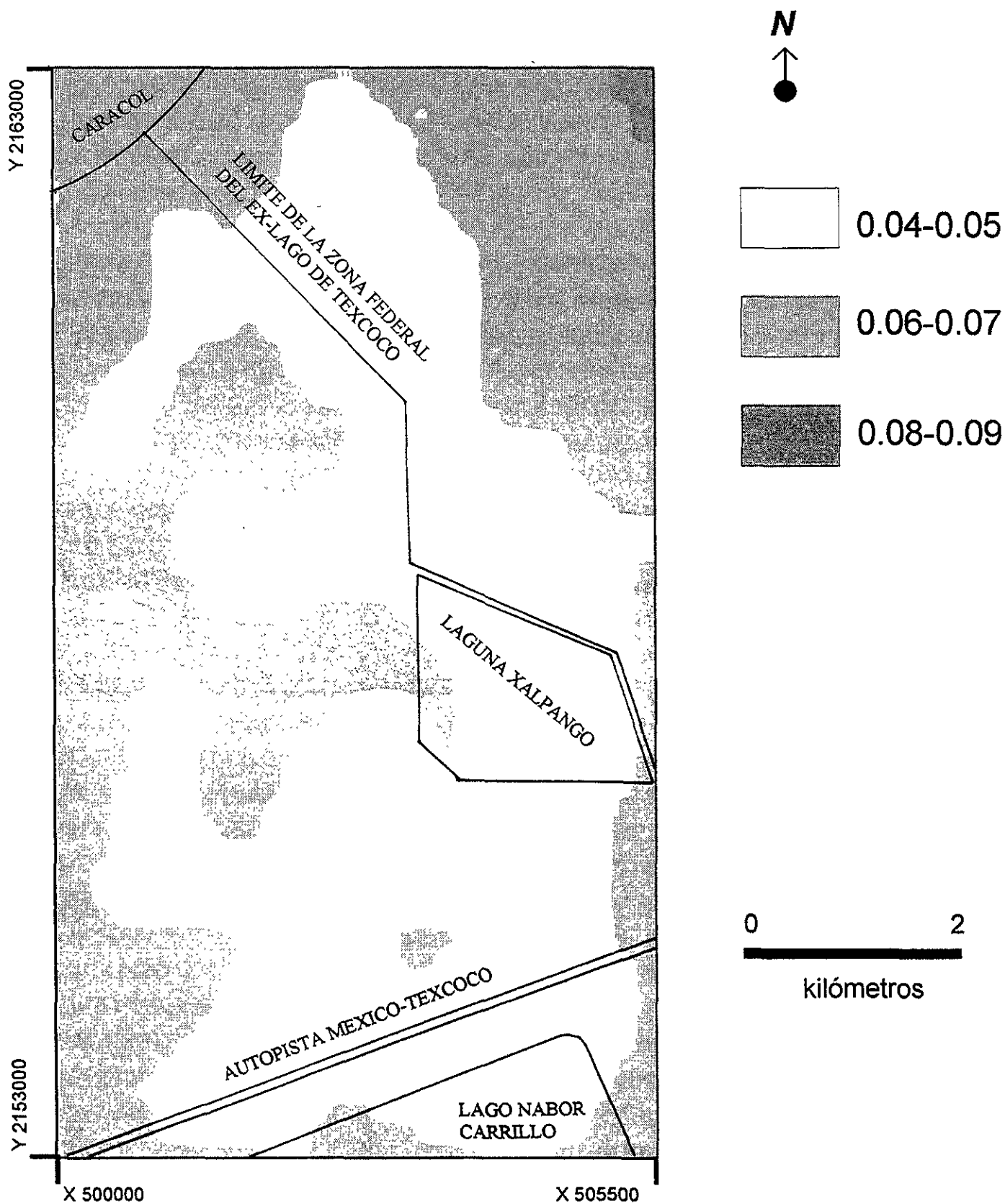


Fig. 6.4b: Error estandar pH profundidad 0-30 cm (1971)

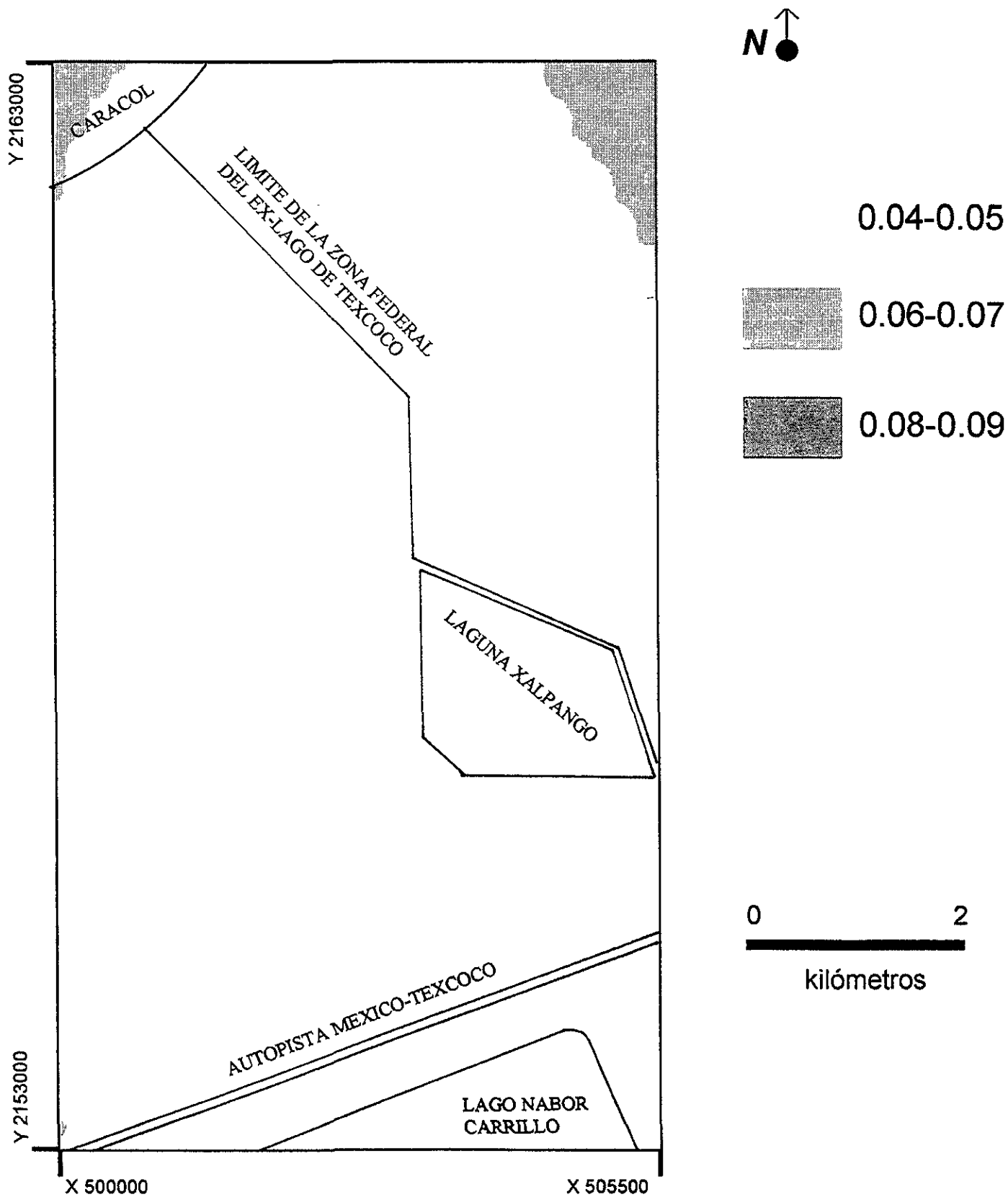


Fig. 6.4d: Error estandar pH profundidad 30-60 cm (1971)

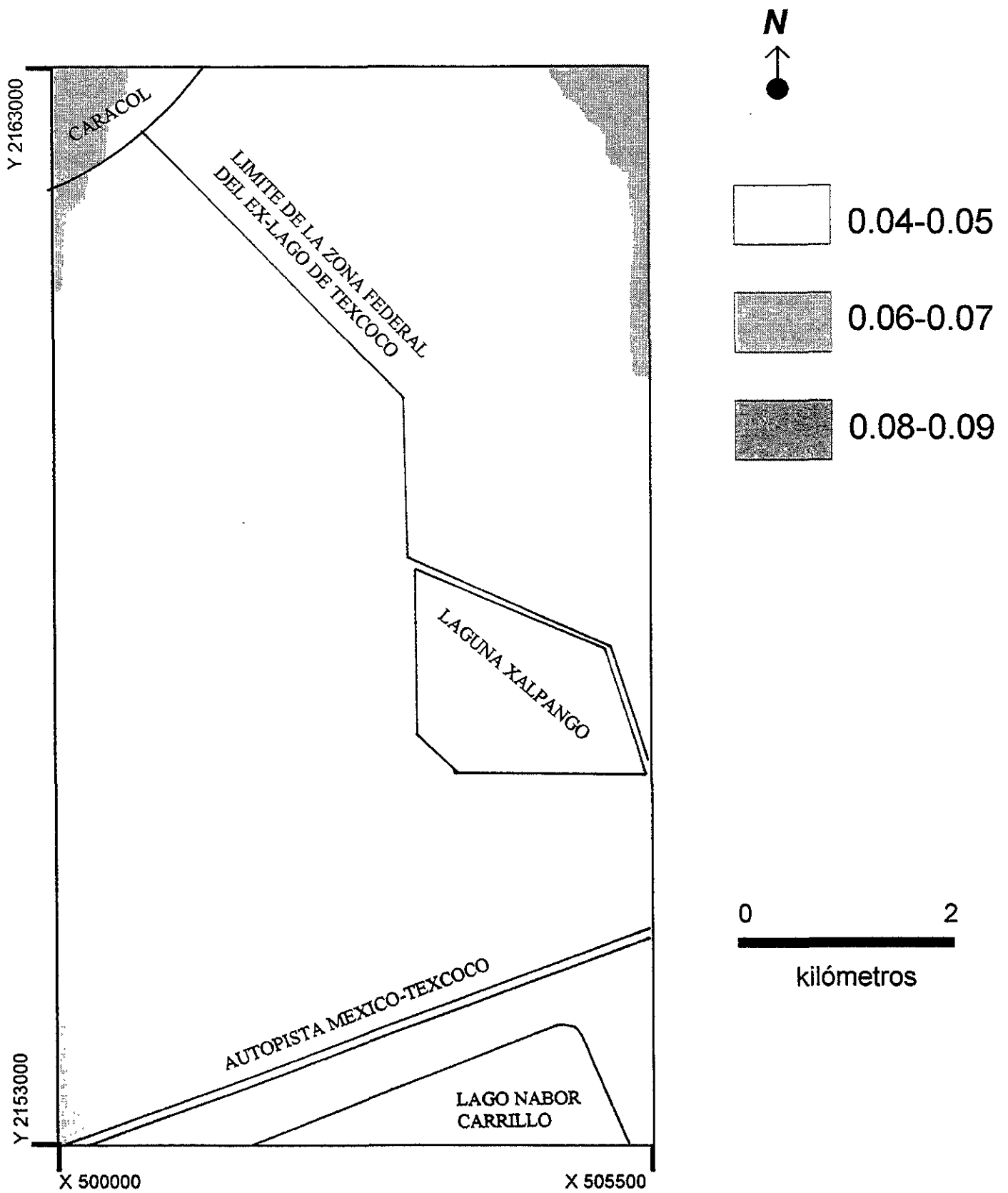


Fig. 6.4f: Error estandar pH profundidad 60-120 cm (1971)

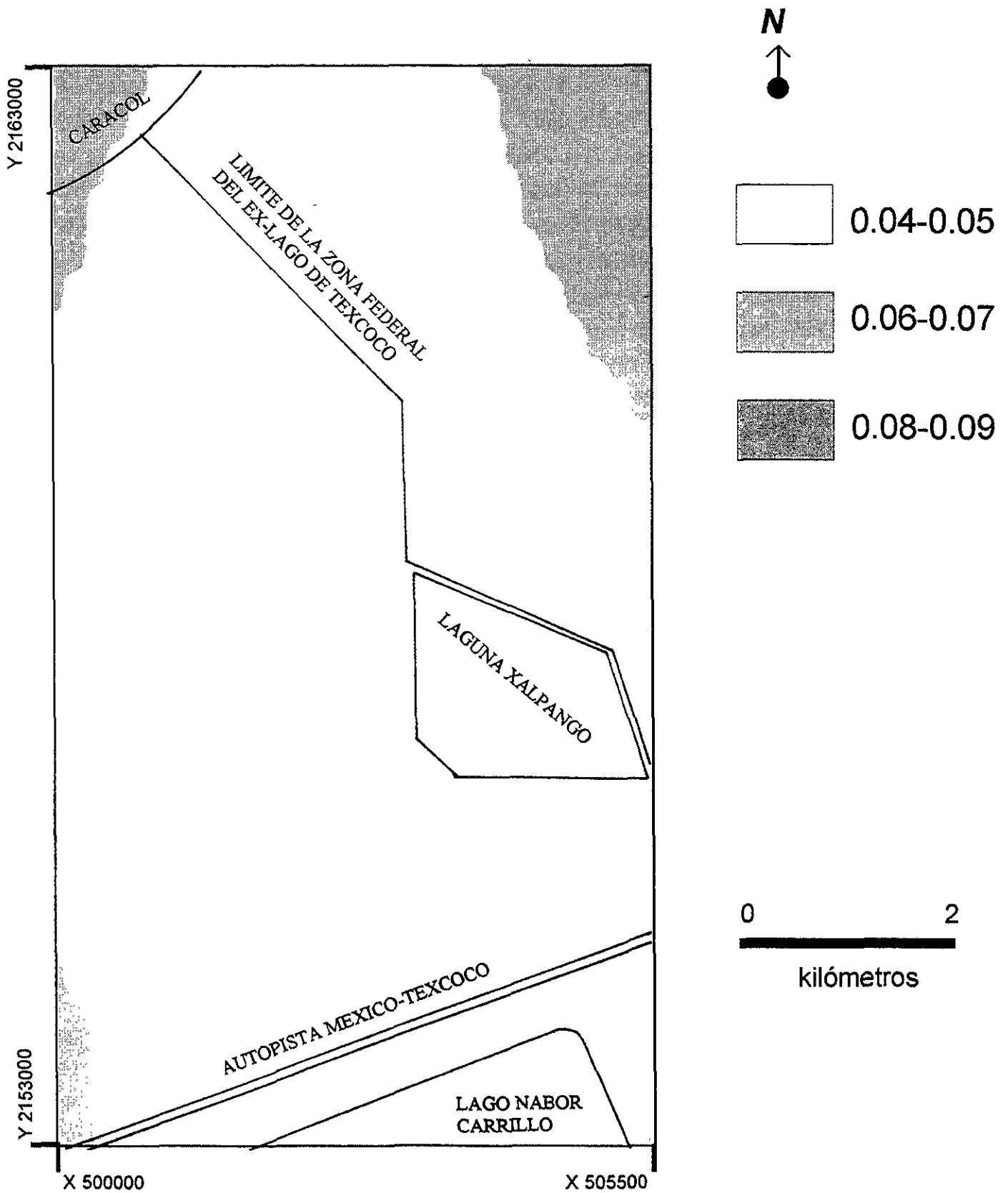


Fig. 6.4h: Error estandar pH profundidad 120-200 cm (1971)

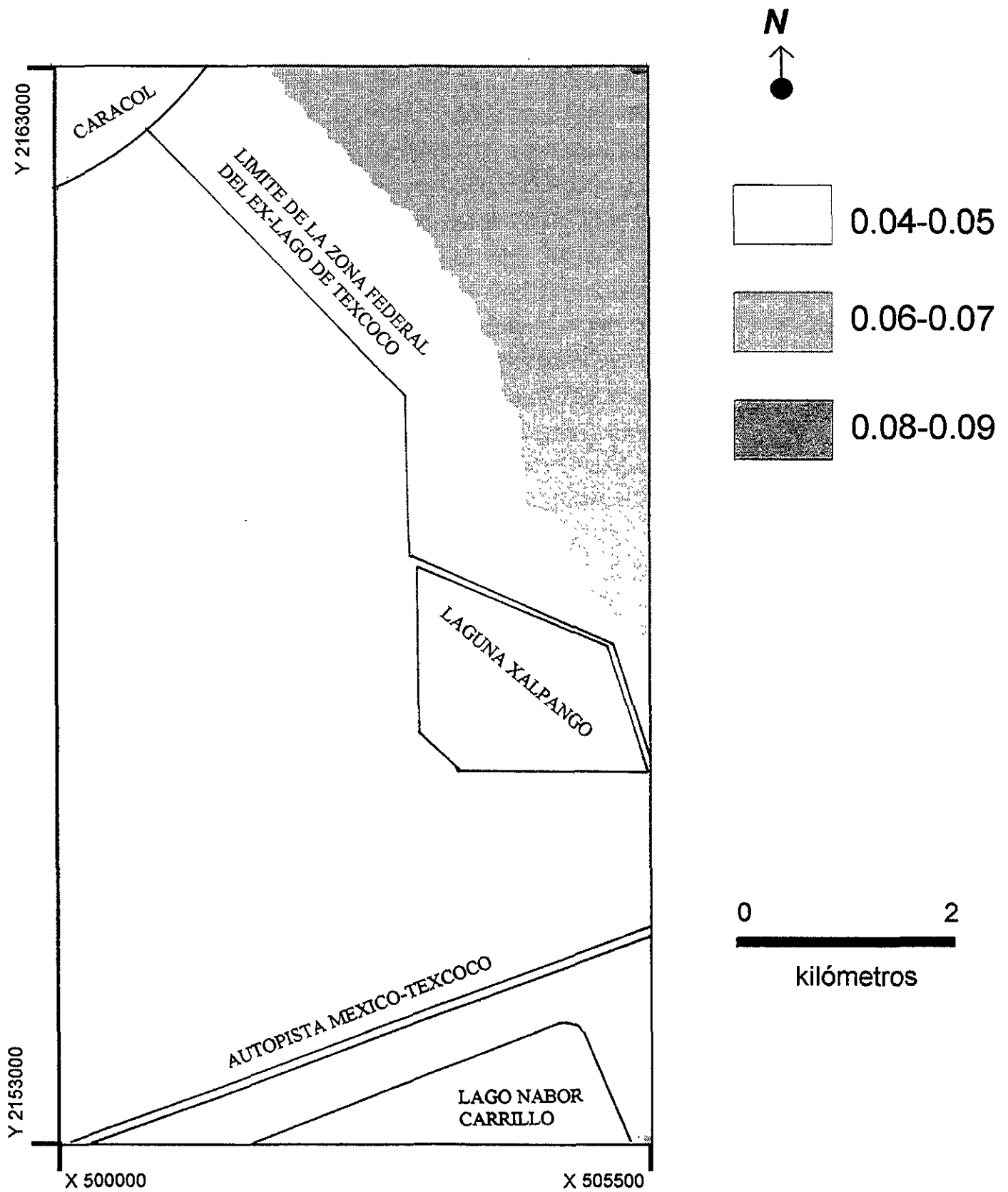


Fig. 6.4j: Error estandar pH profundidad 0-30 cm (1998)

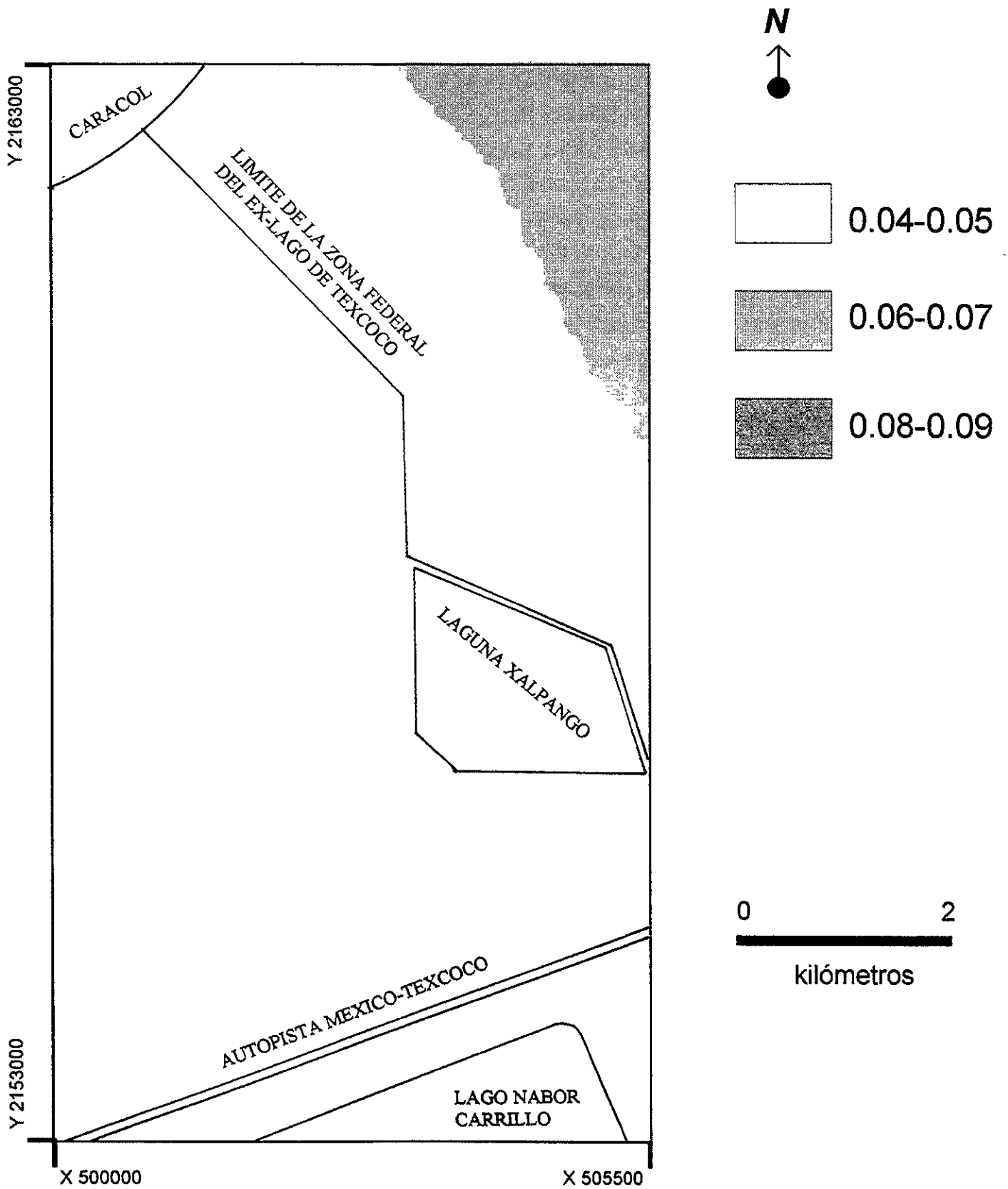


Fig. 6.4l: Error estandar pH profundidad 30-60 cm (1998)

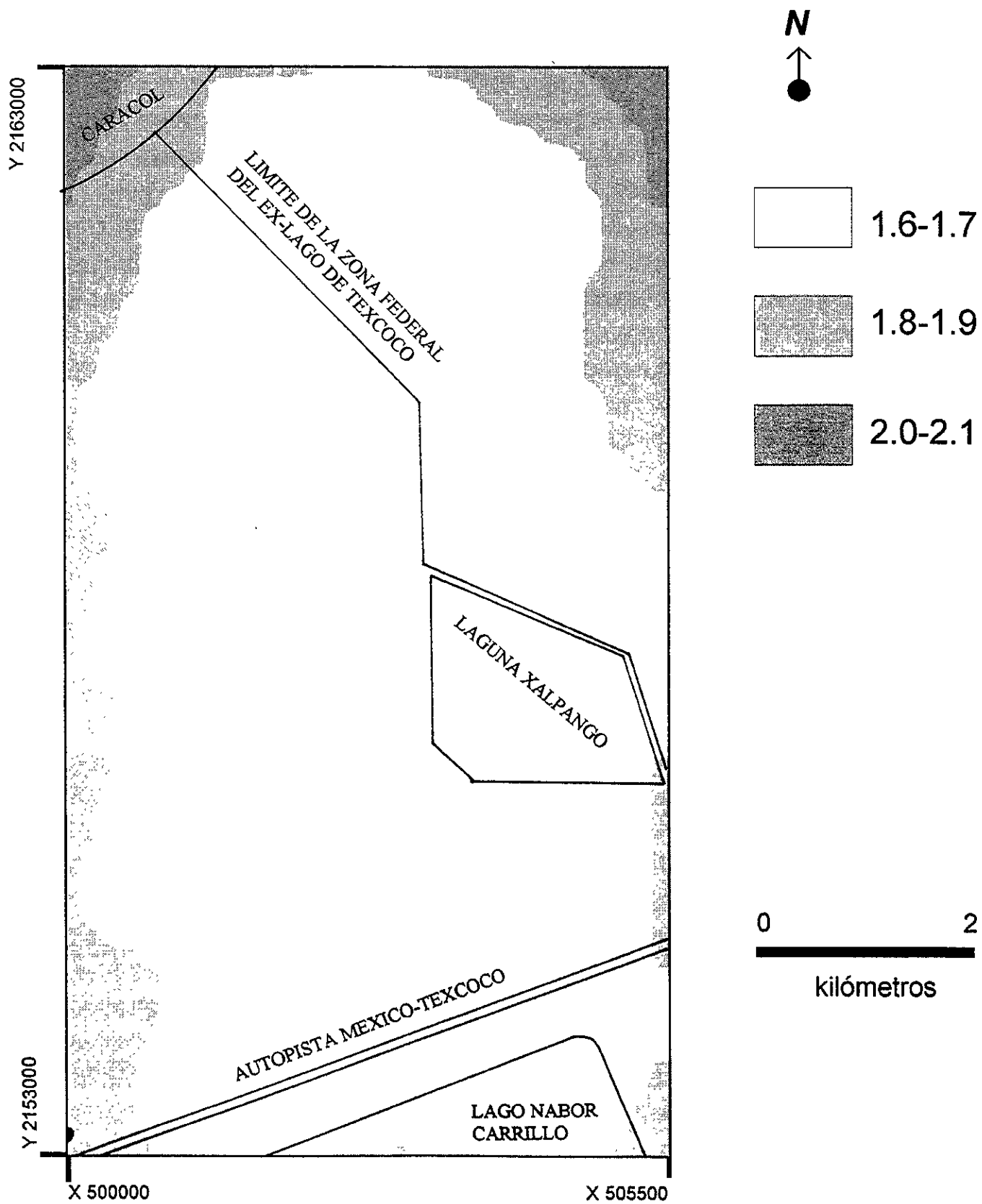


Fig. 6.4n: Error estandar CE (dSm^{-1}) profundidad 60-120 cm (1971)

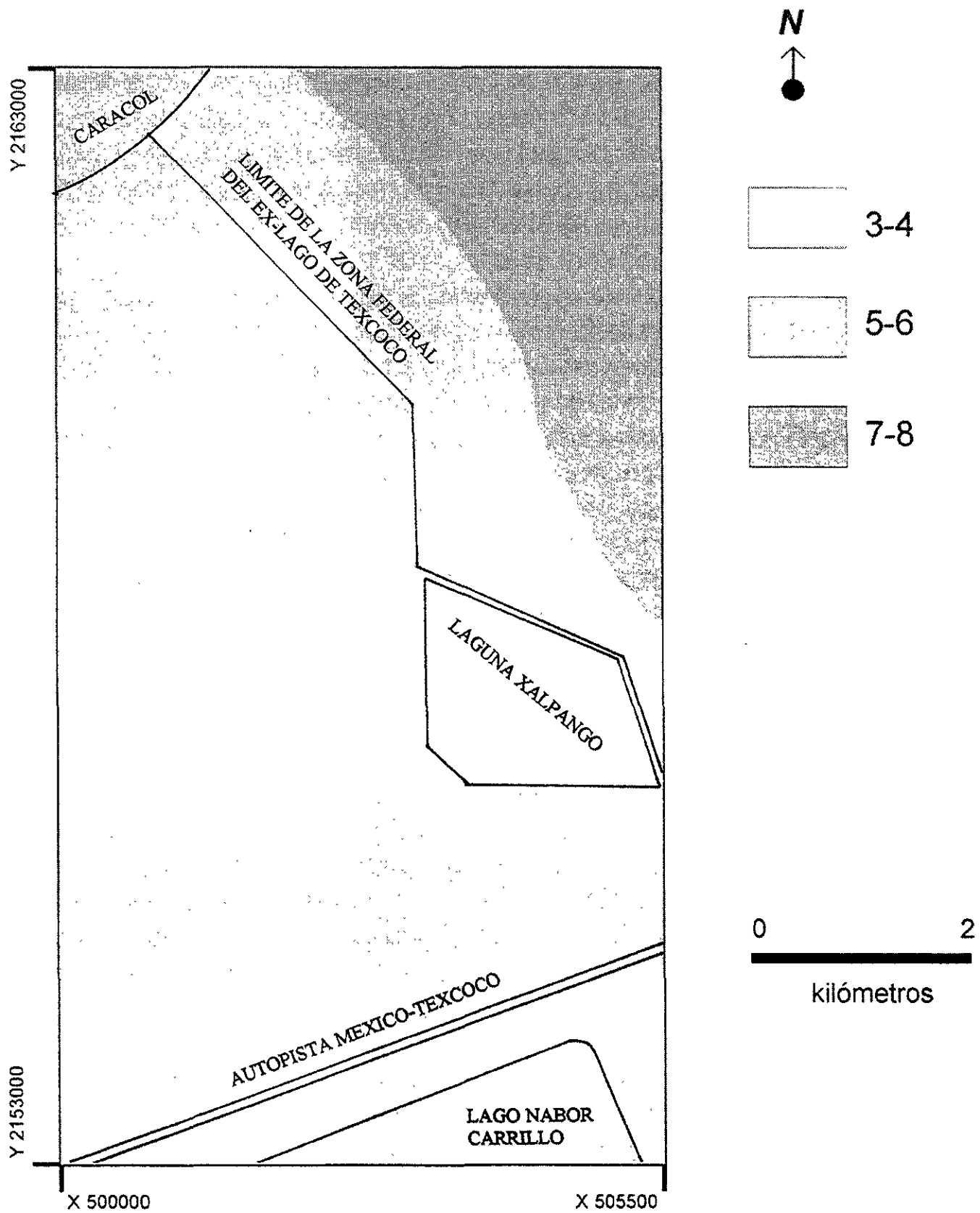


Fig. 6.4p: Error estandar CE (dSm^{-1}) profundidad 0-30 cm (1998)

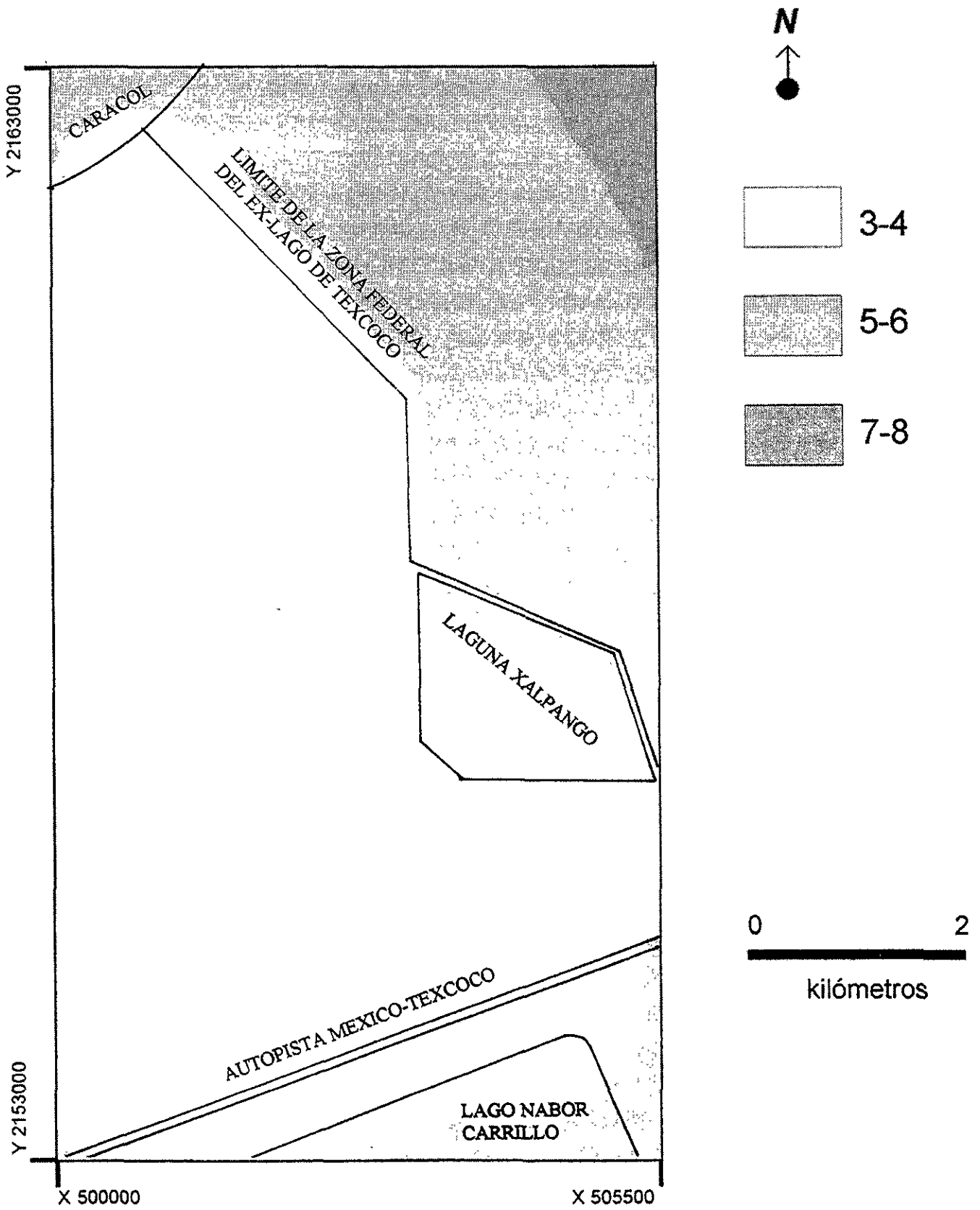


Fig. 6.4r: Error estandar CE (dSm^{-1}) profundidad 30-60 cm (1998)

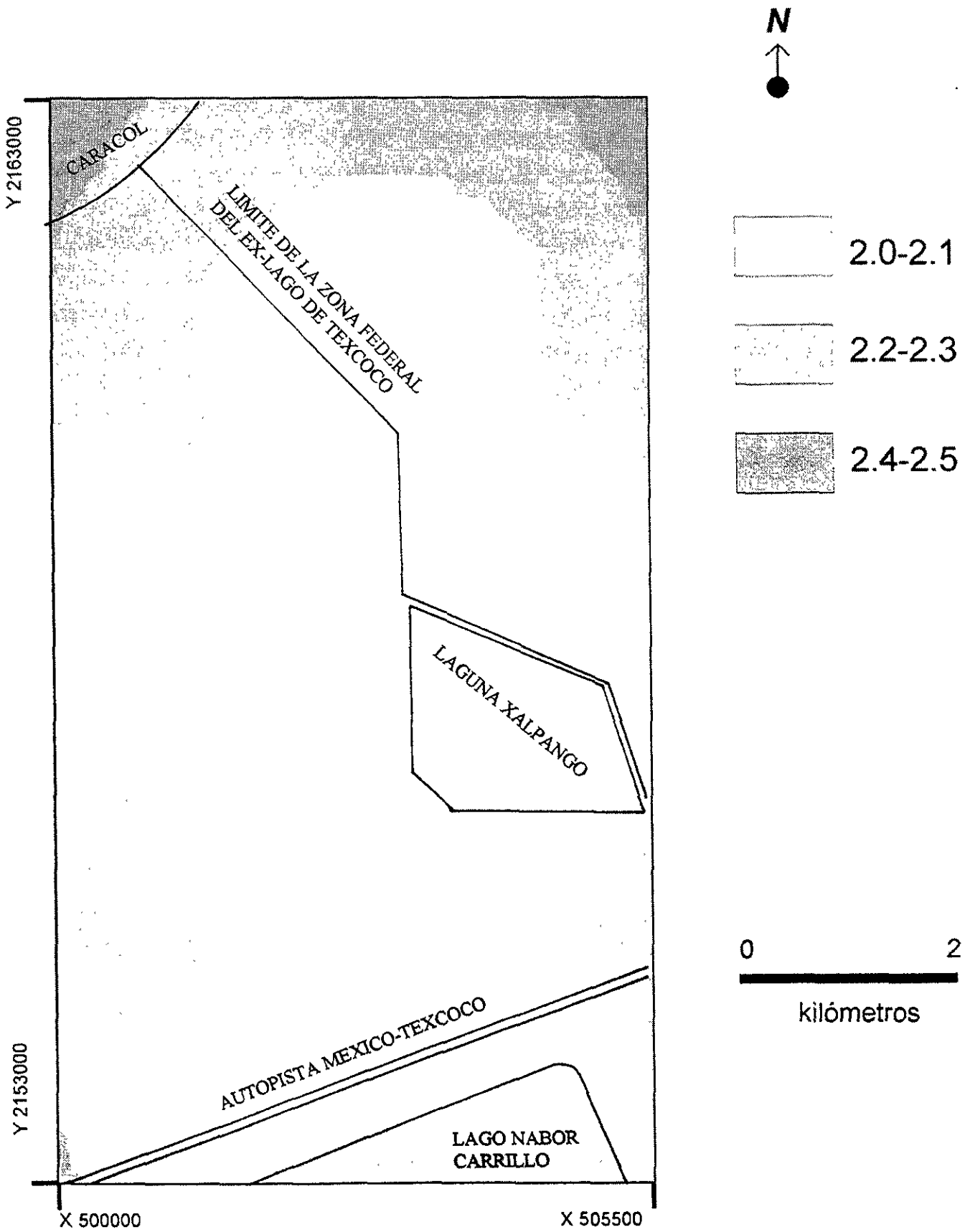


Fig. 6.4t: Error estandar Na (PSI) profundidad 30-60 cm (1971)

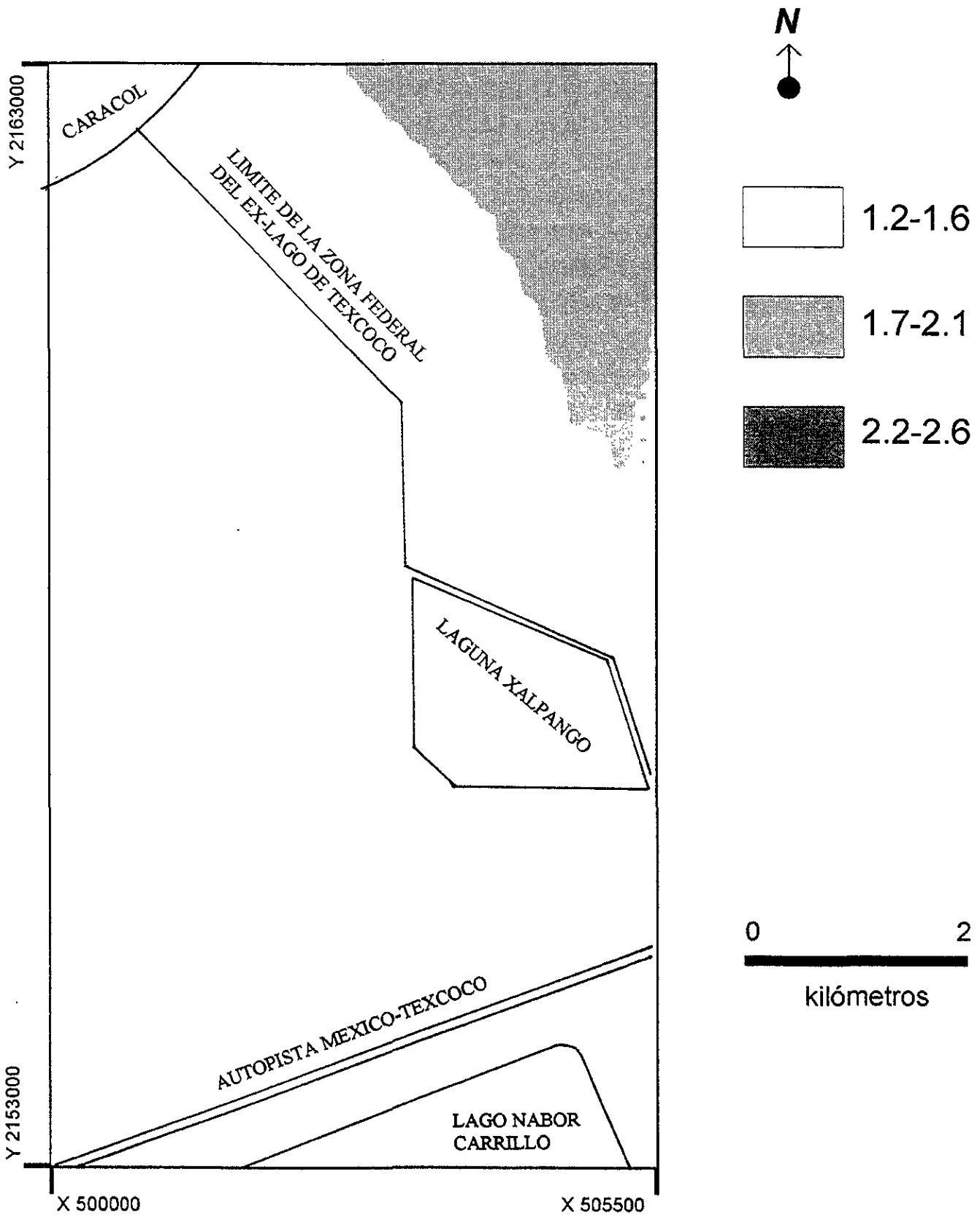


Fig. 6.4v: Error estandar Na (PSI) profundidad 0-30 cm (1998)

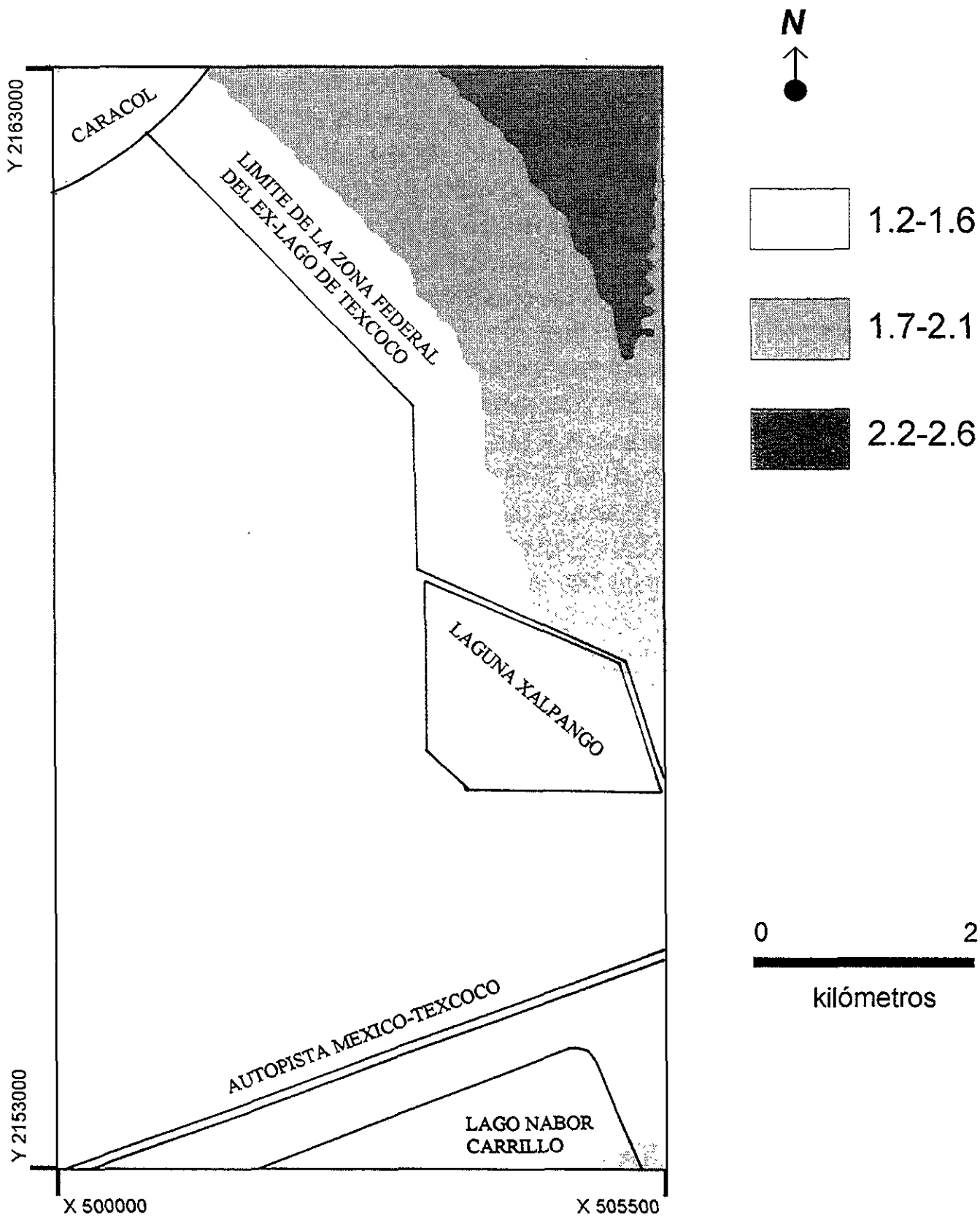


Fig. 6.4x: Error estandar Na (PSI) profundidad 30-60 cm (1998)