

## VARIABILIDAD Y DISTRIBUCIÓN ESPACIALES DE ALGUNOS PARÁMETROS FÍSICOS Y QUÍMICOS DEL SUELO EN EL DISTRITO DE RIEGO 03, ESTADO DE HIDALGO, MÉXICO; PARTE 2, CARTOGRAFÍA

José Luis Palacio-Prieto<sup>1</sup> y  
Christina Siebe-Grabach<sup>2</sup>

### RESUMEN

Con base en un estudio previo sobre la variabilidad espacial de algunos parámetros químicos de los suelos del Distrito de Riego 03, en Tula, Estado de Hidalgo, se elaboró una cartografía de la distribución espacial de seis parámetros—boro, conductividad eléctrica, pH, materia orgánica y cloruros—por medio de una interpolación aplicando *kriging* y carbonatos totales, profundidad del suelo, porcentaje de arena, limo y arcilla mediante una interpolación de *weighted moving average*. Igualmente se presenta mapas sobre las clases texturales de los suelos, tiempos bajo riego y tipos de agua usados para la irrigación como resultado del procesamiento de los datos en un sistema de información geográfica. Los mapas que se presenta son de escala regional y se da recomendaciones para la utilización de métodos geoestadísticos en estudios futuros.

Palabras clave: Pedología, geoestadística, interpolación, sistemas de información geográfica, riego agrícola con agua residual, DR03, Hidalgo, México.

### ABSTRACT

Based on the study of spatial variability, the cartography of six chemical soil parameters—boron, pH, electric conductivity, organic matter and chloride—in the Irrigation District 03, of Tula, State of Hidalgo, was prepared through interpolation using *kriging*. Cartography referring to total carbonates, soil depth, percentage of sand, silt and clay using a *weighted moving average* interpolation procedure was also prepared. Maps showing soil textural classes and areas differentiated according to time under irrigation and irrigation water quality were obtained, by processing data using a geographical information system. All maps refer to results on a regional basis. Recommendations for the use of geostatistical techniques in future studies are proposed.

Key words: Pedology, geostatistics, interpolation, geographical information systems, irrigation with sewage water, DR03, Hidalgo, Mexico.

### INTRODUCCIÓN

No obstante la importancia del Distrito de Riego 03 (DR03), tanto desde el punto de vista físico como económico y social, no se ha elaborado hasta el momento una cartografía que muestre la distribución espacial de parámetros edáficos. Entre los escasos ejemplos a este respecto, la Dirección de Geografía del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 1984) elaboró mapas edafológicos de escala 1:50,000, aunque infortunadamente no toda el área se encuentra cubierta actualmente. Otros mapas—series de suelos y clasificación agrícola de suelos—fueron publicados por la Secretaría de Recursos Hidráulicos (1976). Aun con estos ejemplos, no existe, en general, suficiente información sobre el comportamiento espacial de la mayoría de los parámetros edáficos conocidos hasta ahora, debido, en buena medida, a que la elaboración de mapas no ha sido uno de los objetivos fundamentales en los estudios realizados en el área.

El presente estudio tiene por objetivo principal el de cartografiar algunos parámetros físicos y químicos del suelo en el DR03, con base en los análisis realizados por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (1992), en compilación cartográfica y de literatura y en trabajo de campo. Los resultados que aquí se presenta forman parte de un proyecto más amplio orientado a la evaluación de metales pesados en suelos y aguas en el distrito de riego, como resultado del uso de aguas residuales.

### MÉTODOS

Los mapas que se presenta en este estudio fueron elaborados con base en diferentes métodos. Se utilizó geoestadística, cuando procedió, para obtener los semivariogramas necesarios y llevar a cabo interpolación por medio de *kriging*, o bien por medio de otras técnicas de promedios móviles pesados—*weighted moving averages*.

Los semivariogramas fueron estimados con base en los valores de mediana (Palacio-Prieto *et al.*, 1994). Una vez que fueron obtenidos y los modelos ajustados —y definidos el *sill*,

<sup>1</sup>Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, 04510 D.F.

<sup>2</sup>Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, 04510 D.F.

*nugget, lag, rango y dirección*—se llevó a cabo la interpolación por medio de *kriging* (Burgess y Webster, 1980a, 1980b).

Además de obtener mapas isorrítmicos—de isolíneas—con los valores estimados por el *kriging*, también puede elaborarse mapas de este tipo con los valores de error—desviaciones estándar del *kriging*—estimados por el interpolador. De esta manera, se obtiene un mapa compañero de "credibilidad" (Clark, 1979).

Para realizar las operaciones descritas, se utilizó el programa Geostatistical Environmental Assessment Software (GEOEAS, 1988), que permite el análisis estadístico básico de la información, la construcción de semivariogramas y la interpolación por medio de *kriging*, incluyendo la estimación de error.

Otros interpoladores, además del *kriging*, fueron utilizados cuando los datos no satisficieron las condiciones necesarias para su uso, como, por ejemplo, la presencia de tendencias en la semivariancia (cf. Davis, 1986). En estos casos se utilizó un algoritmo de *moving average*.

La técnica de promedios móviles—*moving averages*—puede concebirse como una ventana móvil, de manera tal que todos los sitios dentro de la misma contribuyan a la estimación del valor buscado. El valor  $Z^*$  de un sitio no visitado ( $x_i$ ) puede estimarse, de modo general, de la siguiente manera:

$$Z^*(h) = 1/n [Z(x_i)]$$

donde  $n$  es la población.

Un aspecto crítico es, entonces, el tamaño de la ventana, que en realidad es el radio de búsqueda durante la estimación. En el caso del presente estudio, dicho radio—el rango—se obtuvo de semivariogramas estimados con el GEOEAS; en el caso de semivariogramas donde el *sill* no es evidente, se consideró una distancia cuatro veces mayor que la promedio entre puntos de muestreo, para asegurar que alrededor de ocho puntos fueran considerados en la estimación. El número de puntos usados al aplicar un interpolador de promedios móviles—*moving averages*—puede variar entre 4 y 12, pero es usualmente entre 6 y 8 (Burrough, 1986). Se ponderó la distancia entre puntos, usando una función del inverso cuadrado de la distancia, y se llevó a cabo en un sistema de información geográfica (SIG), basado en computadora personal (ILWIS, 1992). Se derivó dos mapas más de compilación cartográfica y bibliográfica y de trabajo de campo. El primero refiere áreas diferenciadas de acuerdo con la calidad del agua utilizada en la irrigación. El segundo diferencia las áreas en función del tiempo que llevan regándose.

Se derivó dos mapas más de compilación cartográfica y bibliográfica y de trabajo de campo. El primero refiere áreas diferenciadas de acuerdo con la calidad del agua utilizada en la irrigación. El segundo diferencia las áreas en función del tiempo que llevan regándose.

Cuatro mapas adicionales—porcentaje de arcilla, limo, arena y profundidad del suelo—fueron obtenidos por interpolación con promedios móviles pesados—*weighted moving averages*. Los datos corresponden a análisis de textura realizados

en 1983. El mapa de profundidad del suelo se obtuvo al interpolar los valores de la máxima profundidad muestreada en cada sitio.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### INTERPOLACIÓN

Los mapas de boro, conductividad eléctrica, pH, materia orgánica y cloruros fueron obtenidos aplicando *kriging*; para cada parámetro se obtuvo, igualmente, mapas mostrando valores de desviación estándar del *kriging* (DEK).

Los mapas que muestran los valores de DEK pueden considerarse como mapas que zonifican el error de la estimación. En general, los valores más bajos están localizados hacia el interior de la zona de estudio, donde la densidad de puntos es mayor, y se incrementan hacia el exterior, donde la densidad de los mismos disminuye.

Al evaluar el comportamiento de los parámetros interpolados, deben ser considerados dos aspectos: los valores estimados en sí mismos y las tendencias regionales.

Los valores de pH (Figura 1) son moderadamente alcalinos a todo lo largo de la zona de estudio. El área puede dividirse en dos partes, de menos y de más de 8 con variaciones de más y menos 0.5 de pH. La parte occidental muestra valores inferiores a 8, mientras que son superiores hacia el noreste. Los valores de DEK son predominantemente inferiores a 0.08 en toda el área (Figura 2).

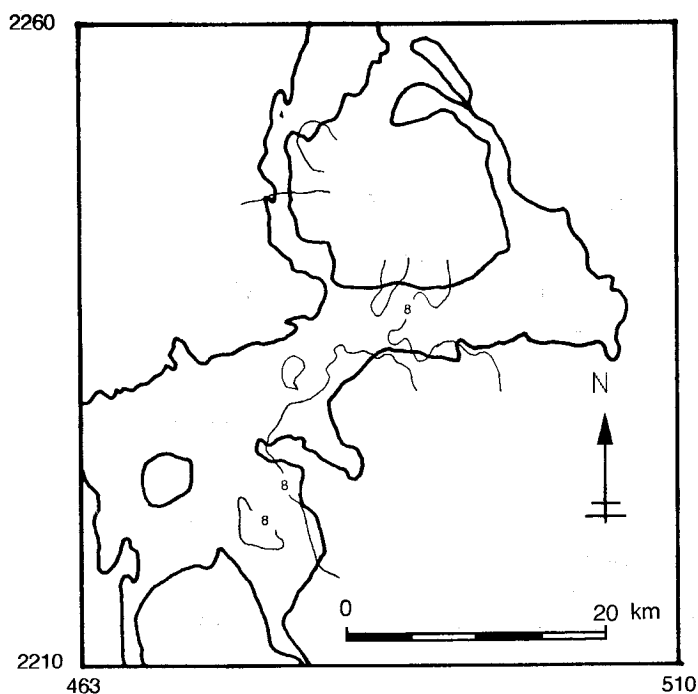


Figura 1.- Interpolación del valor pH en suelos (0-30 cm). Coordenadas en km (UTM).

— Límite del DR03  
 — Kriging GEOEAS

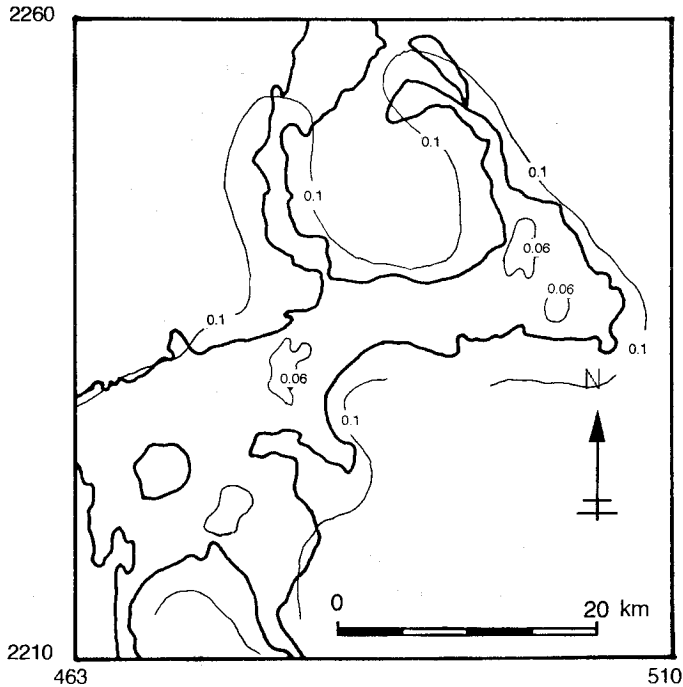


Figura 2.- Desviaciones estándar de la interpolación del valor p'H. Misma explicación que la del pie de la Figura 1.

Las concentraciones de boro son generalmente inferiores a los límites tóxicos en suelos—2 mg/kg—referidos por Pagel y colaboradores (1982). Solamente algunos sitios exceden esta cifra. Sin embargo, al considerar los valores generales de la base de datos, y no solamente las medianas, más de 48 sitios de muestreo consignan valores frecuentemente superiores a los 2 mg/kg; estos sitios no muestran una distribución espacial preferente. El hecho de que no se haya reportado casos de toxicidad por boro puede explicarse por la influencia de otros parámetros, tales como contenido de materia orgánica, arcilla,  $\text{Ca}^{2+}$ , así como valores de pH ligeramente alcalinos, que tienden a favorecer la fijación y adsorción de boro (Pagel *et al.*, *op. cit.*). Además, las buenas condiciones del drenaje del suelo en la mayor parte del distrito pueden contribuir, con los parámetros señalados, a que el límite de toxicidad referido sea, para la zona de estudio, en realidad superior al reportado en la literatura.

El mapa de concentraciones de boro (Figura 3) muestra dos áreas de valores relativamente más elevados—>1.4 ppm—una al suroeste y otra en el extremo oriental del distrito, ambas coincidiendo con áreas donde el manto freático se encuentra a menos de 1 m de profundidad, de acuerdo con datos de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (1981) y, por tanto, muestran drenaje deficiente. Los valores más bajos se consignan para la parte occidental, y los valores de DEK son, en general, inferiores a 0.2 (Figura 4).

Los valores de cloruros varían entre 4 y 5.5 meq/l, siendo superiores hacia el este (Figura 5). Los valores de DEK son inferiores a 0.5 (Figura 6). La conductividad eléctrica (Figura 7), como es de esperarse, se comporta de manera similar:

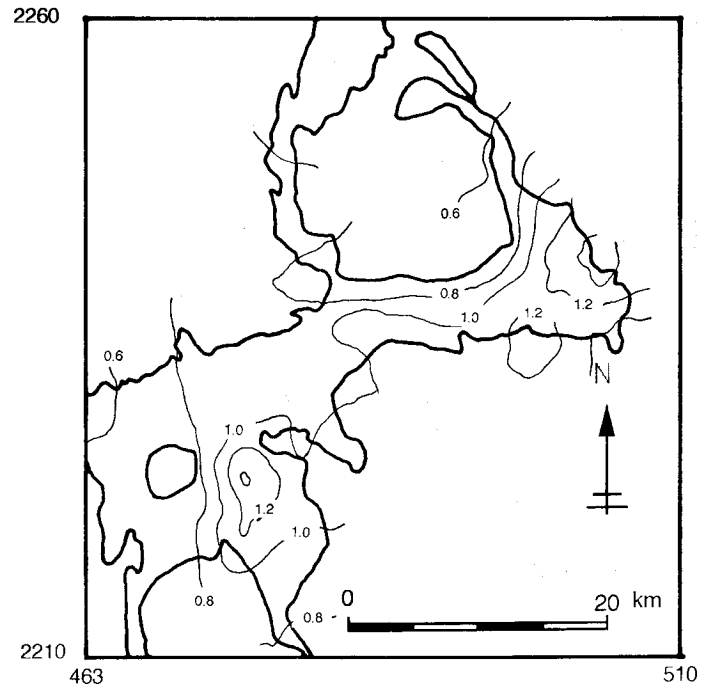


Figura 3.- Interpolación del boro susceptible de ser extraído [mg/kg] en los suelos (0-30 cm). Misma explicación que la del pie de la Figura 1.

relativamente inferiores al suroeste—<1.2 mmohs/cm—y superiores al este—>1.4 mmohs/cm. Sin embargo, algunos sitios registran valores frecuente y considerablemente superiores a las medianas, aunque demasiado puntuales para ser representados en escala regional. Entre ellos hay algunos sitios en las zonas de San Salvador, Tlahuelilpan, Juandhó, Lagunillas

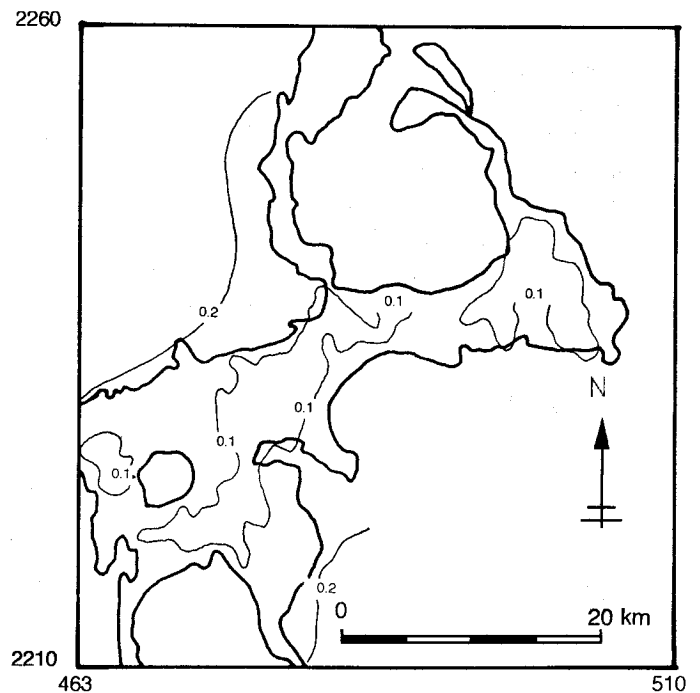


Figura 4.- Desviaciones estándar de la interpolación del boro susceptible de ser extraído. Misma explicación que la del pie de la Figura 1.

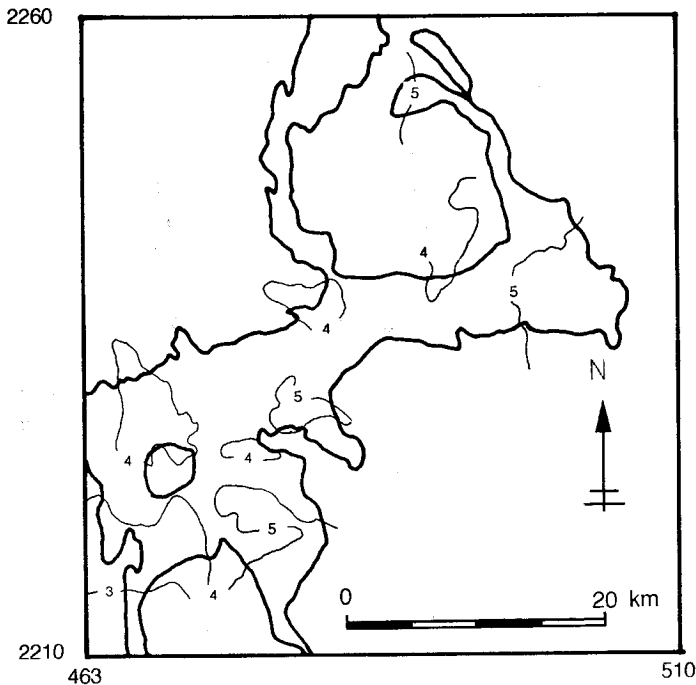


Figura 5.- Interpolación de cloruros en el extracto de saturación [meq/l] de 0 a 30 cm de profundidad. Misma explicación que la del pie de la Figura 1.

y aquéllas regadas por el canal Xochitlán, en los que se consigna valores de 4 a 8 mmhos/cm, y dos sitios en San Salvador y Tlahuelilpan, en los que se registra valores mayores que 8 mmhos/cm. Los valores de DEK son menores que 0.1 (Figura 8).

El porcentaje de materia orgánica (Figura 9) es mayor hacia el centro del área—mayor que 4 %—y disminuye hacia

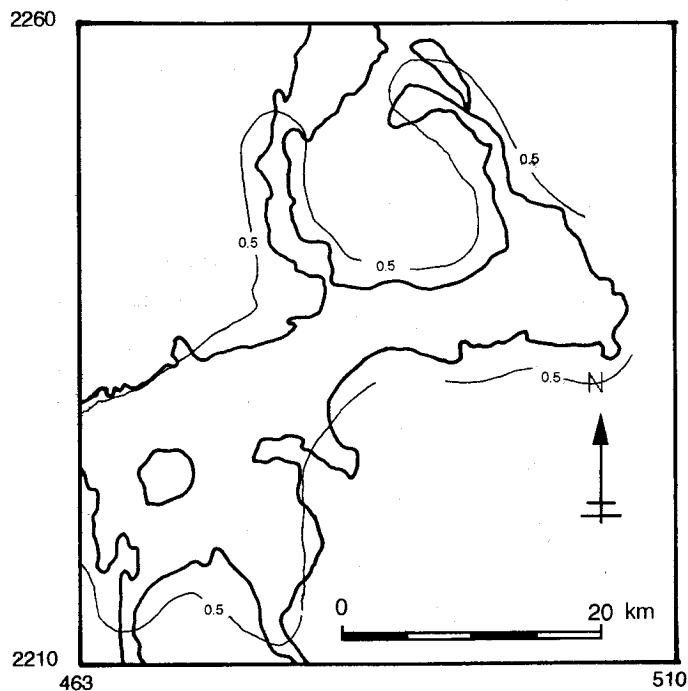


Figura 6.- Desviaciones estándar de la interpolación de cloruros en el extracto de saturación [meq/l]. Misma explicación que la del pie de la Figura 1.

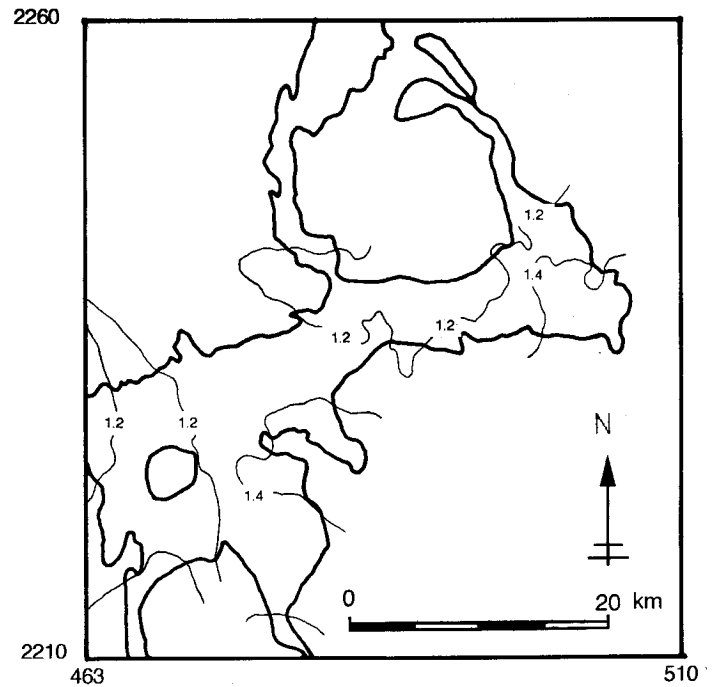


Figura 7.- Interpolación de la conductividad eléctrica en el extracto de saturación [mmhos/cm] de 0 a 30 cm de profundidad. Misma explicación que la del pie de la Figura 1.

los extremos oriental y occidental—menor que 3 %. Los valores predominantes de DEK son menores que 0.5 (Figura 10).

Los siguientes cinco mapas fueron obtenidos a partir de un interpolador de promedios móviles pesados—*weighted moving averages*; en este caso, no se cuenta con valores de desviación estándar para la estimación.

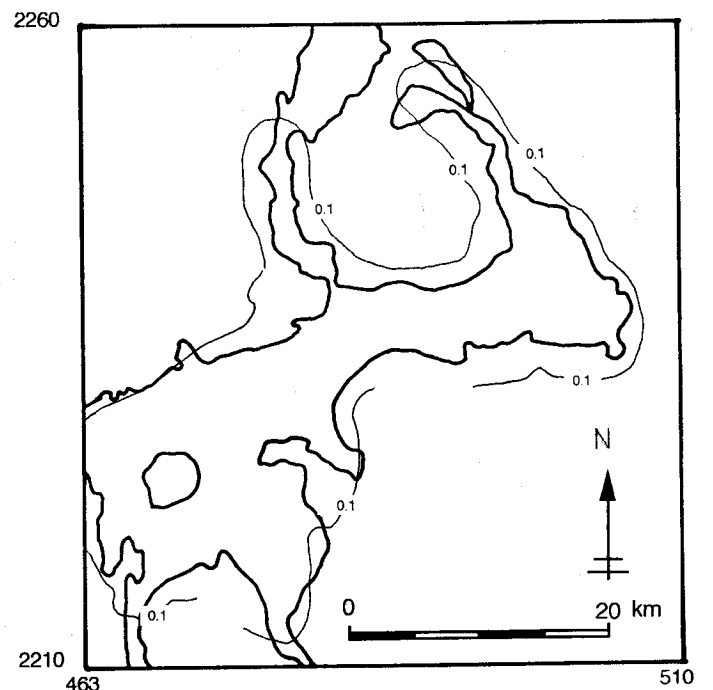


Figura 8.- Desviaciones estándar de la interpolación de conductividad eléctrica en el extracto de saturación [mmhos/cm]. Misma explicación que la del pie de la Figura 1.

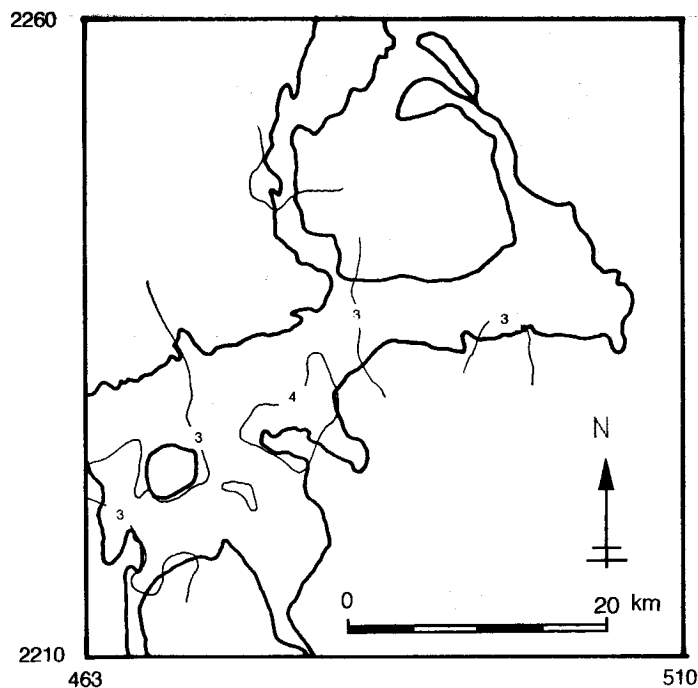


Figura 9.- Interpolación del contenido de materia orgánica [%] de 0 a 30 cm de profundidad. Misma explicación que la del pie de la Figura 1.

El mapa de carbonatos totales (Figura 11) muestra tres áreas donde se consigna valores relativamente altos, no existiendo, de hecho, áreas libres de carbonatos. Estas áreas coinciden con pies de monte de elevaciones circundantes a la planicie, compuestos de roca caliza.

Los suelos en la zona de estudio son moderadamente profundos y profundos (Figura 12). Predominan los suelos con

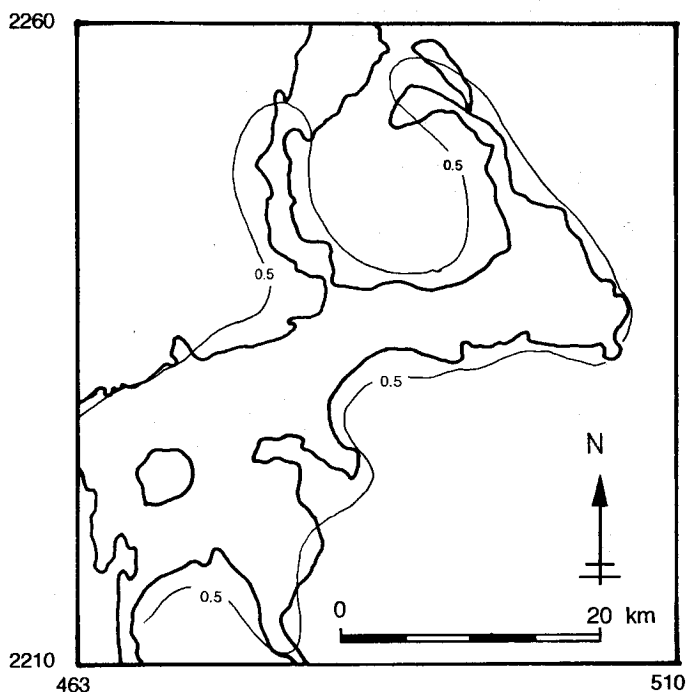


Figura 10.- Desviaciones estándar de la interpolación del contenido de materia orgánica [%]. Misma explicación que la del pie de la Figura 1.

profundidades superiores a los 60 cm, especialmente al sudeste y noreste. Los suelos someros, localizados hacia el noroeste, están relacionados espacialmente con capas endurecidas —*caliche*— que limitan la profundidad del suelo a menos de 60 cm, y comúnmente a sólo 30-40 cm.

También se obtuvo tres mapas que muestran la distribución de porcentajes de arcilla, limo y arena para los primeros 30 cm (Figuras 13, 14 y 15). De los tres, el mapa de porcentaje de limo muestra valores más homogéneos—predominantemente entre 20 y 40%. El mapa de arena oscila entre 40% al sudeste, y 70% al este, mientras que los contenidos de arcilla varían entre menos de 20% en los suelos del occidente, hasta más de 40% en algunas pequeñas localidades en el centro de la zona.

#### PROCESAMIENTO EN UN SIG

Se incluye tres mapas más, uno de clases texturales del suelo, uno de tiempo bajo riego y otro de tipos de agua usados en irrigación.

El mapa de clases texturales del suelo fue obtenido mediante la aplicación de operadores booleanos a los mapas de arcilla, limo y arena, con base en las especificaciones del triángulo de texturas del United States Department of Agriculture (USDA, 1988, p. 470). El uso de operadores lógicos está basado en la lógica booleana y representa un procedimiento común para el manejo de la información en el ambiente de los SIG (cf. Burrough, 1986). El mapa obtenido (Figura 16) muestra el predominio de dos clases texturales: arcillosa y franca. Más del 75% de los suelos en la zona tiene textura franca, siendo la franco-arcillosa-arenosa la predominante en toda la región—aproximadamente 67%. Los suelos arcillosos cubren alrededor del 22% del área, siendo la textura franco-arcillosa la más representativa del grupo. El resto del área está cubierto por suelos de textura franco-arenosa y arenoso-franca.

La Figura 17 agrupa las tierras agrícolas, en función del tiempo al que han estado sujetas al riego con aguas residuales. Como se muestra en la Figura 18, tuvieron lugar dos períodos importantes de crecimiento, aunque el distrito ha crecido constantemente desde su origen. El primer período se refiere al origen mismo del distrito de riego, cuando más de 20,000 ha fueron abiertas al riego sistemático hacia el año de 1900. El segundo período, durante los años 70, incorpora un número de hectáreas superior al del primer período, en buena medida dentro de los límites actuales del DR03. En los próximos años se espera un tercer período de importante crecimiento.

Se definió nueve áreas dentro del distrito, con base en la calidad del agua utilizada en el riego agrícola (Figura 19). La Figura 20 muestra una caracterización general del comportamiento de cuatro parámetros a lo largo del año—pH, cloruros, conductividad eléctrica y boro. Los datos corresponden a los valores de mediana de ocho años consecutivos—1978 a 1985—y fueron facilitados igualmente por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (1992).

**Carbonatos totales [%]**

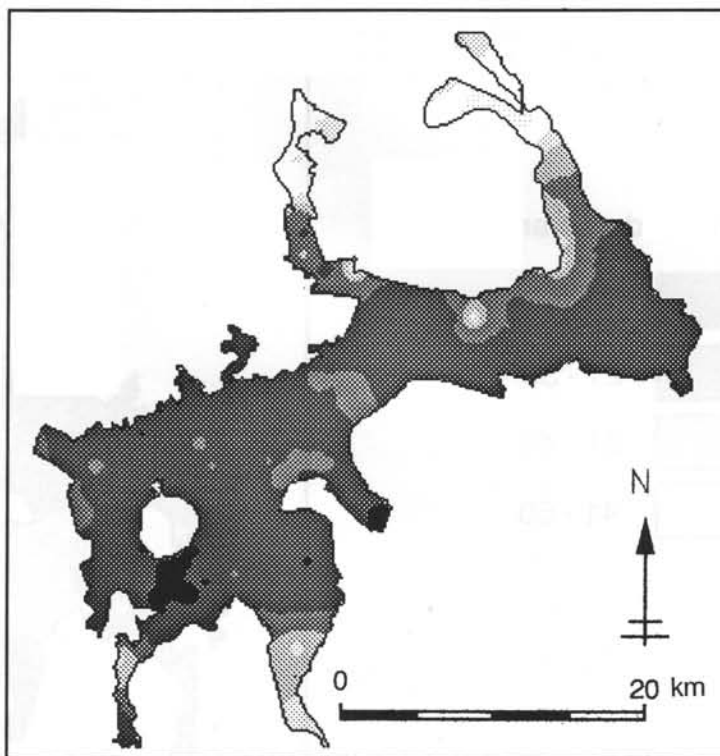
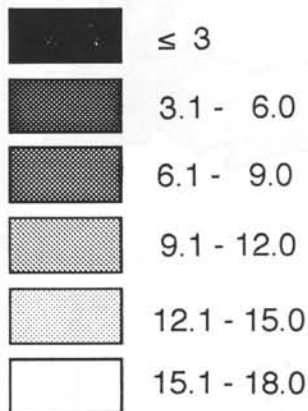


Figura 11.- Distribución de los contenidos totales de carbonato de calcio en los suelos del DR03, según datos de la SARH (1992), de 0 a 30 cm de profundidad.

Como se puede esperar, el comportamiento de los parámetros en las presas—Requena y Endhó—es más estable que a lo largo de los canales. La presa Requena, que almacena predominantemente agua pluvio-fluvial, consigna poca variación a lo largo del año y, asimismo, los valores más bajos de

boro, conductividad eléctrica y cloruros de los nueve tipos considerados. La presa Endhó, donde las aguas negras almacenadas reciben un tratamiento primario por decantación, registra también valores estables a lo largo del año, aunque superiores a los consignados en la presa Requena. El emisor

**Profundidad del suelo [cm]**

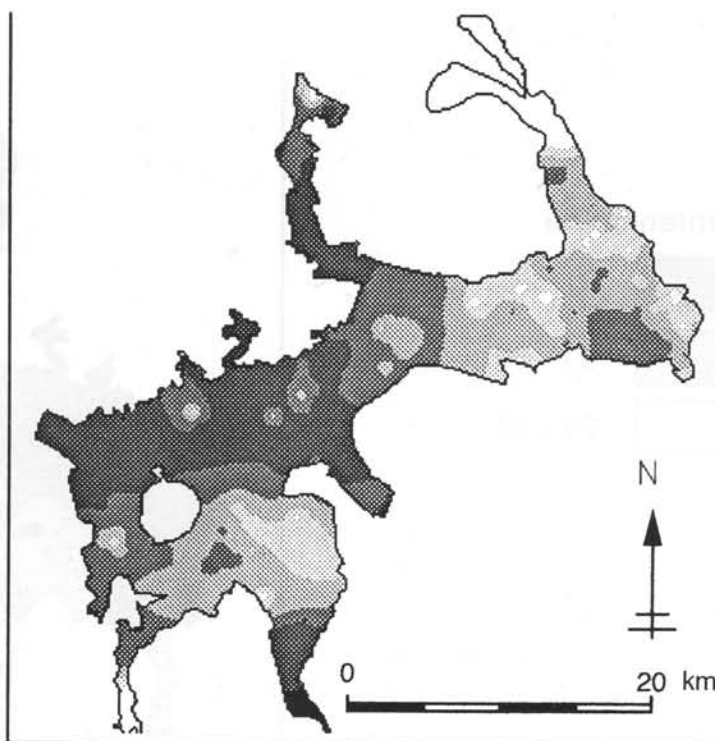
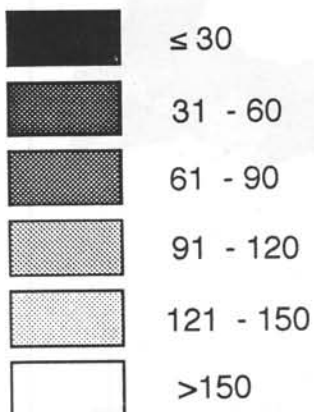


Figura 12.- Distribución de la profundidad de los suelos del DR03, según datos de la SARH (1992).

**Contenido de arcilla [%]**

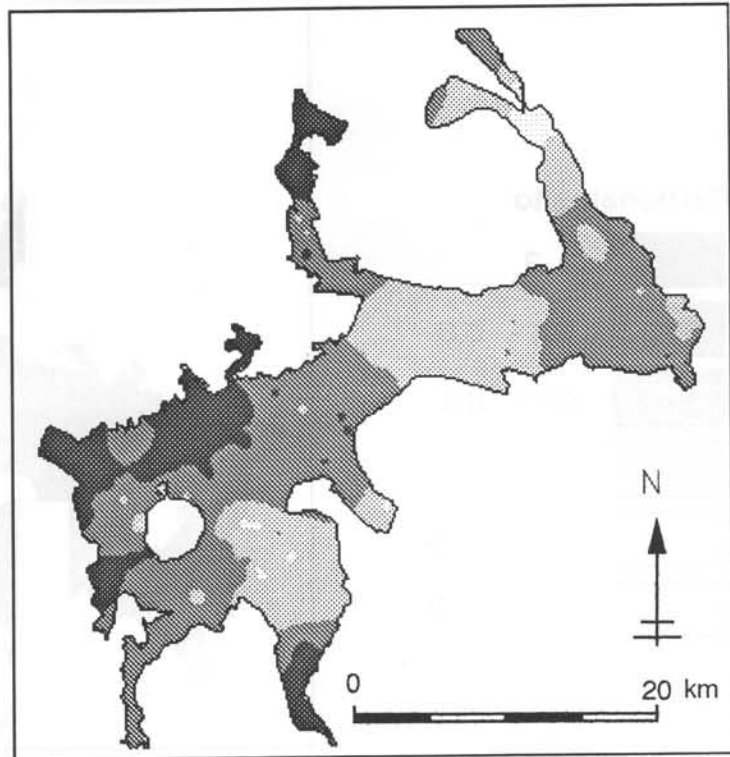
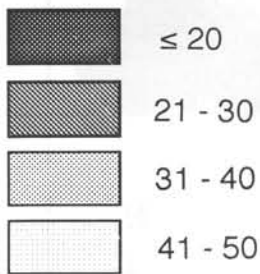


Figura 13.- Distribución del contenido de arcilla en los suelos del DR03, según datos de la SARH (1992), de 0 a 30 cm de profundidad.

central del drenaje profundo es menos estable que los dos anteriores en el caso del boro, aunque el comportamiento de la conductividad eléctrica y de los cloruros es comparable.

Los demás tipos están caracterizados por ser menos estables que los tres anteriores, lo cual puede explicarse por la

compleja dinámica de la distribución del agua de riego dentro del distrito, que ocasiona que diversas proporciones de agua provenientes de diversas fuentes sean mezcladas a lo largo de los canales. Por otra parte, las aguas provenientes de Tequixquiac—residuales— tienden a registrar valores que, aunque

**Contenido de limo [%]**

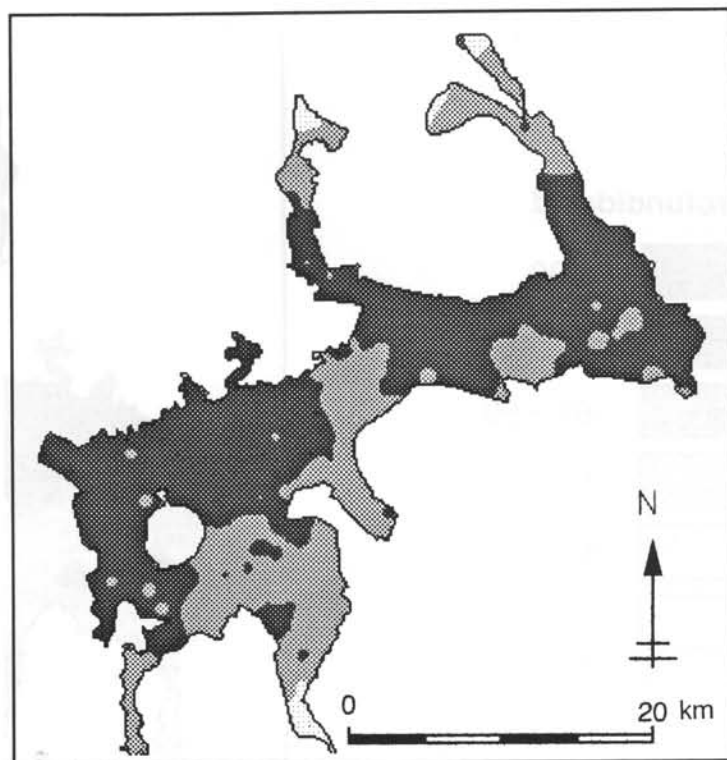
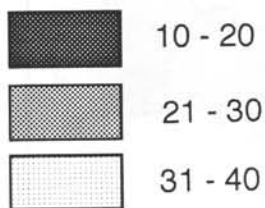


Figura 14.- Distribución del contenido de limo en los suelos del DR03, según datos de la SARH (1992), de 0 a 30 cm de profundidad.

**Contenido de arena [%]**

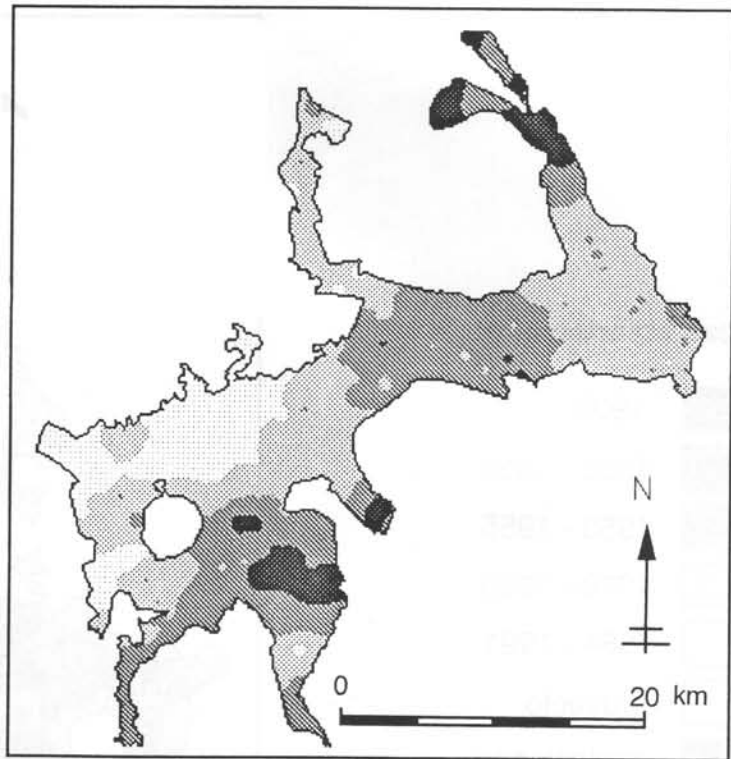
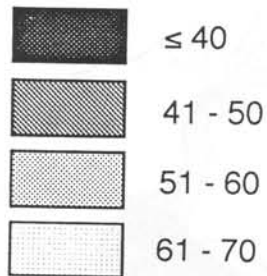


Figura 15.- Distribución del contenido de arena en los suelos del DR03, según datos de la SARH (1992), de 0 a 30 cm de profundidad.

erráticos, resultan ser relativamente altos si se les compara con los otros tipos. Dado que esta fuente de agua residual aporta a la mayoría de los canales incluidos en la clasificación, bien pudiera ser la causa de los valores elevados consignados en

cada caso.

La Figura 20d refiere valores de pH bastante homogéneos para todas las fuentes, mismos que varían, en lo general, de neutros a ligeramente alcalinos.

**Texturas**

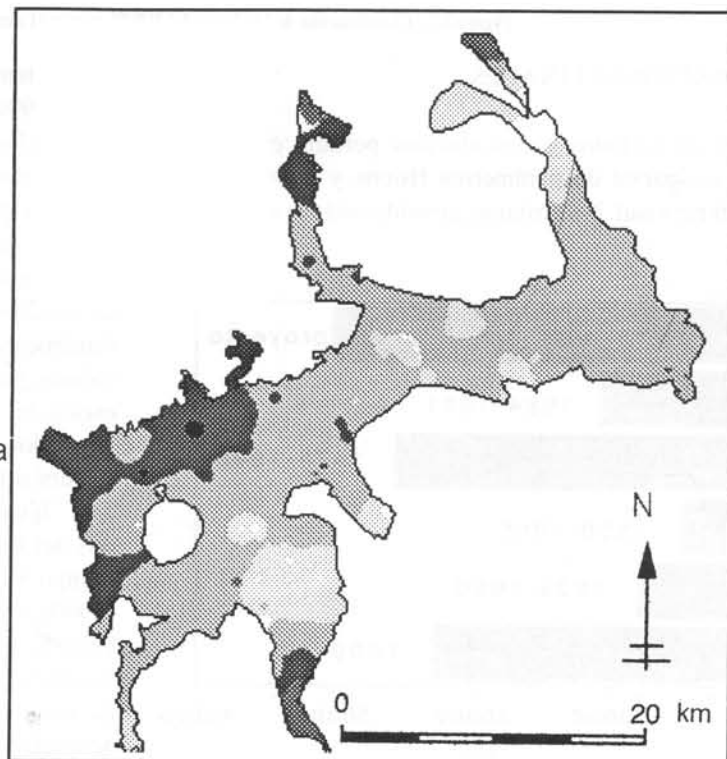


Figura 16.- Distribución de las texturas de los suelos en el DR03, según datos de la SARH (1992), de 0 a 30 cm de profundidad.



### Áreas abiertas al riego en:

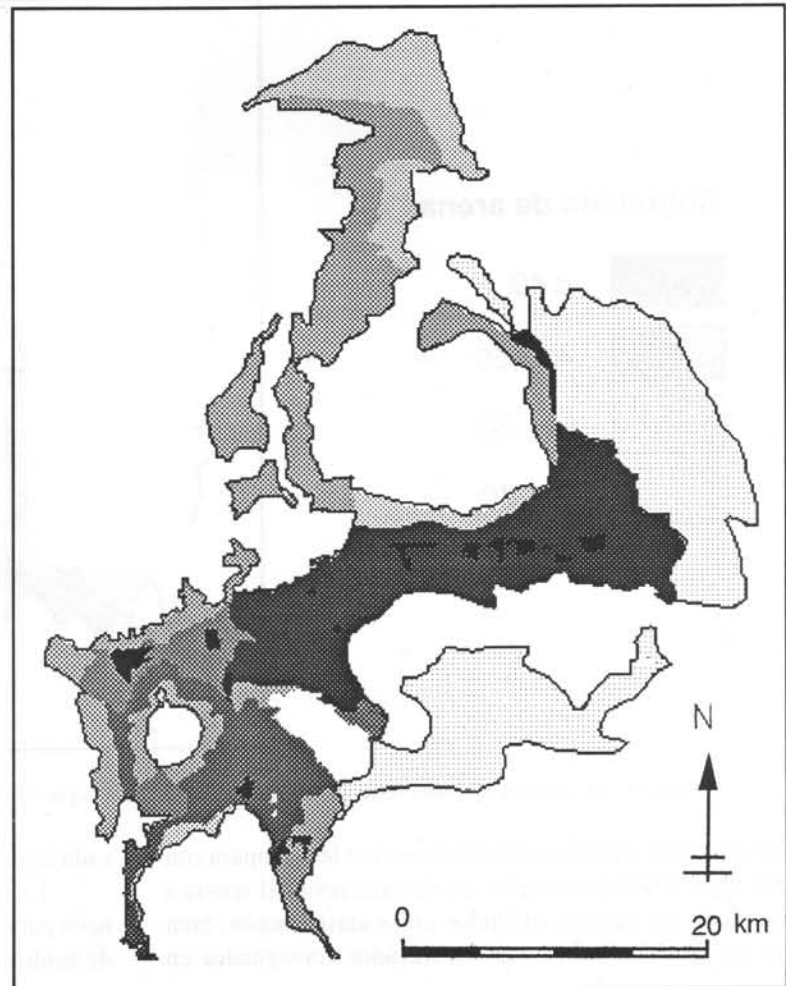
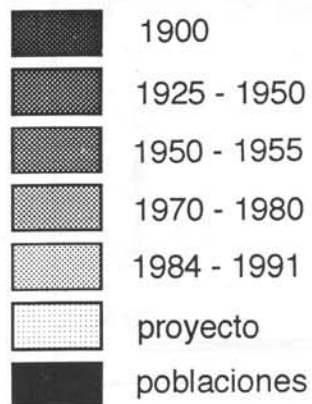


Figura 17.- Clasificación de las áreas del DR03, según el tiempo que llevan bajo riego.

### CONSIDERACIONES FINALES

El uso de métodos geoestadísticos permite evaluar la dependencia espacial de parámetros físicos y químicos del suelo a nivel regional. No obstante, considerando la alta varia-

bilidad temporal y espacial a distancias cortas (Palacio-Prieto *et al.*, 1994), es recomendable realizar muestreos compuestos en parcelas de 0.5 a 1.0 ha y en diferentes épocas del año. Con las medianas de dichos muestreos, se realizaría una interpolación por medio del *kriging* en bloques (Burgess y Webster, 1980b), para obtener las distribuciones de los parámetros a nivel regional, logrando una regularización de las variaciones temporales y espaciales a nivel parcelario (Webster, 1985). Finalmente, lo que interesa en una cartografía regional son valores promedio de áreas cuya magnitud es dictada por la escala del mapa, y no tanto valores puntuales, como lo son los obtenidos en los muestreos de Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (1992).

Igualmente, resultaría interesante combinar los resultados del *kriging* con la cartografía referente al tipo de agua y tiempo bajo riego, como lo recomiendan Voltz y Webster (1990), sobre todo para aquellos parámetros que muestran una estrecha relación con estas variables, lo cual permitiría una delimitación mejor de zonas. Éste es el caso de la cartografía de metales pesados, los cuales muestran una tendencia de acumulación claramente relacionada con el tiempo bajo riego y el tipo de agua (Siebe y Fischer, 1991).

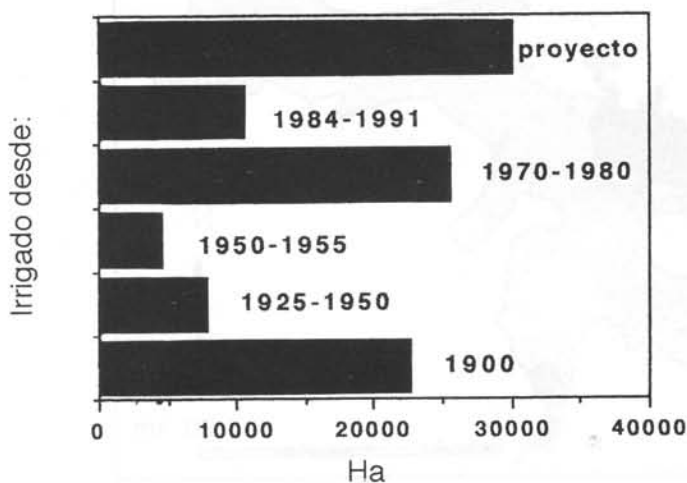


Figura 18.- Periodos de crecimiento del DR03.

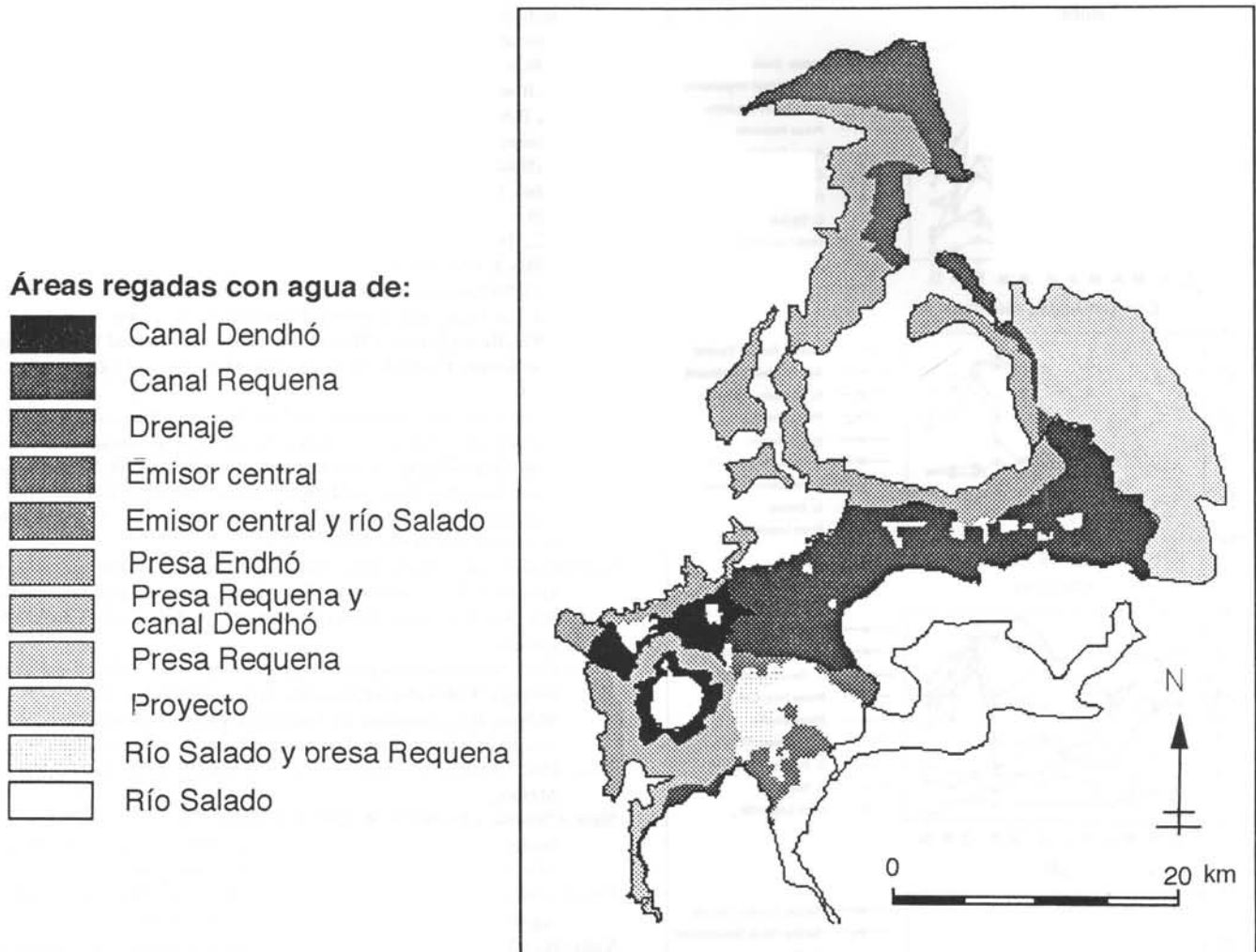


Figura 19.- Clasificación de las áreas del DR03, según el tipo de agua usado para el riego.

Los límites de toxicidad del boro deben ser estudiados y establecidos para la región. Los valores consignados sugieren que los límites internacionalmente permitidos estén siendo sobrepasados con frecuencia, aunque no se ha manifestado hasta ahora la presencia de daños, lo cual puede explicarse por la interacción de las concentraciones del boro con otros parámetros del suelo.

Igualmente, debe darse un seguimiento más preciso a las áreas con problemas de salinidad, las cuales no pudieron delimitarse en escala de este estudio. Para ello, es necesario realizar muestreos con distancias más cortas, en las zonas que registran frecuentemente valores de conductividad eléctrica, en el extracto de saturación, mayores que 4 mmhos/cm y, sobre todo, en aquellas zonas en las que se sobrepasa los 8 mmhos/cm, como sucede en la zona de San Salvador y Tlahuelilpan—sitios 53 y 183.

Finalmente, se considera que la base de datos cartográfica presentada en este estudio pueda ser manejada en el contexto de un SIG, para establecer las relaciones espaciales entre los parámetros seleccionados y otros a ser incorporados en la base de datos.

#### AGRADECIMIENTOS

Se agradece la cooperación del Ing. A. Velasco, Jefe del DR03, del Ing. López-Pacheco y del Biól. L. Hernández, del Departamento de Riego y Drenaje del mismo distrito, quienes facilitaron los datos utilizados durante el estudio.

El Prof. Dr. A. Zinck, del ITC-Enschede, de los Países Bajos; el Prof. Dr. W. Fischer, del Institut f. Bodenkunde u. Standortlehre, de la Univ. Hohenheim, de Alemania; el Dr. Jensen, del Inst. f. Matematik u. Statistik, de la Univ. Hohenheim, de Alemania; y el Dr. G. Bocco, del Colegio de la Frontera Norte, revisaron el manuscrito y aportaron valiosas sugerencias para mejorar su contenido.

La Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM, la Deutscher Akademischer Austauschdienst y la Gottlieb-Daimler und Karl-Benz-Stiftung financiaron parcialmente los trabajos realizados.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Burgess, T.M., y Webster, Richard, 1980a, Optimal interpolation and isarithmic

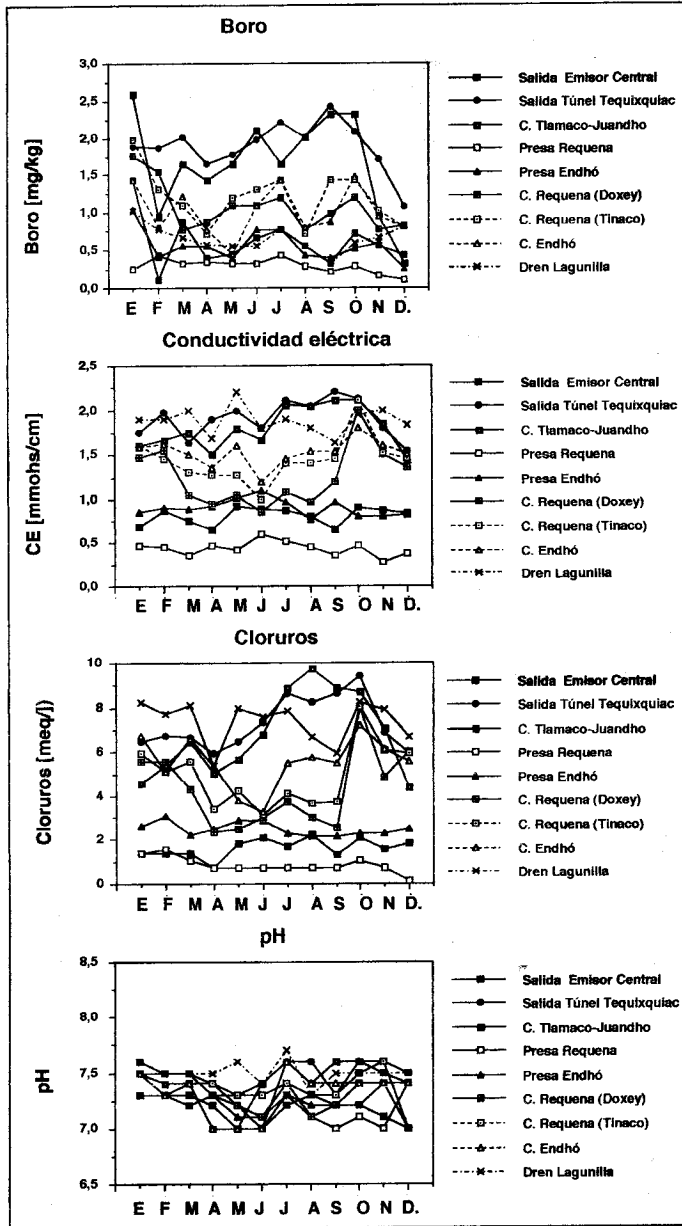


Figura 20.- Variación anual de los parámetros boro, conductividad eléctrica, cloruros y pH en las aguas de riego del DR03.

mapping of soil properties; I, The semivariogram and punctual kriging: *Journal of Soil Science*, v. 31, p. 315-331.

——1980b, Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties; II, Block kriging: *Journal of Soil Science*, v. 31, p. 333-341.

Burrough, P.A., 1986, *Principles of geographical information systems for land resources assessment*: Gran Bretaña, Clarendon Press, Oxford Science Publications, 194 p.

Clark, Isabel, 1979, *Practical geostatistics*: Londres, Applied Science Publishers, 129 p.

Davis, J.C., 1986, *Statistics and data analysis in Geology*: Nueva York, John Wiley & Sons, 646 p.

GEOEAS, 1988, *Geostatistical Environmental Assessment Software User's Manual*: Las Vegas, Environmental Protection Agency, 20 p.

ILWIS, 1992, *Ilwis 1.3, User's Manual, The Integrated Land and Water Information System*: Enschede, Holanda. ITC, Manual, v. 1, 6.122 p.; v. 2, A.45 p.

INEGI, 1984, [Hoja] Mixquiahuala (F14-C89), Hidalgo y México: México, D.F., Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Dirección General de Geografía, Carta Edafológica escala 1:50,000, 1ª impresión.

Pagel, Hans; Enzmann, Josef; y Mutscher, Horst, 1982, *Pflanzennährstoffe in tropischen Böden- ihre Bestimmung und Bewertung*: VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlín, 272 p.

Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1976, *Estudio agrológico complementario del Distrito de Riego Núm. 03 de Tula*, Hidalgo: México, D.F., Secretaría de Recursos Hidráulicos, Dirección de Agrología, Informe del estudio, 66 p. (inédito).

——1981, *Actualización del estudio geohidrológico del Valle del Mezquital*, Hidalgo. Elaborado por Geocalli, S.A. Contrato No. GZA-81-68-GD: México, D.F., Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Subdirección de Infraestructura Hidráulica, Informe del estudio, 167 p. (inédito).

——1992, *Análisis de rutina en suelos: DDR03, Mixquiahuala*, Hidalgo, México.

Siebe, Christina, y Fischer, W.R., 1991, *Schwermetallbelastung von Böden-durch landwirtschaftliche Nutzung städtischer Abwässer in Zentral-Mexiko*: *Mitteilungen Dt. Bodenkundl. Gesellsch.*, v. 66, p. 1189-1192.

USDA, 1988, *Soil Taxonomy*: Washington, D.C., United States Department of Agriculture, Handbook núm. 436, 754 p., 3ª reimpression.

Voltz, M., y Webster, Richard, 1990, *A comparison of kriging, cubic splines and classification for predicting soil properties from sample information*: *Journal of Soil Science*, v. 41, p. 473-490.

Webster, Richard, 1985, *Quantitative spatial analysis of soil in the field*: *Advances in Soil Science*, v. 3, p. 1-70.

Manuscrito presentado: 3 de mayo de 1993.

Manuscrito corregido devuelto por el autor: 24 de septiembre de 1993.

Manuscrito aceptado: 21 de enero de 1994.