



24
2e1

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MEXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA**

**ESTUDIO VARIOGRAFICO EXPLORATORIO DEL ESTADO
ACTUAL DE LA SALINIDAD Y FERTILIDAD, DE UN SUELO DE
TEMPORAL DEL ESTADO DE QUERETARO.**

**T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
B I O L O G O
P R E S E N T A
ALEJANDRO JIMENEZ MAXIMILIANO**

México, D.f.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

1994



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

DEDICATORIA

A mis Padres

**Alejandro Jiménez Nieto
Reyna Maximiliano Sanchez**

Como un reconocimiento a su esfuerzo amor y comprensión lo que ha consolidado mi formación. Para ellos mi eterno agradecimiento y admiración.

A mis Hermanos, todos

por su tolerancia.

A los agricultores en general como tributo de admiración por sus nobles esfuerzos en bien de nuestra patria.

AGRADECIMIENTOS

Al Colegio de Postgraduados (CP) por el apoyo brindado en la realización de mis estudios.

A la sección de Química del Suelo del Colegio de Postgraduados Chapingo, México por las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo.

A la M. en C. María del Carmen Olmedo Bolaños por las facilidades, observaciones y sugerencias, que me hizo como directora académica de este trabajo de investigación, así como su apreciable amistad.

Al M. en C. Lenom Cajuste Bontemps y al M. en C. David Cristobal Acevedo por su valiosa enseñanza y asesoría en el desarrollo del presente trabajo y sus comentarios que siempre fueron un estímulo.

Al Biol. Ruben Zulbaran Rosales por sus valiosos consejos y sugerencias durante la realización de los trabajos de campo y laboratorio, así como su empeño en la revisión y elaboración de esta tesis.

Al Ing. Ernesto Osoreo Cardenas y a todo el personal de laboratorio de la sección de Química del Suelo del CEDAF que me ayudo cuando así lo requeri.

A todas aquellas personas que de manera directa e indirectamente brindaronme ayuda, facilidades y cooperación durante la realización de este trabajo.

CONTENIDO

	página
Indice de figuras	i
Indice de cuadros	ii
Resumen	iii
1. Introducción	1
2. Revisión de literatura	
2.1 Variabilidad del suelo	
2.1.1 Factores de formación del suelo	5
2.1.2 Manejo del suelo	6
2.1.3 Variabilidad de las propiedades físicas y químicas del suelo	7
2.1.4 La salinidad del suelo	
2.1.4.1 Origen de las sales en el suelo	10
2.1.4.2 Efectos de la salinidad sobre el suelo	10
2.1.4.3 Clasificación de los suelos salinos	
2.1.4.3.1 Clasificación norteamericana	11
2.1.5 Parámetros estadísticos relacionados con la variabilidad	13
2.1.6 Geostatística y su aplicación en la ciencia del suelo	15
2.2 Teoría de las variables regionalizadas	
2.2.1 Concepto de variable regionalizada	17
2.2.2 Características de las variables regionalizadas	18
2.2.3 Correlación espacial	19
2.2.4 Estacionaridad	20
2.2.5 Deriva y residual	23
2.2.6 El Semivariograma	
2.2.6.1 Descripción del semivariograma	25
2.2.6.2 Clasificación de los semivariogramas	27
2.2.6.3 Propiedades de la estructura de los semivariogramas	28
2.2.6.4 Modelos de ajuste para semivariogramas	31
2.2.6.5 Selección al mejor semivariograma	33
2.2.6.6 Relación entre variabilidad y muestreo	36

3.- Planteamiento del problema y objetivos.	41
4.- Características generales de la zona de estudio.	
Localización	44
Clima	44
Geología	44
Hidrología	49
Topografía	49
Suelos	51
Actividad agrícola	51
Vegetación	51
5.- Material y Métodos.	
5.1 Diseño del esquema de muestreo para variografía	
5.1.1 Consideraciones generales	52
5.1.2 Esquema de muestreo	52
5.2 Trabajo de laboratorio	
5.2.1 Determinación de pH	54
5.2.2 Materia orgánica	54
5.2.3 Conductividad eléctrica	54
5.2.4 Bases intercambiables y solubles	54
5.2.5 Carbonatos, bicarbonatos, cloruros	55
5.2.6 Determinación de sulfatos	55
5.2.7 Determinación de nitrógeno total	55
5.2.8 Capacidad de intercambio catiónico	55
5.2.9 Fósforo asimilable	55
5.3 Procedimiento analítico	
5.3.1 Prueba de normalidad	57
5.3.2 Análisis de la estructura de la variabilidad espacial	
5.3.2.1 Variografía	60
6.- Resultados y Discusión	
6.1 Análisis exploratorio de los datos	
6.1.1 Distribución de los datos	63
6.2 Estructura de la variabilidad espacial	
6.2.1 Semivarianza	70

6.3 Interpretación de los resultados químicos obtenidos en los análisis de laboratorio	95
7.- Conclusiones y Sugerencias	
7.1 Conclusiones	109
7.2 Sugerencias	111
7.3 Consideraciones generales	113
8.- Bibliografía	115
Apendice A.	
Apendice B.	
Apendice C.	

INDICE DE FIGURAS

Figura	Página	
1	Tipos de continuidad	19
2	Variabilidad "en promedio", de una variable	25
3	Semivariograma típico y sus elementos	27
4	Tipos de semivariogramas	29
5	Efectos de anisotropía para variogramas con umbral y sin umbral.	30
6	Localización geográfica del área de estudio.	45
7	Area de estudio.	46
8	Gráfica de temperatura-precipitación de la estación meteorológica San Juan del Río, Gro.	47
9a	Mapa geológica del área de estudio	48
9b	Mapa edafológica del área de estudio	50
10	Esquema de muestreo.	53
11	Diagramas de casillas de las variables químicas A) 0-20; B) 20-40 cms.	66
12	Semivariogramas experimental (*) y modelos ajustados (-) para el pH del suelo A) 0-20; B) 20-40 cm.	73
13	Semivariogramas experimental (*) y modelos ajustados (-) de la Conductividad Eléctrica del suelo A) 0-20; B) 20-40 cm.	74
14	Semivariogramas experimental (*) y modelos ajustados (-) de Bicarbonatos del suelo A) 0-20; B) 20-40 cm.	75
15	Semivariogramas experimental (*) y modelos ajustados (-) de Cloruros del suelo A) 0-20; B) 20-40 cm.	77
16	Semivariogramas experimental (*) y modelos ajustados (-) de Sulfatos del suelo A) 0-20; B) 20-40 cm.	78
17	Semivariogramas experimental (*) y modelos ajustados (-) de Calcio soluble A) 0-20; B) 20-40 cms.	79
18	Semivariogramas experimental (*) y modelos ajustados (-) de Magnesio soluble A) 0-20; B) 20-40 cm.	81
19	Semivariogramas experimental (*) y modelos ajustados (-) de Sodio soluble A) 0-20; B) 20-40 cm.	82

20	Semivariogramas experimental (*) y modelos ajustados (-) de Potasio soluble A) 0-20; B) 20-40 cm.	83
21	Semivariogramas experimental (*) y modelos ajustados (-) de la Materia Orgánica A) 0-20; B) 20-40 cm.	84
22	Semivariogramas experimental (*) y modelos ajustados (-) de la C. I. C. del suelo A) 0-20; B) 20-40 cm.	86
23	Semivariogramas experimental (*) y modelos ajustados (-) de Calcio interc. del suelo A) 0-20; B) 20-40 cm.	87
24	Semivariogramas experimental (*) y modelos ajustados (-) de Magnesio interc. del suelo A) 0-20; B) 20-40 cm.	88
25	Semivariogramas experimental (*) y modelos ajustados (-) de Sodio interc. del suelo A) 0-20; B) 20-40 cm.	89
26	Semivariogramas experimental (*) y modelos ajustados (-) de Potasio interc. del suelo A) 0-20; B) 20-40 cm.	90
27	Semivariogramas experimental (*) y modelos ajustados (-) de Fósforo asimilable A) 0-20; B) 20-40 cm.	92
28	Semivariogramas experimental (*) y modelos ajustados (-) de Nitrógeno total del suelo A) 0-20; B) 20-40 cm.	93
29	Mapa de isolíneas para pH del suelo por interpolación Kriging	96
30	Mapa de isolíneas para bicarbonatos del suelo por interpolación Kriging	99
31	Mapa de isolíneas para materia orgánica del suelo por interpolación Kriging	102
32	Mapa de isolíneas para nitrógeno total del suelo por interpolación Kriging	104

INDICE DE CUADROS

Cuadro	página
1 Propósitos y desventajas de la estadística clásica.	13
2 Esquema del procedimiento analítico empleado en la obtención de semivariogramas	58
3a Resultados de la estadística univariada y dispersión Bondad de ajuste a la distrib. normal (o log-normal) para los datos de las variables químicas de 0-20 cms.	64
3b Resultados de la estadística univariada y dispersión. Bondad de ajuste a la distrib. normal (o log-normal) para los datos de las variables químicas de 20-40 cms.	65
4 Valores de sesgo y kurtosis para los datos de las variables químicas de 0-20 y 20-40 cms.	68
5a Resultados de los parámetros geoestadísticos de los modelos ajustados 0-20 cm.	71
5b Resultados de los parámetros geoestadísticos de los modelos ajustados 20-40 cm.	72

RESUMEN

La metodología empleada para identificar o cuantificar la variabilidad del suelo había sido la estadística clásica, sin embargo estos planteamientos no toman en cuenta la dependencia espacial, así como la distancia e interacción de las propiedades de los suelos, lo cual si es considerado por la geoestadística.

Esta nueva metodología permite conocer la variabilidad espacial de la salinidad mediante un análisis estructural, a través de la generación de semivariogramas como medida de continuidad, se puede explicar el comportamiento de la variación espacial, lo que permite con ello modelar y predecir las variaciones espaciales de una determinada variable, en un sitio no muestreado (Camargo, 1989).

El objetivo del presente trabajo es caracterizar la variación espacial de las propiedades químicas del suelo, a través del método geoestadístico, ya que este resulta de interés particular en la aplicación sobre variables del suelo, ya que su evaluación permite encontrar los tamaños de las áreas de disposición espacial homogénea, en el mejor uso del suelo.

El estudio se desarrolló en un terreno de temporal de la clase Feozem dedicado al cultivo de gramíneas, del ejido El Carrizo Mpio. de San Juan del Río, Gro. Las mediciones se hicieron sistemáticamente usando una malla triangular y muestreando en la intersección de la misma, a dos profundidades del suelo (0-20 y 20-40 cm). Las variables estudiadas fueron pH, C.E, CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , y sales solubles determinándose a partir del extracto de saturación relación suelo/agua 1:1, materia orgánica, C.I.C, sales intercambiables, fósforo asimilable y nitrógeno total. Se realizaron pruebas de normalidad usando el estadístico de prueba de Kolmogorov-Smirnov con un nivel de significancia del 95%; la distribución espacial fue analizada utilizando el sistema de programas GEO-EAS, así como la elaboración de un programa en lenguaje pascal, con los que se definieron los variogramas, se ajustaron a ellos los modelos más adecuados, para de esta manera

realizar los mapas de isolíneas a través del método de interpolación kriging.

De acuerdo a los valores obtenidos de las medidas estadísticas, la variabilidad de las propiedades varía de alta a baja, a través del estadístico coeficiente de variación (C.V.) en ambas profundidades. Con variabilidad alta se tienen las variables Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} intercambiable y fósforo asimilable; con variación media fueron la C.E, HCO_3^- , materia orgánica, C.I.C, sales intercambiables y nitrógeno total, y el pH presenta variabilidad baja, presentandose dicha clasificación similar, para ambas profundidades.

Analizando la prueba de normalidad para dichas variables utilizando el estadístico de Kolmogorov-Smirnov los resultados muestran que la distribución de los datos fue heterogénea en ambas profundidades de estudio, donde todas las variables, a excepción del sodio soluble (20-40 cm), se distribuyeron normalmente.

Analizando la variabilidad espacial se pudo constatar que hubo gran semejanza entre los semivariogramas de las variables estudiadas al no mostrar la existencia de estructuras anidadas a distancias pequeñas, indicando la escasa presencia de pequeños agregados, dentro de agregados grandes.

Se detectó estructura espacial definida para las variables pH, HCO_3^- , Cl^- , Ca^{2+} y Mg^{2+} solubles, materia orgánica y nitrógeno total para ambas profundidades y las variables SO_4^{2-} , C.I.C, y Na^+ intercambiable únicamente para los 20-40 cm, mostrando tendencias exponenciales, esféricas y lineales. Para las otras variables dicha estructura espacial fue aleatorio debido principalmente al comportamiento uniforme que presentan las semivarianzas.

De los resultados obtenidos en los análisis químicos de las muestras de suelo se puede deducir lo siguiente:

La alcalinidad registrada en estos suelos es baja trayendo consigo efectos despreciables en el desarrollo de las plantas.

Posee un pH adecuado para un suelo agrícola, trayendo consigo un mayor aprovechamiento de los principales nutrientes.

Los niveles de nitrógeno total, así como de fósforo asimilable por la plantas corresponden a niveles medios y bajos, conformando cada nivel una zona en el área de estudio.

Agrícolamente es un suelo temporalero, climáticamente corresponde a una zona semiseca templada, con lluvias en verano y en el concepto estricto de fertilidad este suelo es de baja fertilidad.

1. INTRODUCCION

El suelo se considera como un sistema heterogéneo, disperso, particulado y poroso. En varios trabajos de investigación se ha reportado que al someter algunas parcelas experimentales "de apariencia uniforme" a ciertos tratamientos, los resultados obtenidos no concuerdan con los esperados lo cual es debido, la mayoría de las veces, a la variabilidad de las propiedades físicas y/o químicas de los suelos (De la loma, 1982; Vauclin, 1983).

La variabilidad de los suelos agrícolas (tanto en tiempo como en espacio) es un factor muy importante ya que es la causa principal de las diferencias en los rendimientos de cultivos en un terreno de apariencia uniforme. Tal variabilidad está dada principalmente por diversos factores entre los que se encuentran: procesos de formación del suelo, tipo y manejo del suelo, lixiviación de nutrimentos, adición de fertilizantes, etc.

El recurso suelo es de gran importancia para la actividad productiva del hombre, por lo que este ha establecido el estudio del mismo, en lo que se refiere a los factores que le redituen mayores beneficios a corto plazo. El factor que se ha considerado más importante es la fertilidad del suelo en el cual se incluyen aspectos de gran importancia, como es la cantidad y disponibilidad de nutrimentos. El estudio de este factor ha derivado en tecnologías tales como: métodos de aplicación de fertilizantes en épocas de fertilización, dosis de fertilización, posición del fertilizante, etc.

Sin embargo la correcta aplicación de dichas tecnologías va a estar en función de la precisión con que se detecte la variabilidad de las propiedades químicas del suelo, a su vez, esta evaluación esta en función de lo adecuado del muestreo para obtener dicha variabilidad.

En la actualidad, uno de los problemas que se tiene en diversas áreas de investigación es la extrapolación de los valores de una variable conocida en puntos específicos hacia otros puntos de dominio. Esta situación se observa en la topografía, salinidad, contenido de metales

pesados, etc.

Una forma de efectuar dichas extrapolaciones o interpolaciones es empíricamente, donde evidentemente estas estimaciones no son muy precisas, además de que si dos personas hacen estos trabajos, partiendo de una misma información, normalmente no se obtienen los mismos resultados. Para evitar lo anterior se requiere entonces de una estimación única y en algún sentido óptima de los valores de las variables, para luego mediante la elaboración de mapas de isolíneas, obtener la mejor representación gráfica de la variable en estudio (Román, 1980).

Los métodos empleados para identificar o cuantificar la variabilidad del suelo había sido la estadística clásica, sin embargo estos planteamientos no proporcionan ninguna información acerca de la dependencia espacial, así como la distancia e interacción de las muestras lo cual origina el uso de conceptos geoestadísticos aplicados a la ciencia del suelo.

Este nuevo método es particularmente apropiado a casos donde se desea obtener mapas de contornos de concentraciones de polutantes, distribución espacial de variables edáficas, u otras variables. Ejemplos de aplicaciones ambientales incluyen: concentraciones de plomo y cadmio en suelos alrededor de sitios de fundidoras de metales, concentración de NO_2^- atmosférico fuera de y en áreas metropolitanas, depositación regional de sulfatos en el agua de lluvia así como la concentración de la salinidad en un suelo afectado por sales, todo esto logrado mediante un análisis estructural, a través de la generación de semivariogramas como una medida de la continuidad se debe explicar el comportamiento de la variación espacial, así como el cuantificarla, lo que permite con ello modelar y predecir las variaciones espaciales de una determinada variable, en un sitio no muestreado. Resulta ser entonces este método sumamente significativo para evaluar la variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas del suelo.

A pesar de los múltiples factores que influyen en la concentración de algún elemento de un área determinada y generalmente solo con datos provenientes de una red espacial de localidades de muestreo, deben tomarse decisiones para el manejo de toda una área.

El propósito central del presente trabajo es aplicar el método geoestadístico, específicamente al estudio de las variables químicas del suelo, así como determinar la distribución y variabilidad espacial de estos, en un suelo de temporal del ejido El Carrizo, Mpio. de San Juan del Río, Estado de Querétaro.

2. REVISION DE LITERATURA.

2.1 Variabilidad del suelo.

Cline (1944) menciona que el suelo no es una masa homogénea, sino mas bien un cuerpo de material heterogéneo y a causa de esto presenta variaciones muy fuertes en sus propiedades tanto fisicas como químicas en sentido vertical y horizontal.

Su fase esta compuesta por elementos mecánicos de diferentes tamaños, formas, composición química y mineralógica. Las propiedades del suelo tienden a ser muy similares cuando son comparadas muestras progresivamente cercanas la una a la otra. Su alcance esta sujeto a la dependencia espacial de las propiedades del suelo.

El arreglo espacial de estas fases (estructura) y su temporabilidad (estabilidad) complican la extrapolación de resultados puntuales a áreas extensas.

La variabilidad en el campo en términos del rendimiento de las cosechas es una consecuencia de la variabilidad en las propiedades genéticas de las plantas en suma con factores entre los que se encuentran: por la topografía del terreno, del contenido variable de la humedad, de las variaciones de fertilidad e, incluso de las prácticas agrícolas anteriores (De la loma, 1982; Bressler *et al*, 1981).

Jenny (1945) y Belobrow (1975) citados por Wilding y Dress (1983) mencionan que la variabilidad espacial puede ser agrupado dentro de dos categorías: Sistemática y al Azar. La variabilidad sistemática es gradual o un cambio marcado en las propiedades del suelo como una función de las formas de la tierra, elementos geomorfológicos y factores de formación del suelo y/o manejo del suelo por el hombre.

Por su parte Van Wambeke y Dudal (1978); Moorman y Kang (1978) y Schargel citados por Wilding y Dress (1983) señalan que la variabilidad sistemática natural esta en función de:

- A.- Formas de la tierra, montañas, terrazas, valles, cuencas, mesetas, etc.
- B.- Elementos geomórficos: desnivel, cima, etc.
- C.- Factores formadores del suelo:
 - C.1.- Cronosecuencias
 - C.2.- Litosecuencias, en función del material parental.
 - C.3.- Toposecuencias, en función de la topografía.
 - C.4.- Biosecuencias, en función a los cambios en la macro o microflora y formas del suelo.
 - C.5.- Clima secuencia, en función del macro y microclima.

La variabilidad sistemática generalmente es muy compleja, difícilmente puede ser expresada analíticamente; es por esto que cuando las causas de las propiedades del suelo no pueden ser conocidas, esta variabilidad es denominada variabilidad al azar.

Cuando el sistema suelo es investigado en gran detalle, una parte de la variación original es considerada como al azar, y otra puede ser reconocida sistemáticamente. La anisotropía vertical y lateral del suelo, que es una variabilidad especial al azar, son las siguientes:

- 1.- Diferenciación litológica.
- 2.- Intensidad diferencial de erosión.
- 3.- Erosión diferencial.
- 4.- Factores biológicos.
- 5.- Hidrología diferencial.
- 6.- Muestreo y errores analíticos.

2.1.1 Factores de formación del suelo.

Ortiz y Ortiz (1984) indican que las personas que tratan con la tierra como fuente de producción se dan cuenta de que hay variaciones en los suelos. El agricultor sabe que la tierra en un campo es diferente a la de otro campo, nota diferencias en la facilidad de labranza y producción o en las fallas de cierto cultivo a desarrollarse en uno o más campos. Todas estas observaciones comunes canalizan nuestra atención a los diferentes

tipos y condiciones de suelo.

En los suelos las variaciones o características que los hacen adaptables para algunos cultivos y no para otros, pueden ser resultados de diversos factores que varían independientemente o en conjunto y originan que el suelo sea una individualidad complicada.

Los factores de formación del suelo son los siguientes: material madre, clima, vegetación, topografía y tiempo.

Peterson y Calvin (1965) citado por Aguilar (1987) señalan que la variación entre unidades de suelo resulta ser gradual, existiendo diferencias aún entre suelos que se desarrollan del mismo material parental y las demás condiciones de formación de suelos similares.

King *et al*, (1983) citado por Kachanosky *et al*, (1985) estudio en detalle las relaciones suelo-topografía para un suelo cultivado en Saskatchewan, Canada y llegó a la conclusión de que los suelos y la topografía tienden solamente a ser agrupados en una macroescala por pendientes superiores convexas (suelos poco profundos), pendientes bajas concavas (suelos profundos) y áreas en depresión (suelos gleyzados). La variabilidad dentro de cada categoría pueden ser resultado en un cambio en la clasificación del suelo a nivel de series de suelos, la cual fue considerable y atribuida por la microtopografía.

Recientemente Kachanosky *et al*, (1985) ha mostrado que en una pradera nativa, la variabilidad espacial del suelo en relación a determinadas propiedades del suelo, fué significativo con los parámetros de la microtopografía. Las relaciones, sin embargo son complejas y en algunos casos tienden solamente a ser verificadas usando métodos de análisis espectral.

2.1.2 Manejo del suelo.

Hemingway (1955), citado por Aguilar (1987), indica que en aquellos lugares donde existe una gran variabilidad espacial; espacial de cierto tipo

de suelo, se suma a la inherente heterogéneidad del material parental, el efecto residual de aplicaciones de fertilizantes etc. esto es, que los suelos fertilizados exhiben un mayor grado de variabilidad en términos del contenido de nutrientes que los campos vírgenes.

La práctica de aplicación de abonos orgánicos al suelo, así como el tipo de labranza empleada son fuentes de variabilidad del suelo. La primera es debida a que cuando esta se aplica no se distribuye en forma uniforme al suelo tanto en lo vertical como en lo horizontal; en cuanto a la segunda, es debido a que no se aplica de una misma forma y a una misma profundidad en todo el terreno. Estas causas generalmente nos provocan una variabilidad vertical en el suelo, mientras que los factores de formación inducen a una variabilidad horizontal (De la Loma, 1982; Aguilar, 1987).

Kachanosky *et al* (1985) al estudiar el efecto de 30 años de cultivo en terminos de magnitud y variación espacial relacionadas a determinadas propiedades del suelo, encontró a través de un análisis espectral, que la redistribución no fué de tipo aleatorio. La distribución sistemática ha resultado de una alta variación de las propiedades del suelo, en comparación con un suelo nativo, también demostró un aumento significativo de autocorrelación y de proporción de variación asociada con un ciclamiento determinístico.

2.1.3 Variabilidad de las propiedades físicas y químicas del suelo.

Algunos investigadores han estado trabajando sobre problemas de variabilidad desde los años 1900's (Montgomery, 1913; Robinson y Lloyd, 1915; Pendleton, 1919). Experimentos de campo muy cuidadosos se han hecho para determinar los efectos de la variabilidad del suelo sobre los rendimientos (Smith, 1910; Montgomery, 1913), nitrificación (Waynick, 1918), nitrógeno y carbono (Waynick y Sharp, 1919) todos ellos citados por Vieira *et al* (1983).

Al evaluar la homogéneidad de algunas propiedades del suelo, dentro de facetas en los sistemas terrestres del área de influencia Chapingo, Gómez (1984) encontró que las propiedades que presentan una mayor

homogeneidad en las propiedades físicas son la profundidad y la textura, mientras que dentro de las propiedades químicas es el pH y la capacidad de intercambio catiónico.

En estudios realizados por Nielsen *et al* (1973); Babalola (1978) citados por Wilding y Dress (1983) señalan que la textura, densidad aparente y contenido de humedad presentan una variabilidad espacial menor que la conductividad hidráulica. La conductividad hidráulica presenta un coeficiente de variación comprendido en un rango desde 50-150 %. Sin embargo Cassel y Bauer (1975) señalan que tanto la densidad aparente como el punto de marchitez permanente aumentan su variabilidad con la profundidad.

Campbell (1978) en estudios realizados para comparar la variación espacial de 2 propiedades (pH y contenido de arena) dentro de 2 áreas, muestran patrones contrastantes de variación, esto es mientras en una área a una distancia de 30 m. es suficiente para encontrar una variación entera del contenido de arena, para la siguiente zona es necesaria una distancia de 40 m. para encontrar variación. El pH presenta una variación aleatoria dentro de las dos áreas.

Rao *et al* (1979) al trabajar con el uso de pruebas de bondad de ajuste para caracterizar la variabilidad de las propiedades del suelo encontró que tanto la densidad aparente, materia orgánica, contenido de arcilla y contenido de humedad a una tensión dada son caracterizados generalmente por distribuciones normales.

En estudios realizados por Wopereis *et al* (1988) analizan la variabilidad espacial de algunas propiedades químicas (Ni, Cu, Zn, Cd, Pb, pH) en una pequeña área forestal encontrando que sus semivariogramas no muestran estructura espacial, ya que son modelos aleatorios con "puro efecto pepita", a excepción del Cadmio (Cd) que muestra un modelo esférico con una zona de influencia de aproximadamente 40 m. y varianza pequeña.

Recientemente varios estudios se han enfocado a la variabilidad del

suelo enfatizando la dependencia en espacio a la distribución de las propiedades del suelo de una área específica (Burgues y Webster, 1980; Vieira *et al*, 1981; Yost *et al*, 1982; Odeh, 1990). Este planteamiento surge de la necesidad de caracterizar no solamente las principales propiedades y sus desviaciones sino de conocer como cambian a distancia su área de influencia o dependencia espacial y la interacción de las muestras vecinas.

Yost *et al* (1982) hace un análisis geoestadístico de las propiedades químicas en grandes áreas de Hawaii, muestreando a lo largo de transectos intercalados de 1 a 2 Km de distancia entre puntos de muestreo y a 2 profundidades 0-15 y 30-45 cm. El semivariograma para fósforo y pH muestran estructura espacial (profundidad 0-15) siguiendo un modelo esférico, donde la varianza pepita es muy pequeña 0.03 y represento el 25% y 0.10 que es el 23% de la varianza máxima, la zona de influencia o dependencia es de 32 y de 13-32 Km respectivamente. La dependencia espacial para Ca^{2+} fue de 42-52 Km (profundidad 0-15 cm) y 10 Km (profundidad 30-45 cm), para Mg^{2+} de 39 Km (profundidad 2), para Na^+ 14 Km (profundidad 1) y 10 Km (profundidad 2), concluyendo que estas distancias son relativamente grandes comparadas con las distancias usuales sobre los cuales los suelos son muestreados para análisis químicos pero esta información resulta útil para regionalizar propiedades.

2.1.4 La salinidad del suelo

Las sales en cualquier suelo pueden presentarse como una consecuencia del proceso de formación del suelo, o como un resultado de la aplicación de riego para el desarrollo de los cultivos. La mayoría de los suelos de las regiones áridas y semiáridas están afectadas por las sales ya que en ellas el clima induce a una evapotranspiración superior a la precipitación pluvial (Biggar, 1983).

Los elementos presentes en las sales de los suelos salinos son generalmente, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HCO_3^- y con menor frecuencia NO_3^- , BO_3H^{2-} y HPO_4^- .

2.1.4.1 Origen de las sales en el suelo

La formación y acumulación de sales en los suelos es el resultado de muchos procesos geoquímicos que ocurren en las capas superficiales de la corteza terrestre. Durante la intemperización de las diferentes rocas los enlaces entre los elementos químicos se rompen, surgiendo nuevos enlaces. Con esto se forman compuestos en forma de minerales secundarios arcillosos o diferentes óxidos, así como compuestos más sencillos entre los cuales se encuentran las sales sencillas.

La meteorización de las rocas por si sola rara vez ha ocasionado que se acumulen grandes cantidades de sal en un lugar. Lo normal es que sales, una vez formadas, sean transportadas por el agua al mar o a depósitos continentales, que de esta manera se salinizan (Shainberg, 1975).

Las sales más importantes que se presentan en los suelos salinos son: Sulfato de magnesio, Sulfato de sodio, Cloruro de sodio, Carbonato de sodio, Cloruro de magnesio, etc.

Otras sales son: carbonato calcico, carbonato magnesico, yeso, cloruro de potasio y las de nitratos (Pizarro, 1978).

2.1.4.2 Efectos de la salinidad sobre el suelo

El exceso de sales tiene su efecto principal sobre la estructura del suelo, ya que esta propiedad depende de la floculación de los coloides y de la cementación de los mismos.

Los cationes divalentes y trivalentes como el Ca^{2+} y el Al^{3+} favorecen la formación de agregados mayores del suelo y por tanto a una mejor estructura del mismo. Cuando el Na^+ absorbido aumenta, las fuerzas electrostáticas de atracción disminuyen y las arcillas tienden a dispersarse, por lo que la estructura se deteriora, la porosidad se reduce y disminuye la permeabilidad del suelo (Pizarro, 1978).

2.1.4.3 Clasificación de los suelos salinos

Existen varias clasificaciones de suelos salinos, siendo las más importantes la Rusa, la Francesa y la Norteamericana. La Rusa combina los principios de pedogénesis, geoquímica de sales y fisiología vegetal. La norteamericana utiliza los parámetros de conductividad eléctrica en las soluciones obtenidas del extracto de saturación y el porcentaje de sodio intercambiable (PSI).

2.1.4.3.1 Clasificación Norteamericana

Las sales solubles dañan a la planta por incrementar el contenido de la sal en la solución del suelo y por el grado de saturación del complejo de intercambio de un suelo con el sodio intercambiable. Basados en esos dos factores, el laboratorio de salinidad de Riverside, California, U.S.A. clasificó los suelos afectados por las sales en tres categorías (Shainberg, 1975).

Suelos salinos

Los suelos salinos son aquellos cuya conductividad del extracto de saturación es mayor de 4 dS/m a 25°C con un porcentaje de sodio intercambiable menor de 15, un pH menor de 8.5. Estos suelos son también descritos por Hilgard (1906) citado por Richards (1954) como suelos "álcali blanco"; este nombre se debe a la presencia de costras blancas de sal, cuando hay un exceso de sales y hay ausencia de cantidades significativas de sodio intercambiable.

Suelos sódico-salinos

Son aquellos cuya conductividad del extracto de saturación es mayor de 4 dS/m a 25°C y con un porcentaje de sodio intercambiable (PSI) mayor de 15. Estos suelos se forman como resultado de los procesos combinados de salinización y acumulación de sodio. Cuando hay exceso de sales el pH raramente es mayor de 8.5 y si las sales son lavadas, las partículas se dispersan quedando defloculadas.

Suelos sódicos no salinos

Son aquellos suelos cuyo PSI es mayor de 15 y la conductividad del extracto a saturación es menor de 4 dS/m a 25°C, su pH varía de 8.5 a 10 y son también conocidos como "álcali negro". La solución del suelo contiene en su mayor parte cloruros, sulfatos y bicarbonatos y a un pH elevado en presencia de carbonatos, el magnesio y el calcio precipitan. Debido a que plantas sensibles a las sales, que se afectan hasta con una conductividad de 2 dS/m, el Comité de Terminología de la Sociedad de la Ciencia del Suelo de América ha recomendado bajar los límites entre suelos salinos y no salinos a 2 dS/m para el extracto de saturación.

La clasificación propuesta es:

Conductividad eléctrica

dS/m a 25°C	RAS	Clasificación
Menor de 2	Menor de 15	Suelo normal
Mayor de 2	Menor de 15	Suelo salino
Mayor de 2	Mayor de 15	Salino-sódico
Menor de 2	Mayor de 15	Suelo sódico

Suelos salinos (álcali blanco) son aquellos en los cuales el desarrollo de la planta está limitada por una gran cantidad de sales solubles. Estos suelos pueden recuperarse por lavados de los excesos de las sales de la zona radicular. El pH generalmente es menor a 8.5 y están normalmente bien floclados. Las plantas que se desarrollan en dichos suelos aparecen achaparradas y de hojas gruesas de un color verde oscuro.

Algunos suelos salino-sódicos contienen altas cantidades de sales solubles que provocan reacciones de hidrólisis, el pH de estos suelos es menor a 8.5. En estos suelos los lavados remueven más rápidamente las sales solubles que el sodio intercambiable, provocando con esto que se vuelvan suelos sódicos.

Los suelos sódicos (álcali negro) tienen un pH mayor a 9 ó 9.5 y las arcillas y fracciones orgánicas se muestran dispersas. La permeabilidad de

estos suelos para el agua es baja. La percolación del agua es insuficiente para satisfacer las necesidades de las plantas. Además las bajas concentraciones de sales solubles y altos valores de pH pueden resultar en toxicidades por Na^+ para las plantas más sensibles.

2.1.5 Parámetros estadísticos relacionados con la variabilidad.

Diversos métodos han sido propuestos para describir y determinar el grado de variabilidad espacial de las propiedades físicas y químicas de un suelo no uniforme y homogéneo.

La estadística clásica fue una de las disciplinas que inició el estudio de la variabilidad del suelo al dar el sustento matemático a los conceptos de media, coeficiente de variación, varianza, covarianza. En el cuadro 1 se presentan los propósitos, así como las desventajas que ofrece la estadística clásica.

PRUEBA	PROPOSITO	DESVENTAJA
Análisis de varianza	Evaluar la variación del suelo o alguna de sus propiedades en un área determinada y de esta manera determinar el tamaño de muestra deseado, dentro de un intervalo de confianza deseado.	La varianza calculada no considera la distancia entre observaciones y sólo depende de la distribución de frecuencia teórica.
Coefficiente de variación	Cuantificar la variabilidad del suelo.	No toma en cuenta la naturaleza de la ley de distribución de los datos medidos cuyo conocimiento es indispensable cuando se desea tratar los datos en términos de valores medios o de probabilidad de tener un valor inferior a un cierto límite
Pruebas de bondad de ajuste	Encontrar una distribución de probabilidad que ajuste mejor a las mediciones realizadas sobre alguna propiedad en particular.	El conocimiento de estas distribuciones no proporciona ninguna información sobre la variación en el espacio de dichas propiedades físicas.

Cuadro 1.- Propósitos y desventajas de la estadística clásica (Vauclin, 1983).

Según Edwards *et al.* (1989) citado por Cristobal (1993), la continuidad espacial existe para la mayoría de los datos pertenecientes a las ciencias de la tierra. Dos datos cercanos uno a otro tendrán valores más similares que dos datos lejanos uno del otro. Generalmente cuando se mira un conjunto de datos que representan una propiedad distribuida espacialmente, sus valores no parecen estar aleatoriamente distribuidos, por el contrario sus valores tienden a estar agrupados, es decir, altos valores de la propiedad tienden a estar cercanos unos a otros y lo mismo ocurre con valores bajos.

Webster y Oliver (1990) afirman que la estadística clásica únicamente puede realizar generalizaciones de las poblaciones, así se realizaran cien mediciones de pH en una región, y se obtuviera un valor medio de 5.6 y una desviación estándar de 0.3, se puede generalizar que el pH de esta región es moderadamente ácido con un intervalo de confianza bastante bueno; por el contrario si la desviación estándar fuera de 3, la generalización sería muy riesgosa.

El enfoque geoestadístico de acuerdo a Matheron (1963), citado por Yost *et al* (1982) difiere del enfoque de la estadística clásica porque: (1) los métodos clásicos son incapaces para tratar adecuadamente el aspecto espacial de datos; (2) las muestras vecinas pueden no ser independientes de ellas y como resultado, las muestras toman valores cercanos, a la vez que tienden a ser similares de aquellas que se encuentran lejos.

Este nuevo método provee de vías para cuantificar y conocer la variabilidad espacial de las propiedades del suelo mediante un análisis estructural, el cual consiste en evaluar un gran número de muestras mismas que provienen de un diseño de muestreo por transecto o malla a distancias regulares (Campbell, 1978; Burgues y Webster, 1980; Camargo, 1989).

La geoestadística es un enfoque que ha tenido aplicaciones potenciales en muchas áreas de inspección de suelos. El uso de las técnicas geoestadísticas en la investigación enfocado a relaciones espaciales de propiedades de suelo ha recibido mucha atención en la literatura.

2.1.6 Geoestadística y su aplicación en la ciencia del suelo

De la heterogeneidad espacial surgen problemas de muestreo y de inferencia sobre las propiedades del suelo en puntos no muestreados. El hombre ha buscado herramientas para afrontar esta falta de homogeneidad en las propiedades (y por ende en el comportamiento) del suelo. Esta búsqueda de técnicas ha evolucionado de lo cualitativo a lo cuantitativo.

Los levantamientos de suelos al formar unidades cartográficas reducen heterogeneidad. En ellos se considera la relación de los factores de formación del suelo con el grado de expresión de sus propiedades. Sin embargo requieren de apreciaciones que casi siempre han sido intuitivas y se han retroalimentado poco mediante análisis cuantitativo (Webster, 1985).

Buscando aumentar la eficiencia y precisión de la estimación de cierta(s) propiedad(es), sólo se dispone a veces de la alternativa de estratificar primero el suelo y luego determinar las varianzas de estimación usando la teoría de muestreo estandar. Se incursionó luego en la aplicación del análisis de superficies de tendencia (forma de regresión múltiple en el que las variables independientes son las coordenadas espaciales).

Ejemplos de trabajos bajo este enfoque son los de Zárate (1972) y el de Ramírez *et al* (1981). Sin embargo Webster (1985) señala que en este sentido "no hubo relación funcional obvia (ni teoría para predecir una) entre la posición geográfica y el suelo".

A mediados de la década de los 70's, se empieza a trabajar bajo el enfoque de procesos estocásticos. Se ve a las propiedades del suelo como variables aleatorias. La herramienta de análisis fue la función de autocorrelación. Usando el correlograma, Webster y Cuanalo de la C. (1975) corroboraron la estrecha relación entre las propiedades del suelo y los linderos geológicos. Esta técnica aunque útil para evaluar levantamientos de suelos, no podría ser usada con fines de interpolación,

pero estaba ya dado el paso para buscar la aplicación de la geoestadística en la edafología.

La geoestadística provee el procedimiento para medir la dependencia espacial de una variable, entendiéndose por ello el grado en que una muestra representa a la vecindad no muestreada y posibilita realizar estimaciones insesgadas de la variable, con varianza mínima y conocida, en puntos no muestreados (Vauclin *et al*, 1982). Así se dispone de una herramienta base para la confección de mapas de isolíneas que reconstruyen el "paisaje" de la población muestreada en forma total; en este sentido, es la técnica mas precisa conocida hasta la actualidad.

La geoestadística surge en la minería; en la literatura se cita a Matheron quien en 1965 en su tesis doctoral, conjunta los conocimientos dispersos y dá cuerpo a esta nueva disciplina. Debido a su carácter altamente matemático tuvo que pasar cierto lapso de tiempo, para que esta disciplina tuviera aplicaciones en las áreas forestales, ecológicas e hidrológicas entre otros (Journel y Huijbregts, 1978).

De finales de la década de los 70's a la fecha, han proliferado las aplicaciones de la disciplina en cuestión a la hidrología y ciencia del suelo. Como ejemplos se pueden citar los trabajos de Warrick y Nielsen (1980) en estudios sobre variación en el espacio de propiedades físicas y químicas del suelo; los trabajos de Bressler *et al* (1982) y Gurovich y Ramos (1985) que consideran la variabilidad espacial de rendimientos de cosechas; otras variables del suelo estudiadas son: para la infiltración (Vieira *et al*, 1981) que manejan tasas de infiltración; tensión de la humedad del suelo (Hamlett *et al*, 1986; Russo, 1984); conductividad hidráulica (Russo, 1983); pH (Mcbratney y Webster, 1981); conductividad eléctrica (Webster y Burgess, 1980); resistencia del suelo a la penetración (O'Sullivan *et al*, 1987); varias propiedades químicas (Yost *et al*, 1982 a y 1982 b) y específicamente fósforo (Knighton y James, 1985), concentración de sales (Flores, 1987; Camargo, 1989).

2.2 Teoría de las Variables Regionalizadas.

2.2.1 Concepto de Variable Regionalizada.

Matheron (1963, 1971) desarrolló una teoría llamada "Teoría de las variables regionalizadas" la cual describe los fundamentos de la geoestadística. En esta teoría una variable regionalizada es una función de espacio numérico, la cual varía de un lugar al próximo con continuidad aparente, pero el cual varía de una manera que no puede generalmente estar representado por una función de trabajo ordinaria (Román, 1980).

Campbell (1978) define una variable regionalizada como una variable distribuida en el espacio en forma continua y con una variación geográfica también compleja para ser representada por una función matemática factible. La variación punto a punto de una variable regionalizada es determinístico en el sentido que las muestras próximas pueden tener valores similares, pero es aleatorio en el sentido que el valor de una muestra dada no puede ser precisamente calculada a partir de los valores de las muestras vecinas.

En geoestadística las propiedades del suelo son variables aleatorias. De aquí surge el término variable regionalizada que se refiere a una variable aleatoria distribuida tanto en el tiempo como en el espacio (Journel y Huijbregts, 1978).

Cada valor de la variable aleatoria (VA) es una realización de una cierta función de distribución de probabilidades (FDP).

Suposiciones de las variables regionalizadas.

El caso más general de una variable regionalizada es la realización de una localidad dada sobre el dominio. El caso más simple es cuando se asume "estacionaridad" y es cuando todos los puntos de la población son producto de la misma variable, teniendo la misma media y la misma varianza.

2.2.2 Características de las variables regionalizadas.

Las variables regionalizadas tienen ciertas características que las distinguen de otro tipo de variables y son las siguientes:

a) Localización

Una variable regionalizada se encuentra sobre un lugar en el espacio muestral, que esta referenciado por un sistema de coordenadas con el que se asocia a toda la población. Aunado a la ubicación, la muestra misma tiene otras características que aportan información sobre la variable particularizada, y estas son: tamaño del valor puntual, forma geométrica de la muestra y orientación sobre el espacio muestral. Al conjunto de estas características se les llama "soporte geométrico". Este nombre obedece a que la información obtenida de cada dato muestra sirve para conocer la dirección, ya sea esta, creciente o decreciente sobre el espacio. Lo anterior sera la base para obtener la estructura de la información recabada del muestreo.

La localización es de fundamental importancia ya que se considera la posición de cada punto de muestreo y su tendencia de variación, lo cual no se toma en cuenta en la estadística clásica, en donde siempre se tendrían los mismos parámetros estadísticos y no se toma en cuenta la relación que existe entre los valores de un punto a otro.

b) Variabilidad

Una variable regionalizada tiene cierta variación en el espacio, la cual puede ser representada por el grado de continuidad de los datos obtenidos en un muestreo. Dicha continuidad puede ser grande o pequeña, esto dependerá del tipo de la variable que se analice y de los rangos de variación que se consideran, así como también de la dirección en que se tomen las muestras.

Aunque se presenten variaciones extremas siempre es posible encontrar una continuidad "promedio". La continuidad en el estudio de la

variable regionalizada es representada por el semivariograma.

En la fig No. 1 se pueden observar los diferentes tipos de continuidad que se presentan al analizar las variables regionalizadas.

2.2.3 Correlación Espacial.

La correlación espacial es la más importante de las características en el estudio de las variables regionalizadas, lo cual indica que en una variable existe cierto grado de dependencia entre los puntos considerados de la población.

Supongase que se obtiene una serie de datos sobre una línea imaginaria, dichos valores guardan entre ellos una cierta dependencia; ya que si se sabe que x_i tiene un valor $Z(x_i)$, la probabilidad de que un dato, situado en x_i , mas un incremento de o en la distancia, tenga igual valor que el primero, sera muy alta, y aún sera más alta la probabilidad, así la distancia que separa los dos puntos se disminuye.

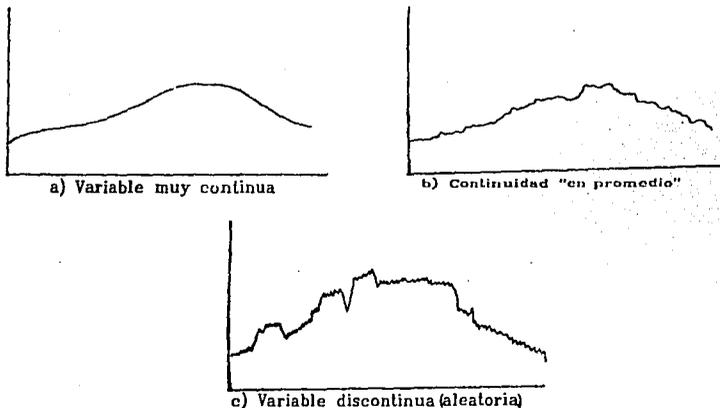


FIGURA 1. Tipos de continuidad. Tomado de Roman, 1980.

2.2.4 Estacionaridad.

Cuando se analiza una variable regionalizada es necesario obtener una función de densidad, con objeto de conocer su comportamiento en el espacio; esto, es el estudio de las variables regionalizadas. Sólo es posible si se asume cierta clase de estacionaridad, la cual es una restricción que se introduce en el análisis de este tipo de variables, con objeto de efectuar inferencias estadísticas sobre las variables regionalizadas (Delfiner, 1979 citado por Ramírez, *et al*, 1981).

El mismo Delfiner, al estudiar la estacionaridad señala que la mayor dificultad que se presenta con un fenómeno no estacionario es la estimación de sus parámetros, los cuales son necesarios para el desarrollo de la teoría de las variables regionalizadas.

En la naturaleza es difícil que exista un fenómeno que cumpla con las restricciones de estacionaridad estricta, por lo que existen dos formas menos estrictas de estacionaridad: **la estacionaridad de segundo orden y la hipótesis intrínseca.**

Estacionaridad de primer orden. Una función $Z(x)$, es definida como estacionaria de primer orden, si su valor esperado es el mismo en todas las localizaciones en la región de estudio, esto es:

$$\Sigma [Z(x)] = m \quad (2.1)$$

$$\Sigma [Z(x) - Z(x + h)] = 0 \quad (2.2)$$

donde:

m = valor medio

h = vector de separación entre muestras

Estacionaridad de segundo orden. Una función $Z(x)$ es denominada como estacionaria de segundo orden, si la covarianza espacial $C(h)$, de cada $Z(x)$ y $Z(x + h)$ es la misma (independientemente de la posición) en toda la región, y depende sólo del valor de h , esto es:

$$C(h) = \Sigma [Z(x) - m] [Z(x+h) - m] \quad (2.3)$$

A medida que h crece, $C(h)$ disminuye. La estacionaridad de $C(h)$ implica la estacionaridad de la varianza muestral s^2 . La covarianza espacial se aproxima a la varianza muestral a medida que la distancia de separación tiende cero. Es decir la varianza de la función aleatoria $Z(x)$ se obtiene al igualar h con cero en (2.3) de tal forma que:

$$\text{Var} [Z(x)] = \Sigma [Z(x) - m]^2 \quad (2.4)$$

Estacionaridad débil o Hipótesis intrínseca. La estacionaridad de segundo orden no se aplica si no es posible definir una varianza y una covarianza finita, como en el caso de los fenómenos de tendencia, y entonces debe ser asumida una forma débil de estacionaridad, denominada hipótesis intrínseca. La hipótesis intrínseca requiere que para todos los vectores h la varianza del incremento $Z(x) - Z(x+h)$ sea finita e independiente de la posición dentro de la región, esto puede ser expresado por la siguiente ecuación:

$$\text{Var} [Z(x) - Z(x+h)] = \Sigma [Z(x) - Z(x+h)]^2 = 2\gamma(h) \quad (2.5)$$

γ = Semivarianza

Dividiendo la ecuación (2.5) por dos se reduce la semivarianza estadística $\gamma(h)$, que depende la h . Idealmente γ es cero en $h=0$ y se incrementa como h se incrementa (Webster, 1985; Cristobal, 1993).

Debido a que los conceptos vistos anteriormente dan las bases teóricas del análisis de la dependencia espacial, usando la autocorrelación y semivariograma, es necesario entender estos dos conceptos.

AUTOCORRELACION

Se dice que un fenómeno posee autocorrelación espacial cuando su ocurrencia en un área o punto, aumenta la probabilidad de que suceda el

mismo fenómeno en un área o punto vecino. Una forma de medir esta autocorrelación es mediante los correlogramas obtenidos a partir de la estimación de la función de autocorrelación muestral.

La covarianza entre observaciones de una variable aleatoria Z que representa el valor de una propiedad Z en un lugar (x) dada, es función de la distancia (h) entre pares de observaciones. La función de autocorrelación queda definida por:

$$\rho(h) = \frac{\text{Cov} [Z(x), Z(x + h)]}{s^2} \quad (2.6)$$

donde cov es la covarianza entre observaciones $Z(x)$ y $Z(x+h)$, separadas por una distancia h y s^2 es la varianza.

Generalmente la distribución conjunta de $Z(x)$ y $Z(x + h)$ no es conocida y $\rho(h)$ tendrá que ser estimada a partir de los datos experimentales. En este caso la función de autocorrelación muestral $\rho(h)$ estimada para la distancia h entre unidades de observación queda de la siguiente manera (Davies, 1973; citado por Vauclin *et al.*, 1982):

$$r(h) = \frac{[(n-h) \sum_1^{n-h} z_i z_{i+h} - \sum_1^{n-h} z_i \sum_1^{n-h} z_i + h] / (n-h)(n-h-1)}{[n \sum_1^{n-h} z_i - (\sum_1^{n-h} z_i)^2] / n(n-1)}$$

Webster y Cuanalo de la C. (1975) reportan un estimador para la autocorrelación, cuya expresión matemática es la siguiente:

$$r(h) = \frac{(n-h)^{-1} \sum_1^{n-h} [z(x_i) - \bar{z}(x)] [z(x_i + h) - \bar{z}(x)]}{n^{-1} \sum_1^n [z(x_i) - \bar{z}(x)]^2}$$

donde:

Z = valor medio

$Z(x_i)$ = realización de la variable aleatoria Z en la i -ésima posición.

$Z(x_i + h)$ = realización de la variable aleatoria en la $i + h$ -ésima posición.

n = número de puntos equidistantes

h = lapso

$n - h$ = pares de valores separados por una distancia h .

Correlograma

Es una gráfica de los valores de la autocorrelación en función de h . Es útil para determinar visualmente si observaciones sucesivas están correlacionadas o no y de esta forma determinar la distancia mínima a la cual dos puntos pueden considerarse como independientes. La autocorrelación mide pues, la fuerza de la asociación espacial entre pares de mediciones y puede explicarse como un coeficiente de correlación ordinaria (Warrick *et al*, 1986).

2.2.5 Deriva y Residual.

La deriva es una de las propiedades de las variables regionalizadas y en general, en todas aquellas áreas en donde se considere la distribución espacial de una variable.

La deriva se define como el valor esperado de las variables regionalizadas (Z) en un punto (x) dentro de un dominio (R^n) (Huijbregts y Matheron, 1970; citado por Camargo, 1989).

Con el objeto de analizar los cambios de una variable regionalizada sobre el espacio, se descompone la variable en los componentes; uno determinístico, el cual es la deriva y uno aleatorio, que es el residual.

$$Z(x) = M(x) + Y(x) \quad (2.9)$$

donde:

$Z(x)$ = Variable regionalizada

$M(x)$ = Deriva
 $Y(x)$ = Residual.

El residual o componente aleatorio se define como la diferencia que existe entre la variable regionalizada y la deriva

$$Y(x) = Z(x) - M(x) \quad (2.10)$$

Además, el residual es el valor remanente después que se ha realizado un ajuste de valores.

Delfiner y Delhome (1975) citado por Román, (1980), aclaran que estos residuales no deben confundirse con los residuales que se utilizan en el método de los mínimos cuadrados, ya que en este método se utilizan como errores de ajuste, y se llega a que la población se describe por una función "suavizada", pero en donde se desperdicia información que pudieran aportar los residuales o errores de estimación. Los errores a diferencia de los residuales, no tienen correlación.

Cuando se tiene una expresión como la deriva, se puede captar información estructural mediante los residuales, que si son correlacionados.

En la fig. No. 2 puede observarse como una variable presenta una variación "en promedio" (línea continua), así como los "pics" que son los residuales.

El residual utilizado en las variables regionalizadas refleja la estructura de la variable bajo estudio, aportando los momentos estacionarios en cada incremento puntual. Con esto, el residual es el que aportará la información para conocer realmente la distribución de la variable.

Como regla general se dice que la correlación entre residuales aumenta a medida que disminuye la complejidad de la tendencia o función de ajuste.

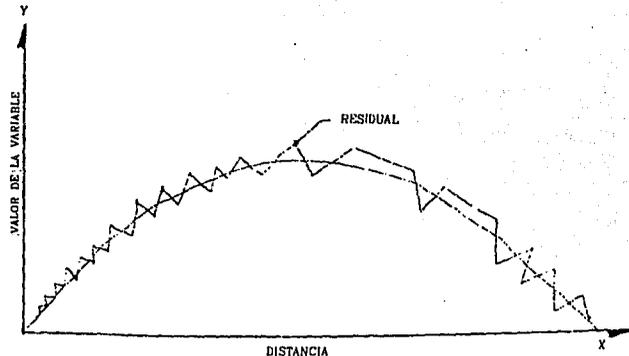


FIGURA 2. Variabilidad "en promedio" de una variable. Tomado de Roman, 1980.

2.2.6 Semivariograma.

En el estudio de las variables regionalizadas el semivariograma (abrev. variograma), es una herramienta que ocupa un lugar preponderante, ya que además de aportar el entendimiento cuantitativo del comportamiento de las variables sobre el espacio, permite efectuar predicciones (Mcbratney y Webster, 1986).

El semivariograma es la parte matemática principal en el proceso de estimación que aquí se trata.

2.2.6.1 Descripción del semivariograma.

La función que analiza el grado de dependencia de datos espacialmente distribuidos está definido por:

$$\gamma(h) = 1/2 \text{ var } [Z(x) - Z(x + h)]^2 \quad (2.11)$$

con la suposición de estacionaridad de segundo orden, es decir que la media de $Z(x)$ y la covarianza entre $Z(x)$ y $Z(x + h)$ existen y no dependen de la posición de x en el espacio, $\gamma(h)$ tiene la forma:

$$\gamma(h) = 1/2 \text{ _ } [Z(x) + Z(x+h)]^2 \quad (2.12)$$

la cual es estimado por:

$$\gamma(h) = 1/2N(h) \sum [Z(x) - Z(x + h)]^2 \quad (2.13)$$

donde:

Z = Valor de la variable

Xi = Sitio o localidad en la que se halla un valor de la variable. La xi es un espacio bidimensional se expresa por (x,y); mientras que en uno tridimensional se usan tres coordenadas (x,y,z).

h = Incrementos de distancia

$\gamma(h)$ = Expresión del semivariograma

N(h) = Número de pares a una distancia h entre observaciones

Hamlett *et al* (1986) indican que la presencia de estacionaridad (para estudios de variables de suelo) es más la excepción que la regla, por lo que la no estacionaridad debe ser siempre considerada. Por ello y ya que las semivarianzas son menos sensibles a la no estacionaridad que la autocorrelación, debido a que se basan en las diferencias entre pares de observaciones, tienen mayores ventajas prácticas para el análisis de las distribuciones espaciales (Campbell, 1978).

La característica principal de un semivariograma es que en general, $\gamma(h)$ se incrementa con el aumento de la distancia entre parcelas a unidades de muestreo (h). Este incremento en la mayoría de los casos, tienen un límite al que se denomina umbral (en inglés "sill"), en cuyo caso se dice que el semivariograma es transitivo. El máximo valor de h donde el umbral se establece se denomina alcance (en inglés, "range") y es de gran importancia, ya que marca el límite de la dependencia espacial y, por lo tanto, marca también la distancia límite dentro de la cual la interpolación es válida utilizando el procedimiento de krigado (Burgues y Webster, 1980; Mcbratney y Webster, 1986; Webster, 1985).

En un campo de estudio puede haber direcciones preferenciales de regionalización, que pueden ser descritos más adecuadamente por dos o

mas semivariogramas, uno para cada dirección. Cuando esto ocurre, se dice que hay anisotropía. Si un solo semivariograma describe correctamente las variaciones en dos o más direcciones, entonces se habla de isotropía en esas direcciones.

La representación gráfica de un semivariograma típico y sus elementos se presenta en la fig 3.

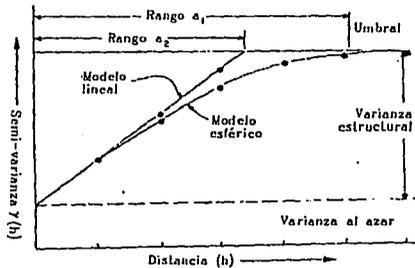


Fig 3. Semivariograma típico y sus elementos (basado en Webster, 1985).

En la fig. No. 4 se puede apreciar diferentes tipos de semivariogramas, de acuerdo al grado de continuidad de la variable que se está estudiando. Una continuidad excelente de una variable, sería el caso de la fig 4-a; mientras que en las fig 4-c y 4-d se tiene una continuidad pobre y altamente errática, respectivamente.

Concluyendo el semivariograma es una herramienta para describir la correlación espacial que existe entre puntos dato, distribuidos sobre un dominio y a que aporta el entendimiento cuantitativo del comportamiento de las variables y la zona de influencia de cada grupo de datos que se analice. Dicho esto de otra manera "es la descripción numérica de la continuidad de una variable regionalizada".

2.2.6.2 Clasificación de los semivariogramas.

Uno de los aspectos que se puede apreciar en los semivariogramas es

cuando se considera un valor máximo de la varianza, valor con el cual se ha de definir el rango de influencia de un punto. Este valor máximo recibe el nombre de "umbral".

Dicho umbral será el límite superior al que lleguen los valores considerados en el semivariograma.

Por la existencia o ausencia de un valor umbral, los semivariogramas pueden ser:

- 1.- Semivariograma con umbral que pueden ser esféricos y exponenciales.
- 2.- Semivariograma sin umbral, que pueden ser lineales y logarítmicos.

2.2.6.3 Propiedades de la estructura de los semivariogramas.

Las principales propiedades, en relación a la estructura de las variables regionalizadas son las siguientes:

Soporte: Al localizar una variable regionalizada, su variación ocurre en un cierto dominio o espacio geométrico. El soporte, son las características de la variable con respecto a su ubicación en el espacio muestral y son: volumen específico, forma y orientación de la muestra sobre dicho espacio. Si se cambia la información, un nuevo soporte apareciera y se tendrá un nuevo semivariograma.

Rango y zona de Influencia: Los incrementos del semivariograma reflejan el área de influencia de las investigaciones sobre el espacio muestral. Cuando el semivariograma alcanza el umbral, para el caso que lo exista, es que se ha llegado a la distancia donde $Z(x)$ y $Z(x + h)$ no tienen ya correlación. A esta distancia se le denomina rango o radio de influencia. El rango da un significado preciso al concepto de zona de influencia de la muestra. El rango depende de la dirección de los datos considerados. En la Fig 4-a se puede apreciar claramente el rango.

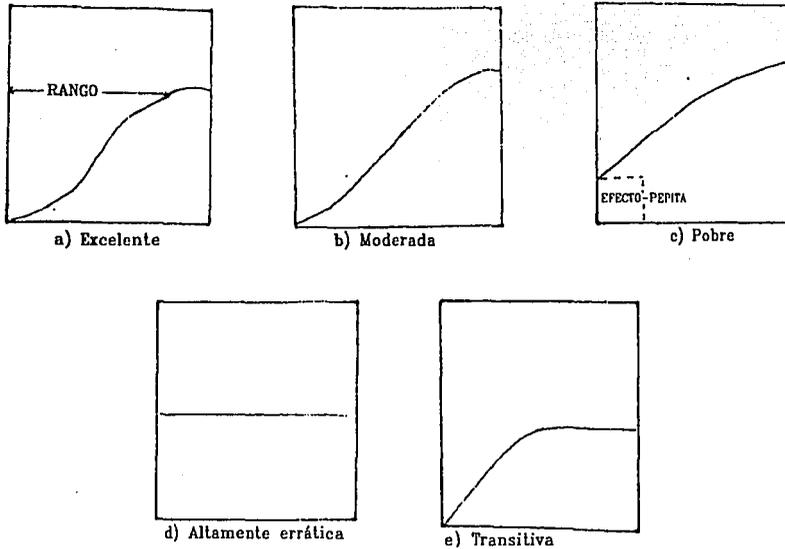


FIGURA 4. Diferentes tipos de continuidad en los semivariogramas.

Anisotropía: Son los cambios en el valor de la variable sobre el espacio, pudiendo ser dichos cambios, estables en una dirección y rápidos o irregulares en otra. Cuando el semivariograma no cambia de forma con diferentes direcciones se dice que es isotrópico.

Debido a que se consideran varios vectores (n) de datos, es necesario conocer la variación en todas direcciones, para poder así captar la dirección de los cambios de la variable.

Aunque los semivariogramas pueden tener un mismo valor de umbral, debido a la anisotropía, tiene diferente rango de influencia. En las fig 5-a y 5-b se aprecian semivariogramas con umbral y sin umbral, pudiéndose ver los efectos de la anisotropía.

Zonallidad o heterogeneidad: Son los cambios del semivariograma debido

a que se consideran diferentes sub-dominios

Continuidad o comportamiento al origen: La continuidad de una variable esta relacionada intimamente con el comportamiento al semivariograma en su origen, pudiendose tener los siguientes tipos de semivariogramas: Parabólico, Dewijslan, Esférico y Efecto de pepita.

Cuando se presenta un desplazamiento del origen (conocido como efecto pepita ó varianza al azar), como puede apreciarse en la fig 4-c, deberá considerarse un semivariograma especial, agregando un coeficiente (C_0) de corrección para dicho desplazamiento. Este desplazamiento se da porque la distancia h entre muestras debía haber sido mas pequeña (Román, 1980; Flores, 1987).

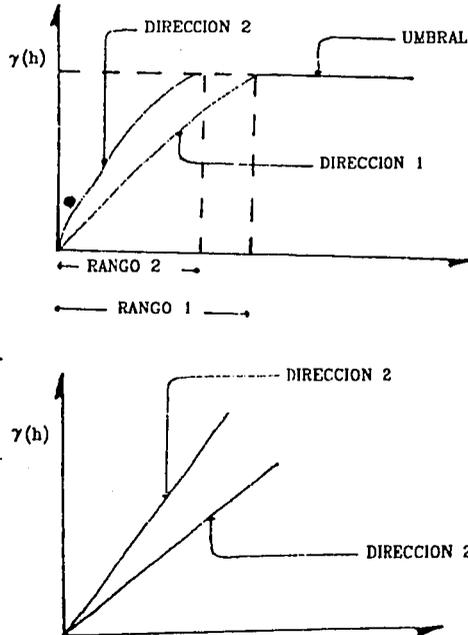


FIGURA 5. Efectos de anisotropia para variogramas con umbral (a) y sin umbral (b).

2.2.6.4 Modelos de ajuste para semivariogramas

El ajuste de modelos es un tanto subjetivo, ya que no se dispone de una herramienta verificada para hacerlo (Tabor *et al*, 1984), aunque la elección de los mismos se basa en el cumplimiento de ciertos requisitos, los cuales tienden a evitar la obtención de varianzas de estimación negativas cuando se aplica el procedimiento de krigado.

Estos modelos pueden ser clasificados en función de que cumplan con todos o parte de los requisitos para estudiar variables en una, dos o tres dimensiones, y de la presencia o ausencia de umbral.

A. Modelos de transición

Básicamente podemos encontrar cuatro modelos teóricos de transición: a) lineal, b) esférico, c) exponencial, d) gaussiano.

En las siguientes expresiones, C_0 es el efecto pepita, $C_0 + C_1$ es el umbral y a es el rango del semivariograma.

a) Lineal

$$\begin{aligned}\gamma(h) &= C_0 + B_0 h & 0 < h < a \\ \gamma(h) &= C_0 + C_1 & h > a\end{aligned}$$

En el cual B_0 es la pendiente.

b) Esférico

$$\begin{aligned}\gamma(h) &= C_0 + C_1 \left(\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{3h}{2a} \right)^3 \right) & 0 < h < a \\ \gamma(h) &= C_0 + C_1 & h > a\end{aligned}$$

El modelo esférico es obtenido, seleccionando primero al efecto pepita C_0 y el valor del umbral $C_0 + C_1$, entonces una línea interceptando el eje y en C_0 y la tangente de los puntos cercanos al origen alcanzan el umbral a una distancia $a' = \frac{2}{3} a$, entonces el rango es $a = \frac{3a'}{2}$. El modelo esférico

se comporta linealmente con aproximadamente $1/3$ a.

c) Exponencial

$$\gamma(h) = Co + Ci [1 - \exp (-h^2/ ao)]$$

para $0 < h < a$

En donde d es la distancia máxima, sobre la cual el semivariograma es definido. El parámetro a , es obtenido tomando una tangente en los puntos cercanos al origen, interceptando al eje de las Y con Co . La distancia ao en la cual la tangente alcanza el umbral es aproximadamente $a/3$ donde a es el rango.

d) Gaussiano

$$\gamma(h) = Co + Ci [1 - \exp (-h^2/ ao^2)]$$

El parámetro ao , esta relacionado con el rango por $ao=1/\sqrt{3}a$ en la cual el rango es obtenida visualmente como la distancia superior, en la cual el semivariograma experimental se vuelve estable.

B. Modelos sin umbral

Corresponden a fenómenos con una capacidad de dispersión infinita para los cuales ni las varianzas de los datos ni covarianza pueden ser definidos (Journel y Huijbregts, 1978). En general estos modelos pueden ser escritos como:

$$\gamma(h) = Co + Ah^B \quad 0 < B < 2$$

El parámetro B sería estrictamente mayor que cero y estrictamente menor que 2, para garantizar que la función $\gamma(h)$ es condición positiva definida.

Algunos fenómenos pueden tener semivariogramas que muestren estructuras anidadas o más de una estructura. En este caso una combinación de modelos es necesario en vez de uno particular (Camargo, 1989).

2.2.6.5 Selección al mejor semivariograma.

Para seleccionar el semivariograma que mejor se ajuste a la estructura de los datos sobre la malla, es necesario encontrar un modelo teórico que represente lo mejor posible al experimental y que además cumpla con ciertas condiciones de consistencia matemática.

a. Obtención del semivariograma experimental

El semivariograma experimental se calculó a partir de los valores de la variable $Z(X)$ utilizando un sistema de programas de computo llamado GEOEAS (Englund y Sparks, 1991), el cual se basa la ecuación 2.14, cuando los datos se encuentran en una línea recta o en una cuadrícula regular. Sin embargo, el programa presenta la opción de analizar datos espaciados irregularmente, los cuales son agrupados en intervalos de distancia y ángulos.

$$\gamma(h) = 1/2N(h) \sum [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (2.14)$$

donde:

$\gamma(h)$ = Semivariograma experimental

n = Número de puntos considerados en la vecindad.

h = Incremento de distancia

Z = Valor de la variable

X_i = Sitio o localidad del valor de la variable sobre el espacio

$N(h)$ = Número de sumandos posibles.

Una vez dibujados los semivariogramas experimentales, es necesario determinar si existe tendencia en los datos para cuyos análisis puede seguirse la metodología propuesta por Flores, 1987.

Por definición, el semivariograma experimental debe pasar a través del origen cuando la distancia de separación es cero, sin embargo muchas propiedades del suelo tienen una semivarianza diferente de cero cuando h tiende a cero, y esta varianza es denominada varianza al azar o varianza pepita (*nugget* en inglés), y representa una varianza aleatoria causada por los errores de medición, o por la microvariabilidad de la propiedad que no puede ser detectada a la escala a que se realizó el muestreo (Webster, 1985; Mcbratney y Webster, 1986; Cristobal, 1993).

b. Semivariograma teórico

Cuando no se dispone de un sistema interactivo para el ajuste del semivariograma teórico, se utiliza el método matemático propuesto por Cristobal (1993) para modelos esféricos.

En el caso de los modelos lineales el ajuste puede ser visual o bien por mínimos cuadrados ponderado, ya que el número de pares de valores para el cálculo de cada punto del semivariograma es diferente.

El modelo del semivariograma teórico lineal se representa de la manera siguiente (Olea, 1972; citado por Román, 1980):

$$\gamma(h) = W h (1 - h/(K-1) a) \quad (2.15)$$

donde:

$\gamma(h)$ = Semivariograma teórico.

W = Pendiente de los datos

h = Incremento de distancia

K = Número de puntos considerados en la vecindad

a = Distancia entre muestras consecutivas.

El semivariograma teórico cuadrático se representa:

$$\gamma(h) = \frac{W h - W^2 h}{L (L^2 - a^2)} [2L^2 + 2aL - a^2 - 2(L+a) h + h^2]$$

donde:

$\gamma(h)$ = Semivariograma teórico cuadrático

W = Pendiente

h = Incremento de distancia

L = Distancia entre el primero y último dato del vector considerado

a = distancia entre muestras consecutivas.

Una vez que se han obtenido los semivariogramas experimental y teórico, se procede a escoger el mejor de todos los obtenidos. Para hacer esto, normalmente se utiliza la bondad de ajuste en forma visual, es decir, se compara la curva obtenida experimentalmente, contra la obtenida por el modelo teórico propuesto; cuando ambas curvas sean similares, ese semivariograma será el mejor. Este proceso pudiera hacerse que fuera iterativo, conectando un gráficator que analice por grupo de semivariogramas y así seleccionar el de mejor ajuste (Román, 1980).

Para obtener el semivariograma que mejor se ajuste a la información, asumiendo que los datos están colocados en una línea a intervalos regulares, se siguen los siguientes pasos:

Aplicar la ecuación 2.14, para poder aplicar la ecuación anterior previamente se tiene que determinar:

- a) dirección de los datos a calcular
- b) número de líneas en cada dirección
- c) número de puntos por línea
- d) vecindad mínima y máxima
- e) tipo de variable estudiada, con objeto de definir incrementos de distancia y vecindades.

En esta metodología para calcular los semivariogramas los datos deben estar distribuidos regularmente.

Una vez que se ha obtenido el semivariograma experimental, se propone un semivariograma teórico de la forma (ec. 2.15 ó bien ec. 2.16),

según sea el tipo de semivariograma obtenido en el modelo experimental (Román, 1980).

Philip y Watson (1986), citado por Cristobal (1993) indican los señalamientos sobre la crítica establecida en los lineamientos teóricos del semivariograma:

a.- La estimación del semivariograma experimental se hace a través de un método global, pero existe error al utilizar este semivariograma para realizar estimaciones locales.

b.- El semivariograma teórico es predefinido y ninguna teoría permite "a priori" la selección de la forma de la función, y no hay forma de que se ajuste esta función a las observaciones originales, por lo tanto los parámetros derivados del semivariograma teórico son hipotéticos y objetivos, y estrictamente hablando la función debe ser llamada semivariograma hipotético.

2.2.6.6 Relación que existe entre variabilidad y muestreo.

En agronomía la experimentación o investigación que involucra al suelo ha afrontado el problema de la gran variación de este. De ello surgen los problemas de muestreo y de representatividad de los sitios experimentales usados. Cline (1944) ha hecho un resumen de los principios de muestreo para los científicos del suelo y postulado las fórmulas clásicas para la estimación de medios y varianzas para elegir el número de observaciones, esto es, de tamaño de una muestra para conseguir una estimación de la varianza deseada. Sin embargo además de una buena estimación de la media y la varianza de una muestra de n observaciones, el conocimiento de las leyes de distribución permiten determinar el número N de observaciones, que sería necesaria para obtener valores medios con un nivel de precisión relativo ϵ , para una probabilidad $(1-\alpha)$ 100 %.

$$N = \frac{t^2 (\alpha) CV^2}{\epsilon^2}$$

Esta observación supone que las observaciones sean independientes una de otra y que por su número sea suficiente para que el teorema central del límite pueda ser aplicado.

A partir de la fórmula anterior este permite establecer 2 ventajas, las cuales son:

La primera es la realización de una mayor precisión. Es decir aparentemente para propiedades que varían de poco a medianamente de 10 a 100 observaciones son suficientes para estimar un valor medio, con una precisión aceptable ($\epsilon=0.10$). En contraposición con esto será necesario más de 1000 mediciones para determinar con la misma precisión la media de la conductividad hidráulica o del coeficiente de dispersión, para los cuales $CV > 200 \%$; y la segunda ventaja cercanamente relacionada a la primera, es la teoría de las variables regionalizadas, la cual habilita la dependencia espacial en la propiedad para estimar la media con una mínima varianza, así como de conjuntar un resumen de la variabilidad (en el semivariograma) y una técnica predictiva de interpolación (el *krigado* o *krigaje*) para valores en puntos no muestreados (Journel y Huijbregts, 1978; Vauclin, 1983).

El número de muestreo para la obtención de un buen semivariograma es variable y depende más de las posibilidades físicas de realización de muestreo y de las distancias mínima y máxima entre muestras que se requieren analizar, que de otras consideraciones.

Para conseguir un esquema de muestreo óptimo debe considerarse el número y el espaciado entre muestras. Un número suficiente asegura estimaciones aceptables de los parámetros estadísticos, así como la validez de las técnicas de análisis espacial aplicados. La estimación de la función de covarianza utilizado en las técnicas de autocorrelación, semivariogramas y krigado, es más precisa cuando el número de muestras es grande (Mcbratney y Webster, 1983), aunque ni éste ni el número mínimo de pares de muestras a una distancia h necesarias para tener una buena estimación de la semivarianza han sido claramente establecidos. Así Journel y Huijbregts (1978) indican que las semivarianzas estimadas son

poco confiables cuando el número de pares es inferior a 50; Webster (1985) indica que cada estimación de $\gamma(h)$ debería ser realizada con lo menos 80 pares y Russo (1984) sugiere un mínimo de 30 pares de comparaciones por cada distancia.

La distancia máxima entre parcelas a ser analizada quedaría definida, según una comunicación personal de Journel a Wollum y Cassell (1984), por un $1/4$ ó $1/2$ de la distancia máxima entre las muestras más alejadas. Webster (1985), en el caso de transectos, sugiere no estimar las semivarianzas para una distancia entre muestras mayor a $1/5$ de la longitud total; para distancias mayores, el número de pares decrece rápidamente y las semivarianzas computadas adquieren una naturaleza determinística más que estocástica (Wollum y Cassell, 1984).

La distancia mínima, en cambio, queda definida por las menores distancias entre unidades de muestreo contiguas. Cuanto menor sea esta distancia, mayor será la varianza de la estimación al utilizar el procedimiento de krigado.

Es oportuno recordar que a medida que es mayor el tamaño de las unidades de observación, menor será el grado de dependencia espacial entre ellas, y viceversa, por lo que una misma variable en una misma región puede dar origen a diferentes semivariogramas, dependiendo del tamaño de las unidades de observación.

Muestreo para aplicar el método geoestadístico.

El esquema de muestreo puede ser sistemático o irregular. Tradicionalmente, las muestras que se utilizan para la realización del semivariograma y aplicación del krigado, provienen de un muestreo sistemático en la cual se puede tener malla (triangular, cuadrangular, rectangular, etc..) o bien transectos (Campbell, 1978; Burgues y Webster, 1980; Mcbratney y Webster, 1983; Miyamoto y Cruz, 1987) en donde el número de observaciones requeridas está determinado principalmente por la extensión del área de estudio y la distancia mínima a la que se desea observar la variable. Con este semivariograma se puede estimar el error de

interpolación de cualquier esquema de muestreo que sea adoptado en una segunda etapa.

En el esquema de muestreo irregular, la ubicación de puntos en el espacio puede hacerse al azar o bien arbitrariamente; en este caso, cuando se calcula el semivariograma experimental el lapso h representa clases discretas de separación entre puntos de observación, ya que la separación entre ellos no es uniforme y por ésto se agrupan en clases discretas.

Russo (1984) propone un método para el diseño óptimo de un esquema de muestreo para propiedades del suelo, que utiliza como punto de partida datos obtenidos con un muestreo previo; el diseño optimizado de esta manera no requiere que las muestras se tomen en arreglos regulares. Para confeccionar un semivariograma sólo es necesario conocer las coordenadas cartesianas de las muestras extraídas, las cuales deben ser representativas de todo el terreno.

Warrick y Myers (1986) desarrollaron una metodología para la ubicación de los sitios de muestreo en forma óptima con respecto a una distribución preespecífica de pares para las clases o intervalos de distancia (h). Efectuaron la optimización en base a la simulación de realizaciones de una variable en el espacio. El esquema puede ser usado tanto para escoger un conjunto completo de puntos como para seleccionar puntos adicionales o algún esquema de red o transecto ya existente.

Se ha trabajado y se continúa haciendolo en la búsqueda de estrategias de muestreo tanto con fines de variografía como de krigado. En este contexto se ubican los reportes de Hughes y Lettenmaier (1981), Russo (1984), Warrick and Myers (1987) y Odeh (1990). No es un tópico agotado pero dichos trabajos dan lineamientos para elegir la estrategia de muestreo acorde a los fines de estudio específico.

La geoestadística no busca sustituir a los métodos comunes de clasificación de tierras (levantamiento fisiográfico y/o de suelos), más bien los puede complementar para resolver la posible variación aún presente en las unidades obtenidas en aquellas. Asimismo, el resumir la estructura de

la variación espacial en el semivariograma, puede usarse para diseñar un muestreo eficiente de propiedades del suelo como lo proponen Mcbratney y Webster, 1981.

Finalmente, es común que a la geoestadística se le asocie con interpolación, y de un sólo paso se cumple tanto con variografía como con krigado. Se soslaya tanto el análisis exploratorio de los datos como la posible presencia de un componente de escala en la variación.

Esto puede implicar sesgo en el variograma teórico, y por ende en la interpolación de valores. Para ello, es necesario antes que nada minimizar errores en la técnica de medición de las variables. Asimismo, explorar la escala a que se encuentra la estructura de la variación. Esto último se logra con un muestreo exploratorio para variografía, que considere la equidistancia y dirección del muestreo. Con ésto se considerará la posible presencia de anisotropía, además de definir la escala de la estructura de la variación (Flores, 1987).

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y OBJETIVOS

Para la producción de cosechas es condición deseable que el suelo tenga buena cantidad y disponibilidad de los nutrientes esenciales. Ello propicia un buen desarrollo radicular, drenaje y retención de humedad, además de facilitarse su manipulación y laboreo.

Sin embargo la mayoría de los países en vías de desarrollo, la agricultura de temporal se encuentra asociada con agricultores de tipo tradicional y de subsistencia y su baja productividad constituye uno de los problemas más serios con que se enfrentan sus economías.

Algunas de las características más importantes de la agricultura de temporal-subsistencia son: a) bajo uso de fertilizantes y rendimientos de los cultivos; b) la presencia de riesgos climáticos para producir, debido fundamentalmente a la escasez y deficiente distribución de las lluvias, lo cual determina incertidumbre sobre los rendimientos de los cultivos; c) un predominio de agricultores pequeños y d) una parte importante de la producción se dedica al autoconsumo o subsistencia familiar (Volke, 1979).

La importancia de la agricultura de temporal en México queda demostrada en base a que alrededor del 80% de su tierra laborable corresponde a terrenos de temporal, así de las cuales se estima que el 80% presenta condiciones de deficiencia del recurso agua de lluvia. Lo anterior, aunado a las condiciones geográficas, climatológicas, edafológicas, sociales y económicas que prevalecen en México han originado que en el 41% de los predios agrícolas se practique la agricultura tradicional, en el 52% la agricultura de subsistencia, y tan solo en el 7% se este practicando la agricultura moderna (Martínez, 1974).

Tanto en México, como en otros países en vías de desarrollo, se han hecho intentos a través de los planes de desarrollo agrícola, para solucionar el problema de la agricultura de temporal-subsistencia.

Sin embargo, los éxitos en este aspecto han sido la excepción y el problema subsiste. Las causas del fracaso o limitado éxito de los programas de desarrollo agrícola se encuentran asociados por una parte, en la no adopción de las tecnologías mejoradas y por el otro lado como lo señala Márquez (1977) el cual expone diversos factores entre los que se encuentran: "Los problemas agrícolas desde hace tiempo se han intentado resolver bajo la política productonista, es decir aquella que cree que el problema rural de México y/o en general los problemas de la agricultura en el país se van a resolver con sólo elevar la productividad (rendimiento unitario); así han venido una serie de planes y actividades institucionales destinadas a dicho fin (*INIA, PRONASE, CONAFRUT*, etc.) todos ellos con la característica de dedicarse en su mayor parte a las tierras agrícolas de alto potencial, pues está claro que en lo que a crédito se refiere, las tierras de baja productividad (ejidales, comunales, inclusive en muchos pequeños propietarios) generalmente no están sujetas a crédito; además de encontrarse en suelos que por su topografía ondulada y/o montañosa, son poco profundos con graves problemas de erosión.

Todos aquellos suelos de alta productividad, están siendo ocupados por otros cultivos que son más redituables tales como el tabaco, sorgo, pastizales, etc.

Entre la diversidad de factores directa o indirectamente relacionados con la situación arriba expuesta, existe uno que por sí mismo, merece ser expuesto; una buena planeación y un buen manejo adecuado de los sistemas de producción agrícola, pecuario y forestal son posibles si se conoce el comportamiento y la respuesta de los recursos naturales que componen el ambiente. Por otra parte, la cantidad de información necesaria para caracterizar estos recursos no es accesible siendo en ocasiones la limitante principal para la obtención de resultados precisos y la adopción de la recomendación de paquetes tecnológicos por el agricultor.

Es bajo este marco donde cobra importancia el estudio de la variabilidad de atributo geográficamente referenciados, sobre todo el

suelo que es un recurso que se halla estrechamente relacionado con la producción de alimentos de cualquier región. Conocer como se comporta el suelo a partir de sus propiedades y la variabilidad de las mismas, espacial y temporalmente, permitiría interpretar de una mejor manera las distintas respuestas de un sistema de producción de cultivos, por efectos de estabilidad estructural, drenaje, abasto nutrimental o aplicación de fertilizantes entre otros.

Con base a lo anterior, el presente trabajo tiene como primer objetivo el estudio de la variabilidad espacial de las propiedades químicas del suelo, usando la teoría de las variables regionalizadas bajo un enfoque variográfico exploratorio, en un suelo de temporal del ejido El Carrizo, municipio de San Juan del Río, Estado de Querétaro. Los objetivos que se persiguen son: 1) Caracterizar las propiedades químicas de las muestras del suelo, colectados en campo tanto horizontalmente como verticalmente; 2) Estudiar la variabilidad espacial de dichas propiedades del suelo como variables aleatorias regionalizadas.

4. AREA DE ESTUDIO

Localización geográfica.

En el presente trabajo se seleccionó como zona de estudio un rancho de aproximadamente 3 hectáreas del ejido "El Carrizo" perteneciente al municipio de San Juan del Río, Estado de Querétaro. El ejido colinda al Norte con el ejido de La Llave; al Sur con San Juan del Río; al Este con el ejido Santa Matilde y al Oeste con San Juan del Río. El sitio de muestreo se localiza entre los paralelos 20° 27' de latitud N y 99° 57' de longitud Oeste con una altitud de 1900 m.s.n.m. (fig 6 y 7).

Clima

Con base al sistema climático de Köppen, modificada por E. García (1981), el clima del área de estudio corresponde al tipo BSi w (W), semiseco templado con temperatura media anual, oscila entre los 16 y 18°C. La media mensual máxima se registra en mayo con 19.6°C y la mínima en diciembre con 14.2°C. La cantidad de lluvia anual va de 450 a 630 mm y es en los meses de julio y agosto cuando se presenta la mayor incidencia con 114 mm, en febrero sólo alcanza 5.7 mm (fig 8). Lo anterior es debido a que terrenos de relieve levemente ondulado o plano con altitudes menores de los 2000 m.s.n.m los cuales están rodeados por sierras, mesetas y lomeríos tanto del Eje Neovolcánico como de la Sierra Madre Oriental impiden el paso de los vientos húmedos del Golfo de México y la Mesa del Centro (INEGI, 1986).

Geología.

La zona de estudio está ubicada en la provincia del Eje Neovolcánico, el cual se encuentra constituido litológicamente por rocas volcánicas del Terciario y Cuaternario de diversos tipos de texturas -derrames lávicos, tobas y brechas volcánicas- que forman en conjunto un extenso y grueso paquete superpuesto a las rocas del Mesozoico que caracterizan al dominio de la Sierra Madre Oriental (fig 9a).

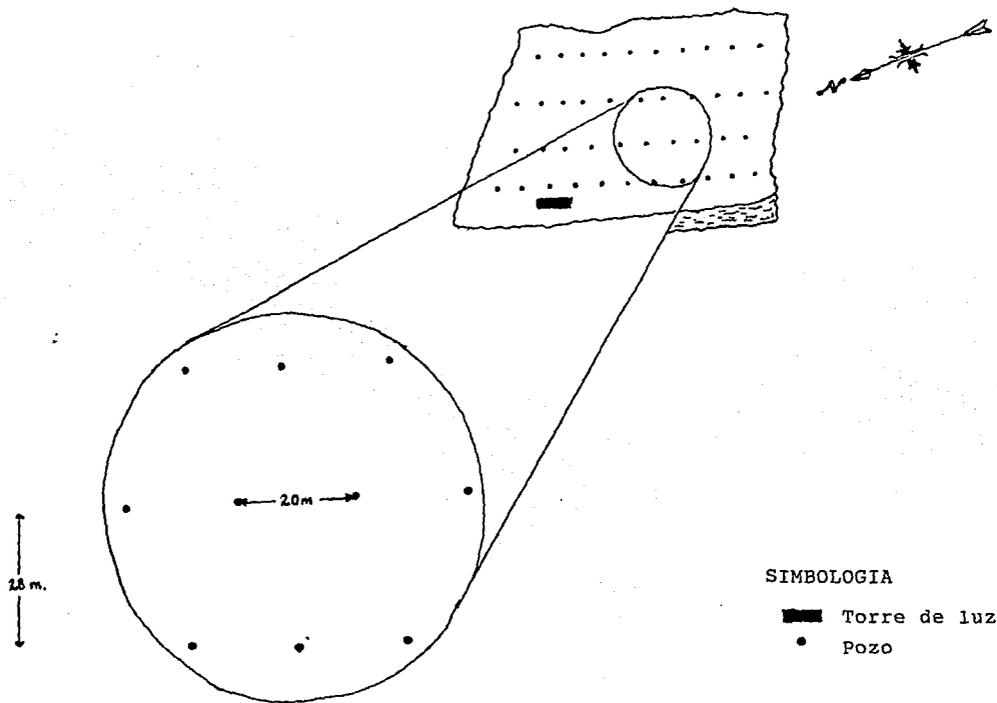
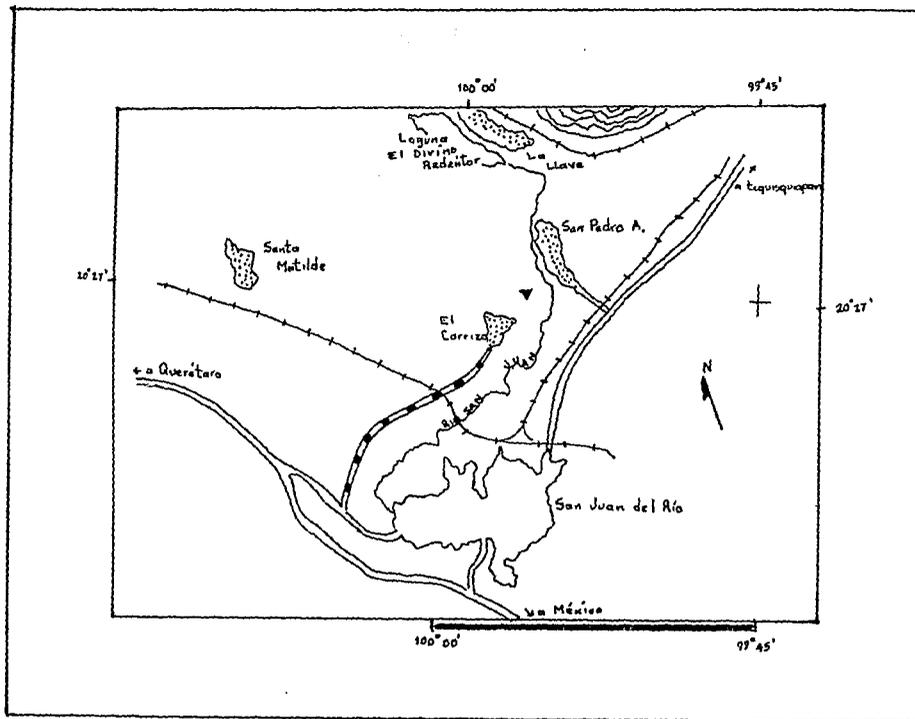
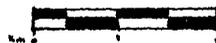


Fig10. Esquema de muestreo



SIMBOLOGIA

Area de estudio	▼
Carretera pavimentada	====
Terraceria	▬▬▬▬
Ferrocarril	—+—+—+—



Fuente: INEGI, 1986.

Fig 6. Localización geográfica del área de estudio.

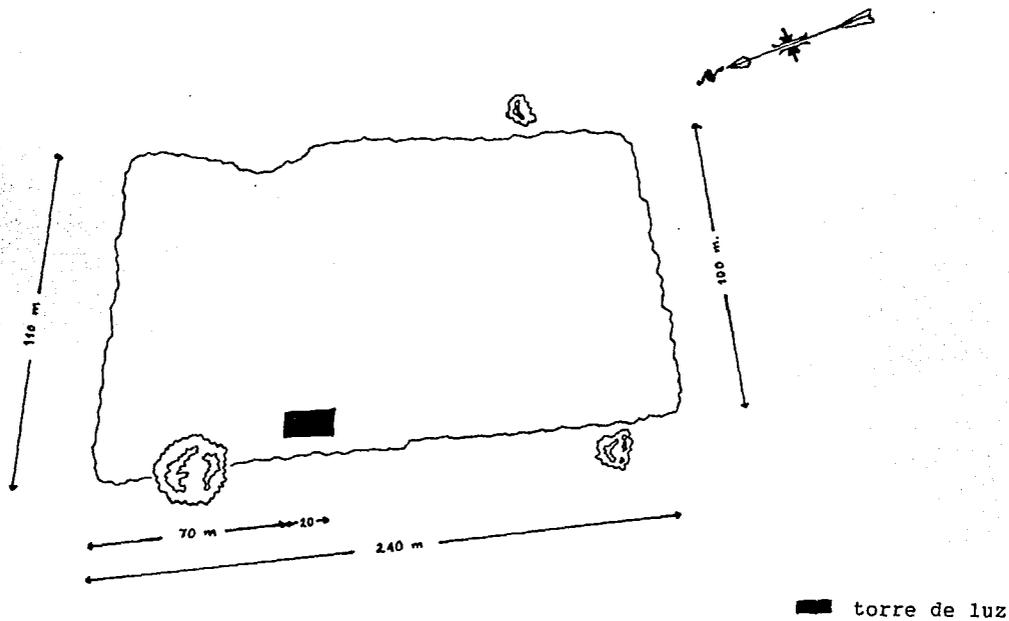
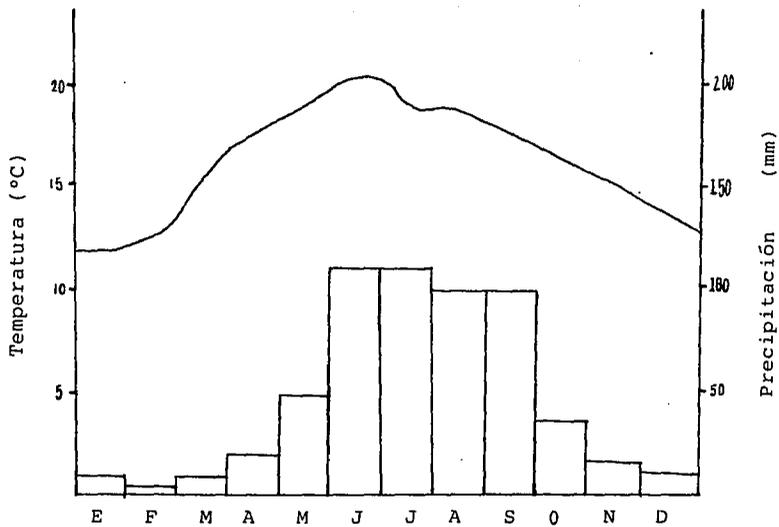


Fig 7. Area de Estudio.

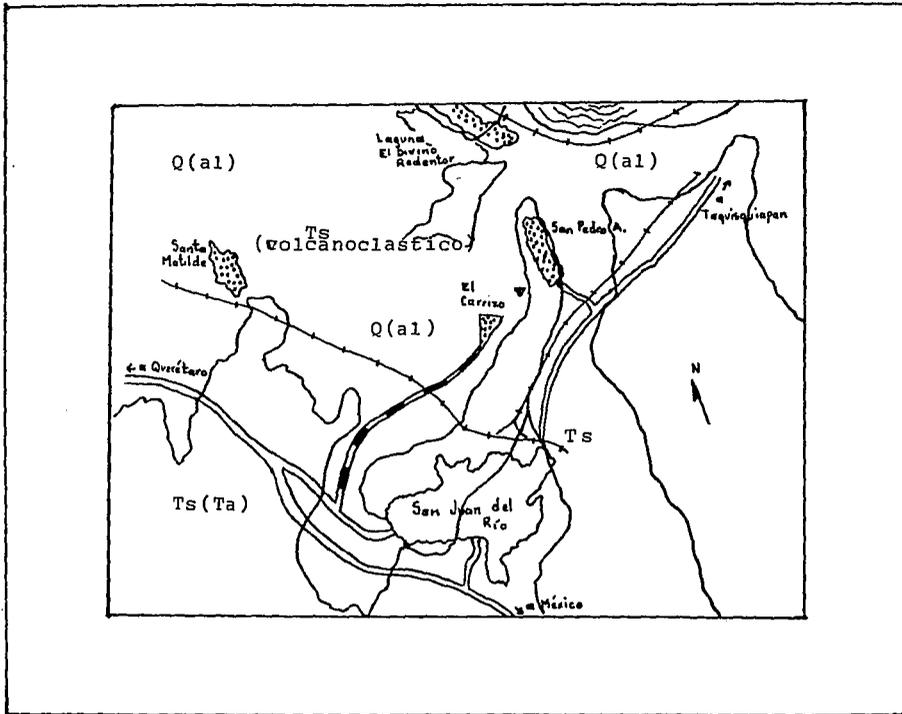


Temperatura media anual 17.8°C

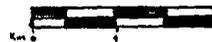
Precipitación anual 52.3mm

Clima (Köppen mod. por García, 1981) BSI w (W)

Fig.8 Gráfica de Temperatura-Precipitación de la Estación
meteorológica San Juan del Río, Gro.



SIMBOLOGIA



Cenozoico	{	Cuaternario aluvial Q-a1
		Terciario superior toba acida Ts-Ta

Area de estudio

Carretera

Terraceria

Ferrocarril



Fuente: INEGI, 1986

Fig. 9a

CARTA GEOLOGICA

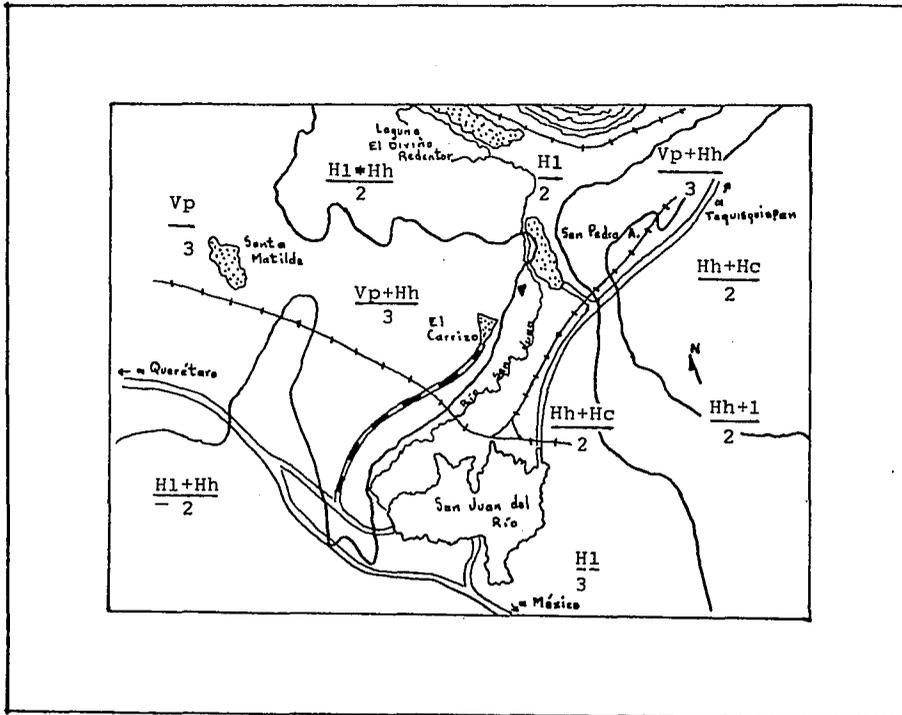
La morfología del paisaje está representada por diversos tipos de estructuras volcánicas que por ser relativamente jóvenes están bien conservadas, como son: conos cineríticos, volcanes compuestos, flujos piroclásticos y extensos derrames lávicos de basalto con formas de mesetas y planicies, sobre los cuales el continuo vulcanismo han acumulado materiales fragmentables de relleno volcano-clásticos. Las rocas ígneas extrusivas constituyen la mayor parte en la región, son de composición ácida, intermedia y básica, pertenecen al Terciario superior y cubren irregularmente a las rocas sedimentarias del Mesozoico. También hay depósitos lacustres del Terciario Superior, integradas por lutitas, conglomerados y rocas volcano-clásticas, que son correlacionables con la Formación Tarango y descansan discordantemente sobre las rocas volcánicas mas antiguas. Las unidades rocosas más jóvenes son los basaltos y conglomerados del Cuaternario. De esta misma era datan los depósitos de suelos aluviales y residuales diseminados en la provincia.

Hidrología

En la zona de estudio se encuentra una pequeña corriente fluvial del río San Juan, que sola la cruza de noreste a suroeste en su porción este, aunque como consecuencia del desarrollo industrial, que ha tenido el municipio de San Juan del Río, la contaminación del agua se ha incrementado, observandose dichos efectos en las corrientes fluviales, así como en la presa El Centenario y en algunos terrenos dedicados al cultivo.

Topografía

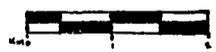
La zona de estudio presenta lomerios de colinas redondeadas suaves, con pendientes mayores del 5% y menores al 2%. Esta configuración topográfica sitúa a la zona dentro de la agricultura de temporal.



SIMBOLOGIA

Feozem	{	Feozem Luvicó	H1
		Feozem Calcarico	Hc
		Feozem Haplico	Hh
		Vertisol Pelico	Vp

Textura	
1.- Gruesa	2.- Media 3.- Fina
Area de estudio	
Carretera	
Terraceria	
Ferrocarril	



$\frac{Hh + Hc}{2}$ Suelo predominante + suelo secundario
 Clase textural

Fig. 9B
 CARTA EDAFOLOGICA

Fuente: INEGI, 1986.

Suelos

De acuerdo con la clasificación de la FAO-UNESCO, modificada por la Dirección General de Geografía del Territorio Nacional (DGGTN), los suelos predominantes de la zona son: Feozem lúvico, Vertisol háplico y en menor proporción Litosoles y Rendzinas (INEGI, 1986). El suelo muestreado es un Feozem háplico el cual con base al análisis del perfil de diagnóstico presenta un horizonte "A" melánico bajo el cual subyace un horizonte C de textura arenosa algo densa y compacta. Son de color café o gris muy oscuro, textura franca de migajón arenoso, estructura migajonosa poliédrica subangular fina (fig 9b). Gracias a la forma de relieve y a la textura, estos suelos poseen un drenaje superficial bueno y eficiente.

Actividad Agrícola

Dentro de la zona de estudio comprendida en el presente trabajo se presenta una actividad agrícola principalmente de temporal, basada en la siembra de gramíneas forrajeras anuales, entre las que destacan, el Maíz (*Zea mays* L), Sorgo (*Sorghum vulgare*) y Trigo (*Triticum* sp). La mecanización agrícola es solo estacional. La fertilización del suelo se basa principalmente en la aplicación de fertilizantes químicos y ocasionalmente se incorporan abonos orgánicos de origen animal.

Vegetación

Para la zona correspondiente a San Juan del Río la vegetación se consigna como Matorral Crasicaule, acompañados por mezquital y pastizal natural. En la última década esta vegetación se ha visto perturbada por el establecimiento de zonas agrícolas, en donde la agricultura es de temporal y cultivos semipermanentes.

5. MATERIAL Y METODOS

5.1 Diseño del esquema de muestreo para variografía

5.1.1 Consideraciones generales

La pregunta fundamental que motivó la presente investigación fué ¿Qué separación usar entre puntos de muestreo? En la revisión bibliográfica previa la respuesta era que no existen reglas aplicables, ya sea por propiedad o por clase de suelo, entonces de entrada había que resolver un problema de escala de medición de las variables a un nivel parcelario. La escala de medición es importante porque se puede perder información sobre la variación espacial dentro de la separación mínima usada entre puntos.*

Teniendo en mente que existe siempre la posibilidad de la variación de microescala, es decir, la variación que se anida dentro del espaciado mínimo entre puntos de muestreo, y que tiene su aportación al efecto de pepita en el semivariograma, estudios realizados por Burrough, 1983; Cressie and Horton, 1987; Flores, 1987 y Camargo, 1989 han optado por realizar un estudio preliminar de variografía para escudriñar la separación entre puntos de muestreo, buscando minimizar el aporte de la variación de microescala al efecto de pepita. Lo ideal es tener un efecto de pepita nulo para lograr interpolaciones precisas al usar el variograma en el krigado.

5.1.2 Esquema de muestreo

Longitudinalmente los puntos muestreados tuvieron una orientación en sentido sureste a suroeste siguiendo la forma de la orientación de los surcos en el campo, distribuyendose como se señala en la fig 10.

En ella las muestras de suelo se obtendrán de pozos que se distribuyen en el área formando una malla triangular y en cada vértice se hizo un pozo de 40 cm de profundidad obteniéndose de 11 a 12

* Comunicación Personal Cajuste B. Lenom

puntos de muestreo en cada dirección que hacen un total de 86 muestras, el cual se tomaron a dos profundidades en intervalos de 0-20 y 20-40 cm.

Todas las muestras de los pozos fueron depositadas en bolsas de polietileno y etiquetadas para ser transportadas al laboratorio, fueron secadas al aire y tamizadas en tamiz de 2.0 mm de abertura de malla, para después realizar sus respectivos análisis de laboratorio.

5.2 Trabajo de laboratorio

Las técnicas empleadas en el laboratorio para efectuar los análisis de las muestras de suelo considerado en este trabajo, fueron los siguientes:

5.2.1 Reacción (pH) del suelo.

Se efectuó empleando un potenciómetro Corning con electrodo de vidrio, determinándose en extracto de suelo saturado a una relación suelo/agua 1:1.

5.2.2 Contenido de materia orgánica.

Se realizó por determinación indirecta, por medio del carbono orgánico por combustión húmeda, con calor de dilución del H_2SO_4 y titulando con sulfato ferroso 1 N (Jackson, 1982).

5.2.3 Conductividad eléctrica.

La salinidad evaluada a través de la conductividad eléctrica se determinó preparando un extracto de suelo saturado a una relación suelo/agua 1:1, utilizando un puente de Wheatstone (Grande, 1985).

5.2.4 Bases intercambiables y solubles.

Las bases intercambiables Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ se determinarán por el método propuesto por Schollenberger y Simmons (1945) que consiste de una solución extractora de acetato de amonio (NH_4OAc) 1 N de pH 7.0. Durante la centrifugación los cationes básicos son desplazados de los sitios de intercambio catiónico por el ión NH_4^+ y son

recibidos en el extracto de saturación para su posterior cuantificación.

Los cationes monovalentes solubles K^+ y Na^+ en el extracto de saturación, se cuantificarán mediante un espectrofluorómetro, mientras que los cationes divalentes solubles Ca^{2+} y Mg^{2+} se determinarán mediante una titulación con EDTA (Jackson, 1982).

5.2.5 Carbonatos, Bicarbonatos y Cloruros.

La determinación de carbonatos y bicarbonatos se hizo usando la técnica de volumetría por neutralización ácida, y cuantificación de cloruros por titulación con nitrato de plata (Grande, 1985).

5.2.6 Determinación de sulfatos.

La determinación de sulfatos solubles se efectuó usando el método turbidimétrico (Grande, 1985).

5.2.7 Determinación de nitrógeno.

El % de nitrógeno se estimó a partir del factor de conversión de la materia orgánica a nitrógeno, bajo el supuesto de que este forma parte de alrededor del 5 % de la materia orgánica (Cajuste, 1977).

5.2.8 Determinación de la capacidad de intercambio catiónico

Para llevar a cabo la determinación de la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) se utilizó el método de saturación con NH_4^+ propuesto por Gavande (1974) que consiste de cuatro pasos: (1) La saturación de los sitios de intercambio catiónico del suelo con NH_4^+ (2) eliminación (por lavados) del exceso de sales (3) desplazamiento del complejo de intercambio del catión saturado con una solución concentrada de otro catión (4) determinación cuantitativa del catión saturado que se ha desplazado.

5.2.9 Fósforo asimilable.

Se utilizó el método de Olsen (1954) recomendado para determinar el fósforo aprovechable en los suelos neutros y alcalinos.

5.3 Procedimiento Analítico

Los modelos conceptuales para el análisis de los datos son como sigue. Uno general que considera a cada uno de los valores de las propiedades químicas evaluadas como la realización, z , de una VA Z representada de acuerdo con el modelo operacional que se indica a continuación, en el que toda observación para una fecha de muestreo dada, t , se descompone en un efecto de la media o deriva, μ , y otro del error, ε , es decir:

$$Z(x_i)t = \mu(x_i)t + \varepsilon(x_i)t \quad (5.1)$$

donde t representa a la fecha de muestreo y k al transecto (clase de equidistancia entre puntos), con n puntos en él; con x_i se denota la ubicación relativa del punto de muestreo en el transecto.

Bajo el modelo (5.1) se espera que no exista efecto de fecha de muestreo, ni de escala de medición, es decir $\mu(x_i)1 = \mu(x_i)2 = \mu(x_i)3$, y pueda modelarse globalmente la variabilidad espacial analizando la variación del componente de error, $\varepsilon(x_i)$

Un segundo modelo de representación con los mismos componentes de efectos de media (μ) y error (ε) que en (5.1) es el que considera a las realizaciones de la VA Z para una fecha (t) y clase de equidistancia de muestreo (k) fijas. Bajo este modelo sólo se tiene el componente de posición, i , dentro del transecto, es decir:

$$Z(x_i) = \mu(x_i) + \varepsilon(x_i) \quad (5.2)$$

Cuando se cumple el supuesto de estacionaridad en el proceso, o en otras palabras, el valor de la media no depende de la posición en el transecto, entonces sólo se tiene el componente de error con el que se pretende modelar el variograma para una fecha y clase de equidistancia dadas.

El análisis exploratorio de los datos consiste en la obtención de las pruebas estadísticas univariadas tales como la media, coeficiente de variación, varianza, sesgo y kurtosis así como un análisis de prueba de bondad de ajuste utilizando la prueba de Kolmogorov-Smirnov con un nivel de significancia del 95% para el caso de aquellas variables que no se ajusten a la distribución normal.

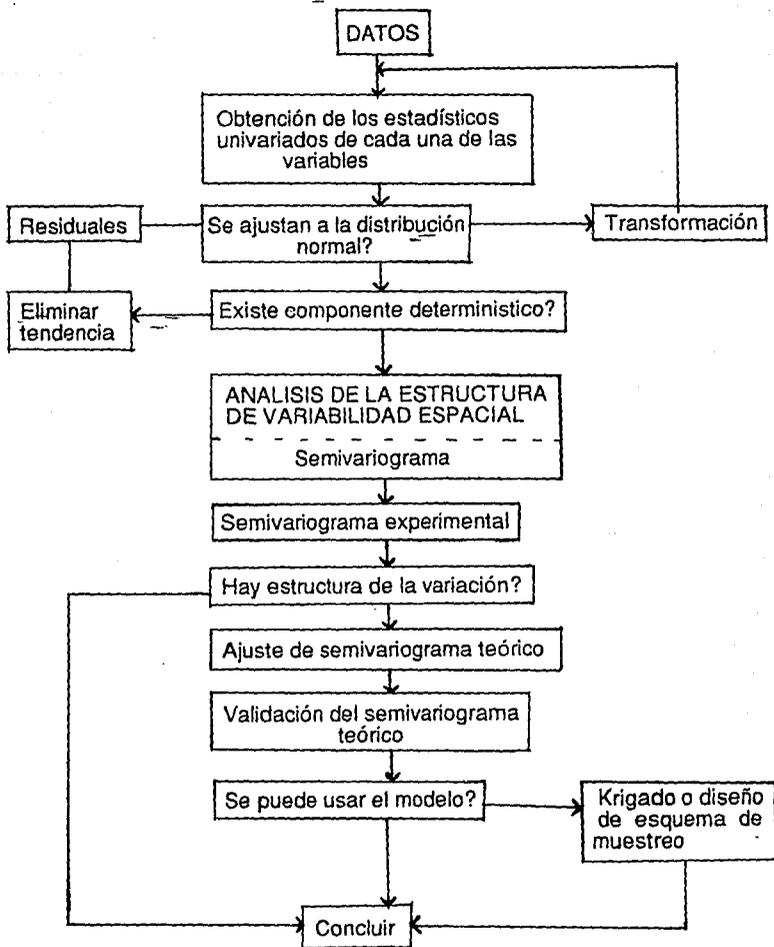
La estructura de la variabilidad espacial puede analizarse mediante dos herramientas: autocorrelograma y semivariograma (o simplemente variograma). En el presente estudio debido a que es variográfico exploratorio únicamente se hará énfasis en el estudio del semivariograma.

5.3.1 Prueba de Normalidad

Puede pensarse que la distribución normal en los datos es un modelo realista, y por ello la regla más que la excepción. De aquí que este supuesto casi nunca se corrobora. Sin embargo, en muchas aplicaciones de la geoestadística es necesario revisar este supuesto.

La aplicación de la geoestadística requiere la revisión de dos supuestos, antes de proceder a la fase de variografía. Estos son el de estacionaridad y normalidad. Para la revisión del cumplimiento de estos supuestos, Hamlett *et al* (1986) recomiendan un análisis exploratorio de los datos previo a la variografía. De no cumplirse los supuestos, la adecuación del semivariograma (versión robusta) será dudosa, al igual que los análisis y conclusiones que se obtengan de él; así con el cumplimiento de normalidad en la serie de datos se puede usar la estimación robusta del variograma que proponen Cressie y Hawkins (1980).

En el cuadro 2 se muestra el esquema seguido para el análisis de los datos de las propiedades estudiadas, proveniente del esquema analítico seguido por Flores, 1987. Incluye básicamente las fases de análisis exploratorio de los datos y de estructura de la variación espacial.



Cuadro 2. Esquema del procedimiento analítico empleado (basado en Flores, 1987).

El análisis exploratorio de los datos que usan Hamlett *et al.* (1986), se basa en técnicas de análisis gráfico no paramétricas argumentándose un ajuste más flexible y facilidad de aplicar, en relación con las técnicas paramétricas. Las pruebas de bondad de ajuste usadas por Rao *et al.* (1979) se basa en los estadísticos de la prueba de Kolmogorov-Smirnov.

Existen situaciones en las que es tal el desapego de los datos a la distribución normal, que no basta contemplar el uso de estimadores robustos del variograma. En tales situaciones lo recomendable es la transformación de los datos buscando una mejora en la simetría de su distribución empírica.

Transformación de los datos

Al no apearse los datos a la distribución normal, se puede pensar en transformarlos buscando un buen ajuste de los datos a ella. Aunque la inspección gráfica de los datos puede sugerir ciertas transformaciones, es práctica común la transformación logarítmica.

Si con la transformación logarítmica de los datos se logra un buen ajuste a la distribución normal, los datos tienen una distribución log-normal.

Ahora bien, ¿es válida cualquier transformación de los datos? si es así ¿qué efectos tiene sobre otras suposiciones? para avalar inclusive el cambio de escala original o logarítmica (y considerar otras como cuadrados, raíz cuadrada y cúbica así como recíprocos). Cressie y Horton (1987) dicen apearse a un "principio de transformación universal, el cual dice que la aditividad de los efectos pequeños (normalidad), la aditividad de los efectos pequeños a los efectos grandes (estacionaridad de las varianzas), y la aditividad de los efectos grandes (no interacción), todas tienden a ocurrir en la misma escala". Según los autores citados con esto hace sentido analizar los datos en la escala de transformación, y convertirlos a la escala original cuando sea necesario.

Con lo anterior, en cierta medida, se avala cualquier transformación de los datos; pero resulta conveniente revisar los supuestos de estacionariedad una vez que se ha corroborado la normalidad en los datos originales o su transformación.

5.3.2 Análisis de la estructura de la variabilidad espacial.

El conocimiento de la ley de distribución no da ninguna información sobre la variabilidad de las observaciones en relación con su posición en el espacio. La investigación de estructuras espaciales eventuales puede efectuarse por métodos tomados de las técnicas del análisis lineal (función de autocorrelación, análisis espectral) y/o de la geoestadística (semivariograma).

Para poder trabajar con la variografía fué necesario primeramente calcular los valores de semivarianza experimental para cada una de las variables, lo que se realizó por medio del programa GEOEAS (Geoestatistical Environmental Assessment Software) así como la elaboración de un programa pascal. A los semivariogramas experimentales se les ajustaron modelos mediante la observación gráfica de estos modelos los cuales se describirán a continuación.

Obtención del semivariograma experimental.

Para obtener el semivariograma experimental es necesario usar los estimadores de semivarianza con base en la muestra tomada. Partiendo de la hipótesis intrínseca, en la expresión (2.5) se definió a la semivarianza $\gamma(h)$; en (2.13) quedó definido el estimador de $\gamma(h)$ bajo la hipótesis intrínseca. A su vez el estimador (2.11) es válido bajo el supuesto de estacionariedad de segundo orden y usa la definición de covarianza.

Se ha dicho también que estacionariedad de segundo orden implica la hipótesis intrínseca, pero esta última no implica el cumplimiento de la primera. De esta manera, si el proceso estocástico estudiado es estacionario de segundo orden se espera la equivalencia (convergencia)

- de semivarianzas estimadas con (2.11) y (2.13); pero si sólo se cumple la hipótesis intrínseca, no se tendrá esta equivalencia en estimación.

Obtención del semivariograma teórico.

Para poder usar el semivariograma experimental, ya sea para estimación de valores de la variable aleatoria en puntos no visitados (*krigado*) o para muestreo, es necesario representarlo mediante una función matemática (o modelo). Esto involucra elegir un modelo y ajustarlo a los valores observados experimentalmente.

A) Selección del modelo.

Al semivariograma experimental se le pueden ajustar modelos autorizados. Dichos modelos autorizados tienen la característica de ser semi-definidos negativos condicionales (para definición ver Oliver y Webster, 1986). De los que comúnmente se usan en suelos para modelar datos espaciales se tiene a los de variación de transición y a los de variación no acotada. Los primeros pueden ser de amplitud fija (modelos circular y esférico) o sin amplitud fija (modelo exponencial). El modelo sigmoidal gaussiano es también de variación de transición, pero esta aplicado poco en suelos (Mcbratney y Webster, 1986). De los modelos de variación no acotada se tiene al lineal, aunque si se le trunca a una h dada se tiene un modelo lineal con umbral.

B) Ajuste del modelo.

Consiste en encontrar los parámetros del modelo que se ha seleccionado. Se puede hacer mediante procedimientos subjetivos flexibles (a ojo) como lo descrito por Webster (1985); en el cual se basa en el análisis gráfico del semivariograma experimental. Sin embargo el ajuste automático de los modelos es poco recomendable debido a cierta duda respecto al cumplimiento de los supuestos de los métodos de ajuste (como el de mínimos cuadrados), sobre todo respecto a la independencia de los errores; tampoco se pondera respecto al número de pares que participan en la estimación de semivarianza, ya que éstos disminuyen

conforme el lapso h aumenta.

Como señalan Oliver y Webster (1986) el ajuste del variograma teórico se hace por métodos automáticos cuando se usa como herramienta para el krigado, y en general no se le da una interpretación física. Si bien esto resulta difícil, debe intentarse dentro de lo posible.

El poder o no usar el modelo del variograma teórico ajustado, dependerá de la precisión del ajuste obtenido y su relación con la precisión requerida en los usos que se le van a dar.

c) Uso del semivariograma.

El semivariograma puede ser interpretado para revelar características de la distribución geográfica de las variables regionalizadas. Aquí la interpretación enfocada sobre el alcance del semivariograma es que nos indica el tamaño de la zona de influencia, es decir, el tamaño del área en donde las muestras son estadísticamente asociadas con una muestra en el centro del área. Este concepto provee las bases para la interpolación de valores en un punto no muestreado cuando se le utiliza en el procedimiento de krigado (apendice c). También se le ha propuesto como un instrumento para el diseño de esquemas de muestreo óptimos, es decir buscando una precisión deseada con esfuerzo mínimo (Mcbratney y Webster, 1981). En este trabajo se le usa para interpretar la escala de variación de las variables químicas implicadas bajo dos profundidades. Para éllo se usa el concepto de varianza de pepita y el de amplitud de influencia del variograma. La equidistancia del muestreo que haga mínima la variación de pepita se interpretará como la adecuada, y de ese variograma se inferirá la amplitud de influencia. Dicha amplitud será la que debe usarse para un muestreo posterior con fines de krigado.

6. RESULTADOS Y DISCUSION.

Los suelos estudiados presentaron de acuerdo a las pruebas químicas y a la metodología descrita en la sección de métodos, los resultados siguientes:

Con el fin de establecer que tipo de muestreo y que separación usar entre puntos de muestreo, se procedio a realizar una caracterización preliminar del suelo, cuyos resultados se presentan en el apendice b.

Primeramente se discutiran los resultados obtenidos en términos de las medidas de tendencia central, dispersión y distribución de los datos. Luego se presenta un análisis de la variabilidad espacial, expresada a través de la semivarianza y en seguida un análisis agronómico de los suelos en base a las características químicas que presentan.

En el cuadro 3a. y 3b. se muestran los estadísticos univariados de las 17 variables bajo dos condiciones de estudio: a) 0-20 cms y b) 20-40 cms de profundidad a una equidistancia de 20 mts entre puntos de muestreo.

En cuanto a la profundidad de 0-20 cm se establece primero una comparación en cuanto a su variación, de acuerdo al estadístico coeficiente de variación (C.V.) siendo las variables cloruros (Cl^-), sulfatos (SO_4^{2-}), Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ solubles, magnesio intercambiable y fósforo las que presentan mayores valores de c.v. (36.18-97.96%), coincidiendo con lo reportado por Camargo, 1989 al obtener un c.v. para calcio, magnesio y sulfatos alto (58-122%). La conductividad eléctrica tuvo coeficientes de variación medios al igual que los bicarbonatos, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, así como los cationes intercambiables y el nitrógeno (19.3 - 30.5 %), reportando Camargo un c.v. medio para la conductividad eléctrica de 28 a 30 %; mientras que los valores más bajos se dieron con la variable pH con un valor de 4.9% ligeramente superior a lo observado por Wopereis *et al*, el cual encontró un c.v. del 2% para esta variable.

Cuadro 3a . Resultados de la estadística univariada (media, coeficiente de variación y varianza), así como de dispersión (desviación estandar D.E). Bondad de ajuste a la distribución normal (o log-normal) de acuerdo con el criterio de prueba de Kolmogorov-Smirnov.

Profundidad 0-20 cm							
VARIABLE	UNIDADES	n	MEDIA	D. E.	C. V.	VAR.	DISTRIBUC.*
pH		49	7.847	0.370	4.943	0.137	NORMAL
C. E	mmhos/cm	49	0.220	0.062	28.28	0.003	NORMAL
HCO ⁻³	meq/lt	49	1.501	0.324	21.69	0.105	NORMAL
Cl ⁻	meq/lt	49	1.302	0.857	65.84	0.735	NORMAL
SO ²⁻	meq/lt	49	0.443	0.434	97.96	0.188	NORMAL
Ca ⁺⁺	meq/lt	49	1.284	0.466	36.34	0.218	NORMAL
Mg ⁺⁺	meq/lt	49	0.669	0.303	45.39	0.092	NORMAL
Na ⁺	meq/lt	49	0.497	0.423	85.14	0.179	NORMAL
K ⁺	meq/lt	49	0.234	0.094	40.18	0.008	NORMAL
M. O.	%	49	1.321	0.403	30.52	0.162	NORMAL
C. I. C.	meq/100	49	19.67	2.64	19.30	6.969	NORMAL
Ca ⁺⁺	meq/100	49	11.38	2.587	22.72	6.694	NORMAL
Mg ⁺⁺	meq/100	49	5.965	2.158	36.18	4.660	NORMAL
Na ⁺	meq/100	49	0.260	0.052	20.18	0.002	NORMAL
K ⁺	meq/100	49	1.077	0.267	24.81	0.071	NORMAL
P	ppm	49	18.95	15.20	80.21	291.1	NORMAL
N	%	49	0.066	0.020	30.59	0.004	NORMAL

* Resultados de la prueba de Kolmogorov-Smirnov para normalidad, con estadístico calculado, D, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$D = \sup | F_m(x) - F_t(x) |$$

Nivel de significancia de la prueba: 0.1

Cuadro 3b. Resultados de la estadística univariada (media, coeficiente de variación y varianza) así como de dispersión (desviación estándar D.E), Bondad de ajuste a la distribución normal (o log-normal) de acuerdo con el criterio de prueba de Kolmogorov-Smirnov.

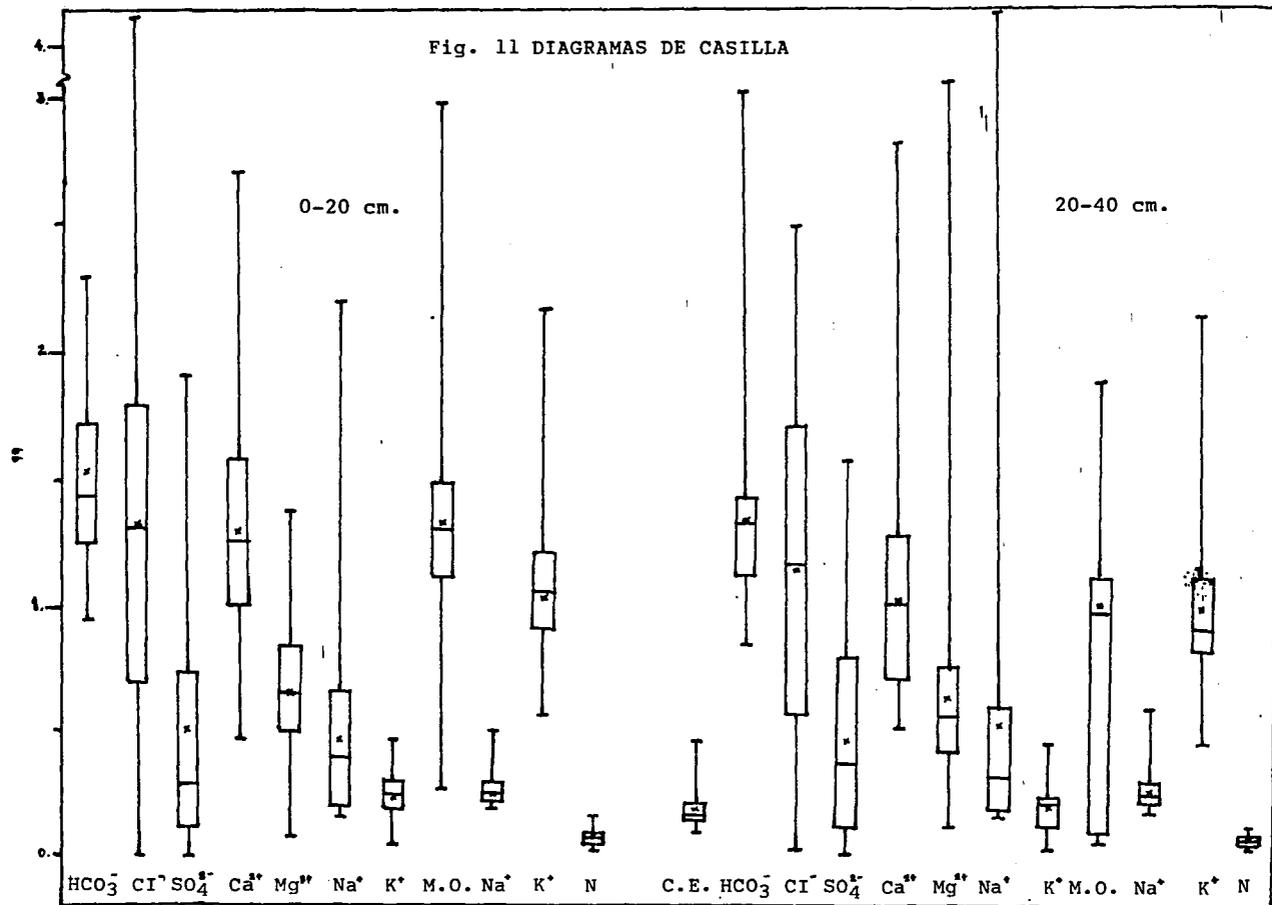
Profundidad 20 - 40 cm							
VARIABLE	UNIDADES	n	MEDIA	D. E.	C. V.	VAR.	DISTRIBUC.*
pH		43	7.478	0.324	4.349	0.105	NORMAL
C. E.	mmhos/cm	43	0.196	0.059	30.47	0.003	NORMAL
HCO ₃ ⁻	meq/lt	43	1.352	0.381	28.22	0.145	NORMAL
Cl ⁻	meq/lt	43	1.162	0.719	61.89	0.516	NORMAL
SO ₄ ²⁻	meq/lt	43	0.507	0.470	92.65	0.221	NORMAL
Ca ⁺⁺	meq/lt	43	1.099	0.470	42.81	0.221	NORMAL
Mg ⁺⁺	meq/lt	43	0.668	0.523	78.33	0.274	NORMAL
Na ⁺	meq/lt	43	0.586	0.794	135.4	0.691	LOG-NORMAL
K ⁺	meq/lt	43	0.195	0.086	44.21	0.007	NORMAL
M. O.	%	43	0.052	0.373	39.19	0.139	NORMAL
C. I. C.	meq/100	43	13.15	3.627	27.56	13.15	NORMAL
Ca ⁺⁺	meq/100	43	10.87	3.230	29.69	10.43	NORMAL
Mg ⁺⁺	meq/100	43	5.30	1.924	36.30	3.703	NORMAL
Na ⁺	meq/100	43	0.265	0.075	28.31	0.005	NORMAL
K ⁺	meq/100	43	1.003	0.358	35.79	0.128	NORMAL
P	ppm	43	16.65	12.06	72.42	145.4	NORMAL
N	%	43	0.047	0.018	39.31	0.003	NORMAL

* Resultados de la prueba de Kolmogorov-Smirnov para normalidad, con el estadístico calculado, D, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$D = \sup | F_m(x) - F_T(x) |$$

Nivel de significancia de la prueba: 0.1

Fig. 11 DIAGRAMAS DE CASILLA



Para la profundidad de 20-40 cm se puede observar una clasificación similar a la obtenida en la primera profundidad (0-20 cm) con la diferencia de que las variables materia orgánica, magnesio y potasio intercambiable así como el nitrógeno pasan dentro de la escala de c.v. mayor (35.7- 135.4 %); respectivamente se sigue manteniendo la misma clasificación para el c.v. de magnitud media a excepción del nitrógeno (27.5 - 30.8 %) así como ubicarse el calcio y el sodio dentro de esta clasificación; en tanto que sigue permaneciendo el pH con c.v. bajo (4.3 %) para esta profundidad.

De acuerdo a lo anterior se puede observar que las propiedades químicas son considerablemente más variables de un punto a otro dentro de una parcela, coincidiendo con lo reportado por Vauclin, 1983 al mencionar que c.v. mayores de 300 % para dichas propiedades no son raros.

Para conocer el tipo de distribución, se procedió a realizar la prueba de normalidad empleando para esto la prueba de Kolmogorov-Smirnov. Analizando los histogramas obtenidos, así como las gráficas de casillas (fig 11) con los valores críticos de D comparados con los valores de tablas de $D_{0.05}$ y $D_{0.01}$ se sometieron a la prueba de hipótesis.

Como se puede observar la mayoría de las variables para la primera profundidad se ajustaron a la distribución normal, mientras que para la siguiente profundidad todas las variables a excepción de el sodio soluble se ajustaron más a la distribución normal que a la log-normal. Para el caso de sodio se ajustó a una distribución normal con transformación log-a de los datos. Como se observa la distribución de las variables es heterogénea, es decir sigue una distribución normal, aún dentro de una misma variable cuando se cambia de profundidad.

En el cuadro 4. se reportan los valores de sesgo y kurtosis; lo que se busca es explorar la causa del comportamiento de la distribución de probabilidad empírica de los datos. El sesgo es una medida de simetría y se deriva del tercer momento respecto a la media; en una distribución simétrica (como la normal) el sesgo vale cero, y valores negativos o

Cuadro 4-. Valores de sesgo y kurtosis en los datos de las variables estudiadas bajo diferentes profundidades.

VARIABLE	0 - 20 cms		20 - 40 cms	
	SESGO	KURTOSIS	SESGO	KURTOSIS
pH	-0.672	3.008	-0.562	3.087
C. E.	3.111	15.459	2.579	12.780
HCO ₃ ⁻	0.593	2.714	3.203	16.793
Cl ⁻	0.845	4.970	-0.024	1.872
SO ₄ ²⁻	1.201	3.942	0.865	2.546
Ca ²⁺	0.629	3.526	1.979	5.741
Mg ²⁺	0.272	2.886	3.079	15.488
Na ⁺	2.108	7.830	0.987	20.233
K ⁺	-0.485	3.114	-0.074	3.441
M. O.	1.401	8.453	0.189	3.722
C. I. C.	-0.502	3.460	-0.555	2.963
Ca ²⁺	0.126	3.210	0.219	3.131
Mg ²⁺	1.371	6.639	-0.161	5.599
Na ⁺	1.942	8.260	2.459	10.248
K ⁺	1.646	7.615	1.668	5.908
P	1.486	4.165	2.157	8.077
N	1.431	8.543	0.226	3.732

positivos se interpretan como indicadores de sesgo a la izquierda o a la derecha, respectivamente, en relación a la media. La kurtosis es una medida de apuntalamiento o exceso de la parte central de la distribución probabilística empírica de los datos, y se desprende del cuarto momento respecto a la media (Flores, 1987); es una medida de interés comparativo cuando está involucrada la distribución normal, ya que se usa como indicio de que una densidad probabilística empírica es más apuntalada (kurtosis > 3) o más achatada (kurtosis < 3) alrededor de su parte central en relación con la normal correspondiente; el valor 3 de referencia para kurtosis (en las desigualdades previas) se debe a que es el correspondiente a la distribución normal. No siempre estas medidas (sesgo y kurtosis) dan la información que por definición proporcionan, no obstante se usan aquí para contrastar los resultados obtenidos sobre ajuste distribucional de los datos.

Con base en la información del cuadro 4 pueden enunciarse ciertas reglas generales para la distribución probabilística empírica (DPE) de los datos de las variables químicas de este trabajo. A una profundidad 0-20 cm los datos con ajuste a la distribución normal, el sesgo (82% de los casos) y la kurtosis (en 82% de los casos) fueron con un sesgo hacia la izquierda y un alargamiento (exceso) en su parte central (Kurtosis > 3); mientras que a una profundidad de 20-40 cm los datos con distribución normal el sesgo (64% de los casos) tuvo un sesgo a la izquierda y la kurtosis, alrededor del 71%, presenta un alargamiento en su parte central.

Para el caso del sodio con un ajuste a la distribución log-normal, el valor de sesgo se presenta con un desplazamiento hacia la derecha, así como presentar una kurtosis extrema de 20.23.

Se puede decir entonces que la ausencia de valores aberrantes y en menor proporción la forma de distribución de las colas en la DPE de los datos de las variables químicas explica el posible ajuste a la normalidad.

6.2 Análisis de la estructura de la variabilidad espacial.

La mayoría de las variables estudiadas presentaron semivariogramas con estructura espacial, aunque esta estructura se manifestó a diferentes distancias entre unidades de observación para las distintas variables. Los modelos y sus parámetros geoestadísticos para cada variable y profundidad se presentan en los cuadros 5a y 5b.

pH del suelo.

El análisis de los semivariogramas de esta variable no mostró la existencia de estructuras anidadas a distancias pequeñas. En ellos se detectó dependencia espacial a distancias mayores entre observaciones. Para la profundidad de 0-20 cm el semivariograma experimental sigue una tendencia similar a un modelo lineal con un alcance de 120 m. y una varianza pepita de 0.020. En el caso de la profundidad de 20-40 cm la tendencia del semivariograma se asemeja más a un modelo exponencial en el cual la estructura espacial queda con un alcance de 98 m. y una varianza pepita de 0.005, estabilizando así las semivarianzas a esa distancia. Los semivariogramas y modelos ajustados a esta escala se presentan en la fig 12.

Conductividad eléctrica.

En ambas profundidades los semivariogramas de la figura 13 (A) y (B) no presentan estructura espacial en ninguna de las profundidades, es decir, debido al comportamiento uniforme que presentan las semivarianzas.

Bicarbonatos del suelo.

El análisis del semivariograma de esta variable a una profundidad de 20-40 cm, muestra una estructura débil ó poco definida, trayendo consigo una nula dependencia espacial. Lo anterior es confirmado debido a la uniformidad de las semivarianzas. En cambio, el semivariograma a una profundidad de 0-20 cm presentó una estructura espacial

Cuadro 5a. Resultados de los parámetros geoestadísticos de los modelos ajustados.

Profundidad 0 - 20 cm.

VARIABLE	MODELO ^a	EFFECTO PEPITA	UMERAL	ALCANCE
pH	LIN.	0.02	0.156	120
C. E.	SIN ESTRUCTURA			
HCO ₃ ⁻	EXP.	0.011	0.1023	90
Cl ⁻	EXP.	0.10	0.615	78
SO ₄ ²⁻	SIN ESTRUCTURA			
Ca ²⁺	LIN.	0.069	0.1635	95
Mg ²⁺	LIN.	0.035	0.079	95
Na ⁺	SIN ESTRUCTURA			
K ⁺	SIN ESTRUCTURA			
M. D.	EXP.	0.005	0.145	95
C. I. C.	SIN ESTRUCTURA			
Ca ²⁺	SIN ESTRUCTURA			
Mg ²⁺	SIN ESTRUCTURA			
Na ⁺	SIN ESTRUCTURA			
K ⁺	EXP.	0.020	0.046	90
P	SIN ESTRUCTURA			
N	EXP.	0.00005	0.00032	90

^a Modelo del semivariograma: LIN, Lineal; EXP, Exponencial

Cuadro 5b Resultados de los parámetros geostatísticos de los modelos ajustados.

Profundidad 20 - 40 cm.

VARIABLE	MODELO ^a	EFFECTO PEPITA	UMBRAL	ALCANCE
pH	EXP.	0.005	0.0725	98.0
C. E.	SIN ESTRUCTURA			
HCO ₃ ⁻	SIN ESTRUCTURA			
Cl ⁻	EXP.	0.05	0.450	71.5
SO ₄ ²⁻	GAU.	0.01	0.2325	87.5
Ca ⁺⁺	EXP.	0.013	0.148	91.0
Mg ⁺⁺	ESF.	0.040	0.330	47.5
Na ⁺	SIN ESTRUCTURA			
K ⁺	SIN ESTRUCTURA			
M. D.	EXP.	0.020	0.124	95.0
C. I. C.	LIN.	4.0	11.0	80.0
Ca ⁺⁺	SIN ESTRUCTURA			
Mg ⁺⁺	SIN ESTRUCTURA			
Na ⁺	LIN.	0.0010	0.0047	110.0
K ⁺	SIN ESTRUCTURA			
P	SIN ESTRUCTURA			
N	EXP.	0.000058	0.00032	95.0

^a) Modelo del semivariograma: LIN, Lineal; ESF, Esférico; EXP, Exponencial; GAU, Gaussiano.

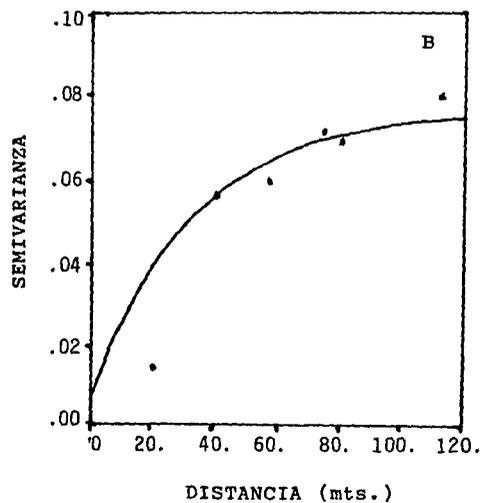
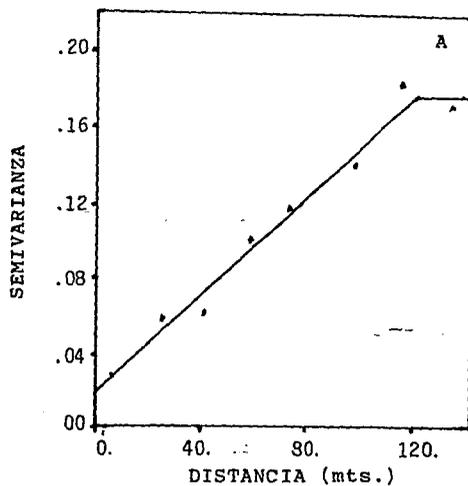


Fig. 12 Semivariogramas experimental (*) y modelos ajustados (-) del pH A)0-20 B)20-40cm.

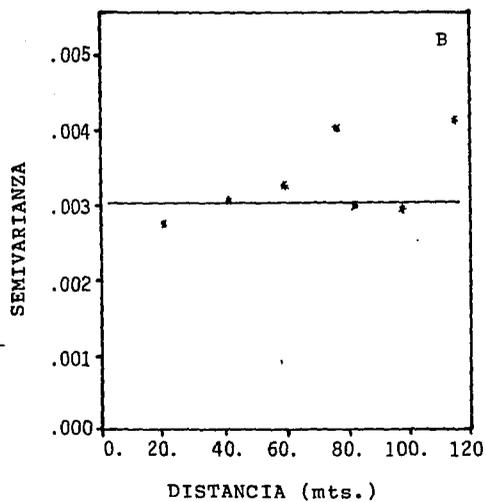
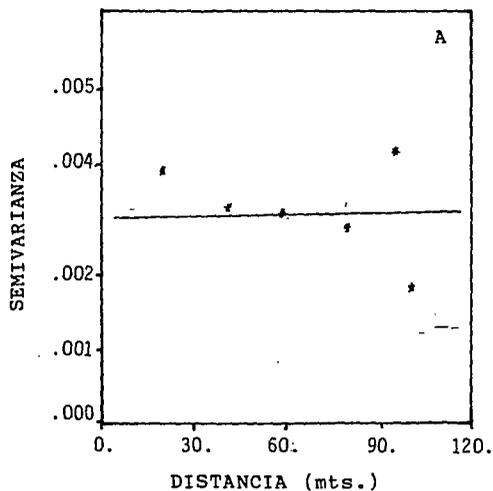


Fig. 13 Semivariograma experimental (*) y modelos ajustados (-) de la Conductividad Eléctrica del Suelo A)0-20 B)20-40 cm.

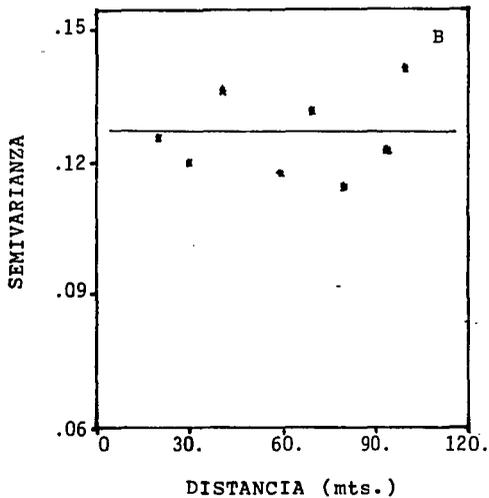
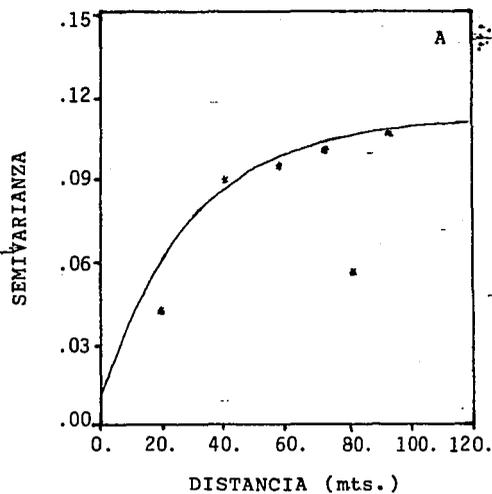


Fig. 14 Semivariogramas experimental (*) y modelos ajustados (-) de bicarbonatos del Suelo A)0-20 B)20-40cm.

claramente definida en donde la tendencia que siguen las semivarianzas es de un modelo exponencial. Para dicha estructura el alcance queda definida a 90 m aproximadamente y una varianza pepita de 0.011. Los semivariogramas y los modelos ajustados se presentan en la fig 14.

Cloruros del suelo.

Como se puede apreciar en la fig 15 (A) el semivariograma obtenido muestra un comportamiento definido, el cual sigue una tendencia similar al modelo exponencial, con un alcance de 78 m de distancia entre observaciones y una varianza pepita de 0.1. Para la profundidad 20-40 cm, el semivariograma experimental se ajusta a un modelo exponencial. Cabe señalar que la dispersión del primer valor de semivarianza respecto al modelo ajustado fue ligeramente mayor, trayendo consigo el poder afectar de cierta manera, la interpolación de valores a través del krigado.

Sulfatos del suelo.

El análisis del semivariograma a una profundidad de 20 - 40 cm puede observarse que dichas semivarianzas siguen un modelo similar a un gaussiano, con un alcance de 87.5 m y una varianza pepita de 0.010. A una profundidad de 0-20 cm el semivariograma no presentó umbral y con un alcance indeterminado, es decir, igual o mayor que la máxima distancia estudiada (110 m), es la característica de esta variable a esta profundidad. Los semivariogramas y modelos ajustados se presentan en la fig 16.

Calcio soluble

En la fig 17 para ambas profundidades se puede ver que muestran una tendencia a incrementarse la semivarianza conforme aumenta la distancia. La estructura espacial que se genera siguen un comportamiento lineal y exponencial para la profundidad de 0-20 y 20-40 cm respectivamente. Para la primera profundidad, el alcance se define a una distancia de 95 m con una varianza pepita de 0.069, mientras que para la siguiente profundidad, el alcance queda definida a una distancia

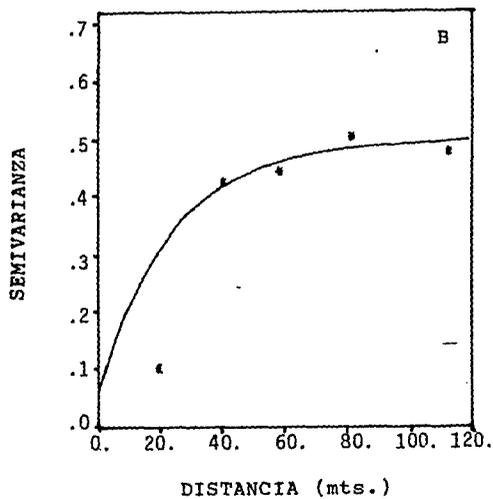
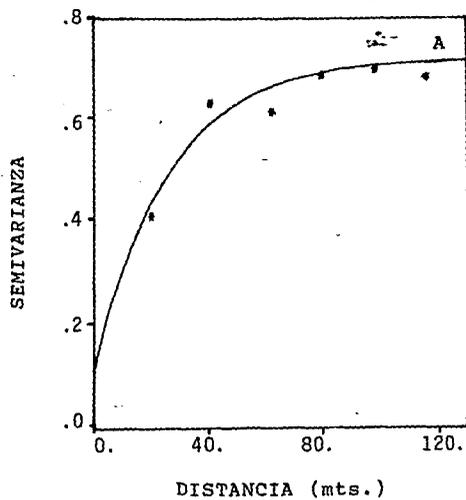


Fig. 15 Semivariogramas experimental (+) y modelos ajustados (-) de Cloruros del Suelo A) 0-20 B) 20-40 cm.

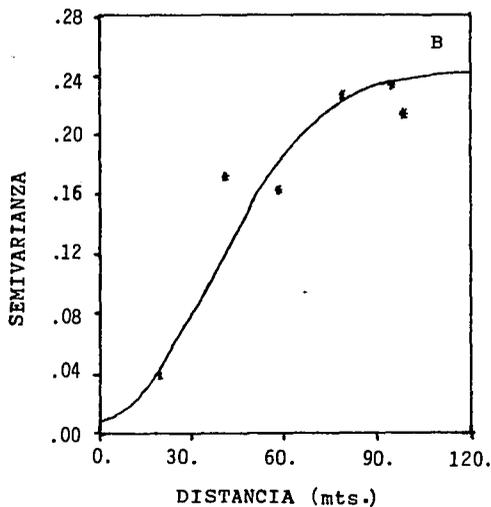
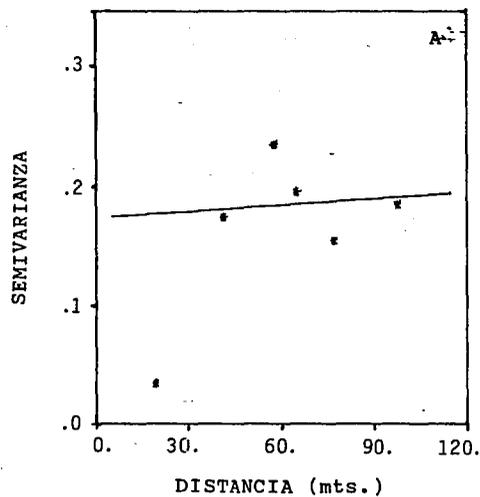


Fig. 16 Semivariograma experimental (*) y modelos ajustados (-) de Sulfatos del Suelo A) 0-20 B) 20-40cm.

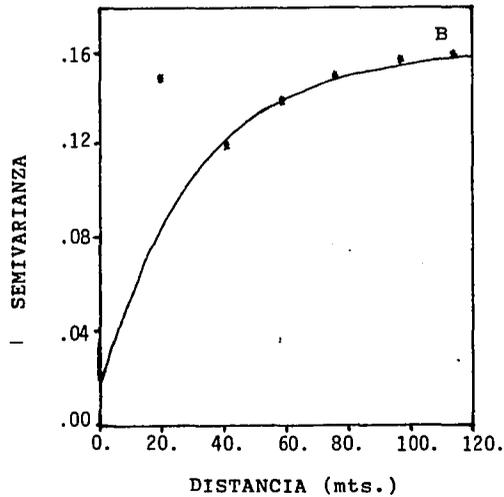
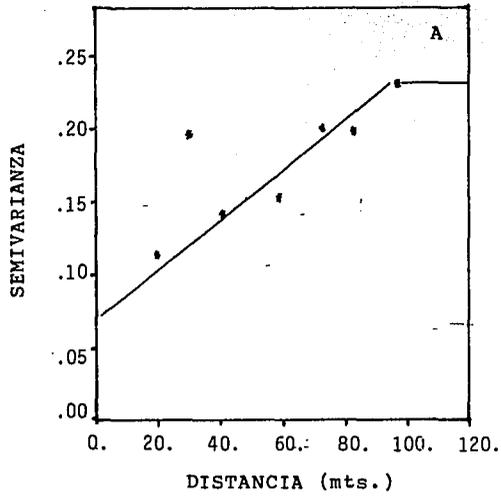


Fig. 17 Semivariograma experimental (*) y modelos ajustados (-) de Calcio Soluble A)0-20 B)20-40 cm.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

de 91 m y una varianza pepita de 0.013.

Magnesio soluble

Como se puede apreciar en ambas profundidades se observa una estructura espacial a distancias mayores entre unidades de observación. A una profundidad de 0-20 cm se detectó dependencia espacial a un alcance de 95 m con una varianza pepita de 0.035. El alcance del semivariograma, a una profundidad de 20-40 cm, queda definida a una distancia de 48 m y una varianza pepita de 0.040. Los semivariogramas y modelos ajustados se presentan en la fig 18.

Sodio soluble

Como se puede apreciar en la fig 19, para ambas profundidades, la dispersión de las semivarianzas trae consigo la nula existencia de estructura espacial a la profundidad y distancia entre unidades de observación exploradas.

Potasio soluble

Al igual que el sodio soluble, se observa que los semivariogramas experimentales no tienen estructura espacial. Lo anterior se confirma al observarse que las semivarianzas siguen una tendencia uniforme sin alejarse de la varianza pepita que es de 0.01 y 0.0075 para la profundidad de 0-20 y 20-40 cm respectivamente. Los semivariogramas y modelos ajustados se presentan en la fig 20.

Materia Orgánica -

En la fig 21 los semivariogramas muestran un comportamiento definido. Para ambas profundidades el semivariograma experimental sigue una tendencia similar al modelo exponencial, con una ligera dispersión de algunos puntos, en el cual el alcance queda definida a 95 m, para ambos casos, y una varianza pepita de 0.005 y 0.020 para la profundidad de 0-20 y 20-40 cm respectivamente. Cabe señalar que la

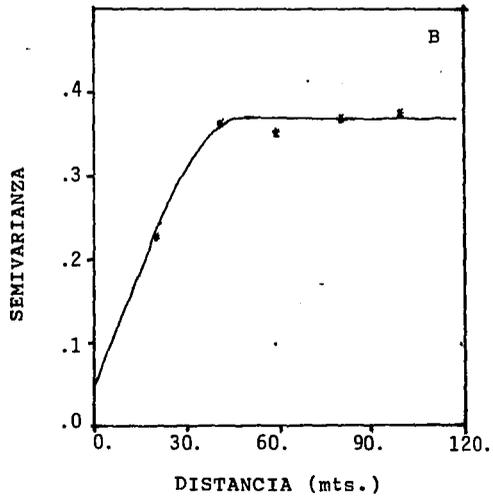
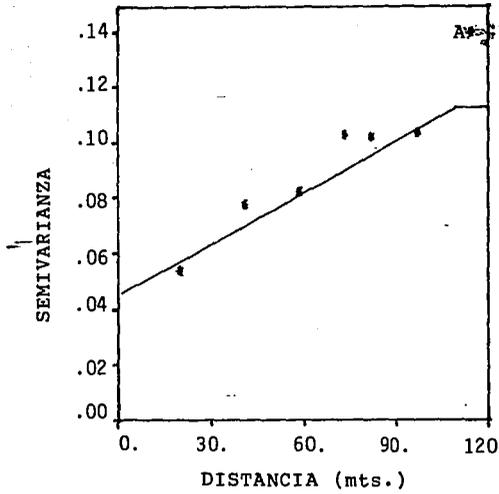


Fig. 18 Semivariograma experimental (*) y modelos ajustados (-) de Magnesio Soluble A)0-20 B)20-40cm.

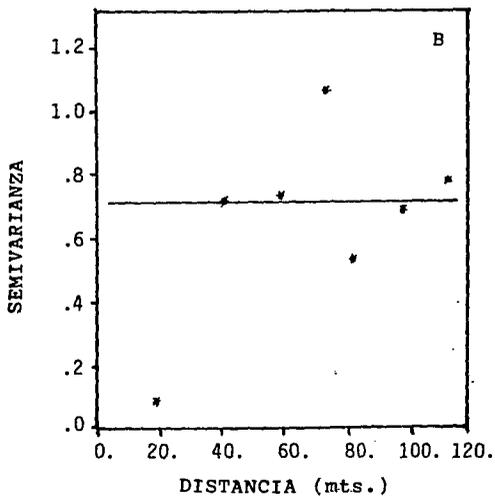
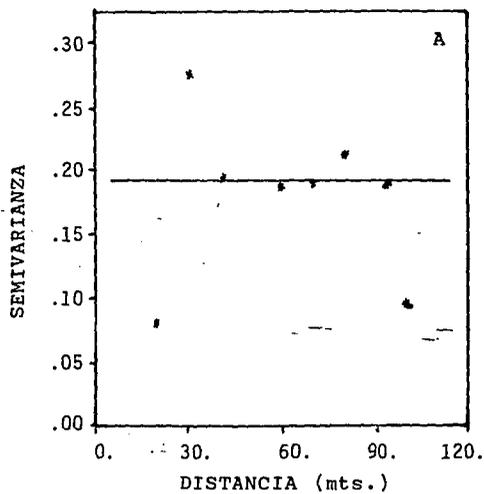


Fig. 19 Semivariograma experimental (*) y modelos ajustados (-) de Sodio Soluble A)0-20 B)20-40cm.

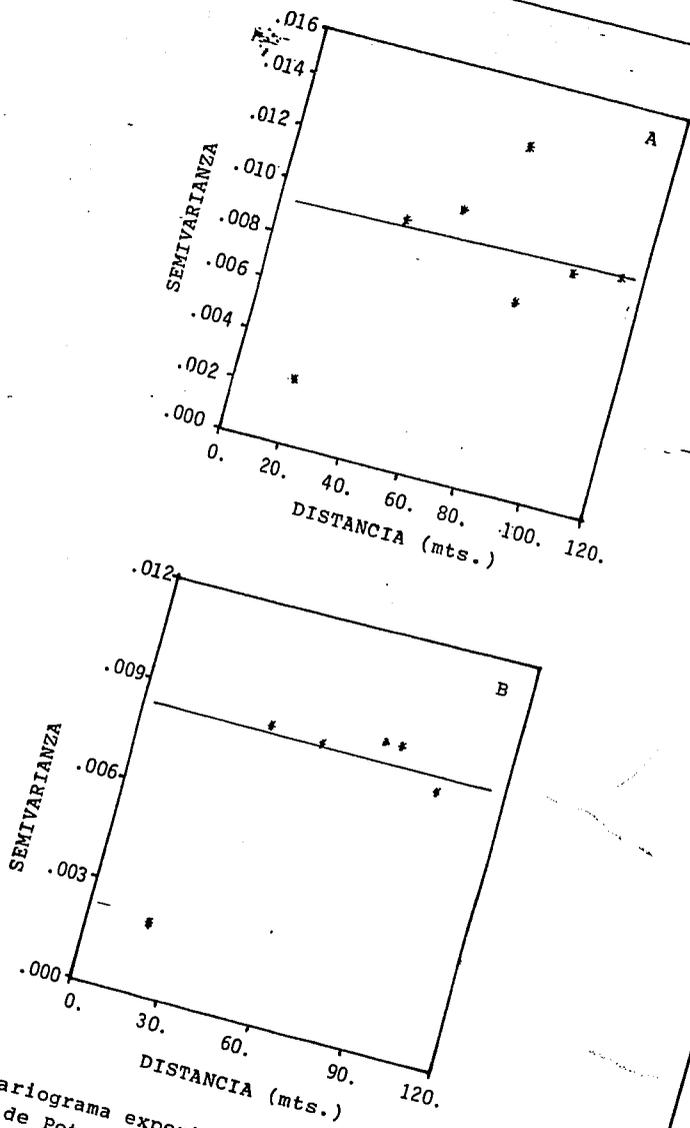


Fig. 20 Semivariograma experimental (*) y modelos ajustados (-) de Potasio Soluble A) 0-20 B) 20-40cm.

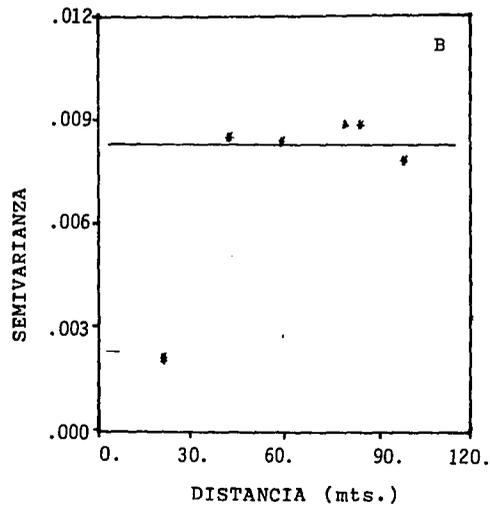
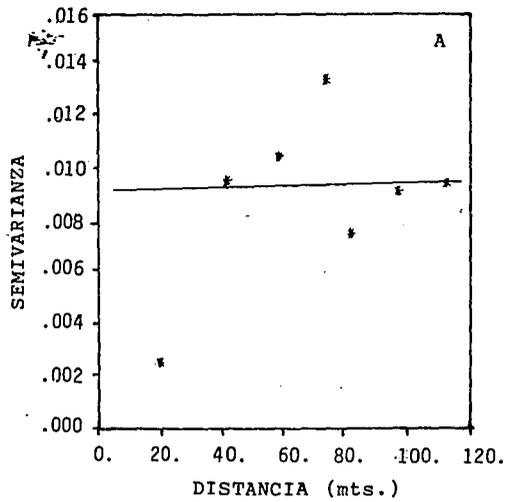


Fig. 20 Semivariograma experimental (*) y modelos ajustados (-) de Potasio Soluble A)0-20 B)20-40cm.

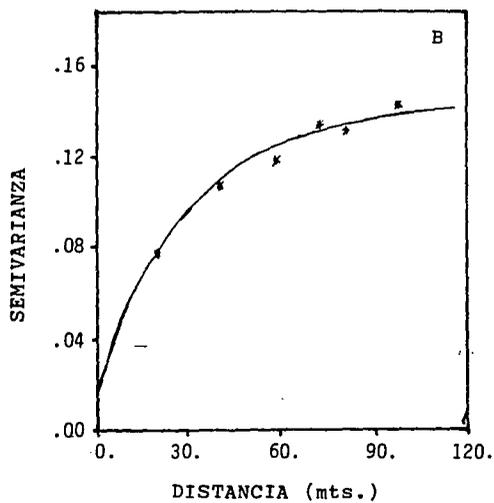
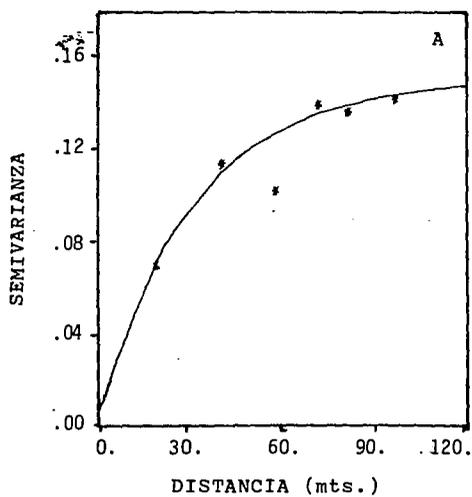


Fig. 2↓ Semivariogramas experimental (*) y modelos ajustados (-) de la Materia Orgánica del Suelo
 A) 0-20 B) 20-40 cm.

dispersión de dichos puntos, puede afectar de cierta manera, la interpolación de valores a través del krigado, por lo que sería conveniente probar una disminución o aumento de distancia entre puntos de observación para esta variable.

Capacidad de Intercambio Catiónico

Esta variable, a una profundidad de 0-20 cm, presenta una tendencia irregular en las semivarianzas alejándose en mayor o menor grado de la varianza pepita que es de 5.1, no presentando una estructura espacial definida. En cambio el alcance, a una profundidad de 20-40 cm donde se presentó una estructura mejor definida, se detectó a los 80 m con una varianza pepita de 4. Los semivariogramas y modelos ajustados se presentan en la fig 22.

Calcio, Magnesio y Sodio intercambiables

Ninguna estructura se detectó en las variables calcio (en ambas profundidades), magnesio (en ambas profundidades) y en el caso del sodio a una profundidad de 0-20 cm se observó una estructura débil o poco definida, debido a la dispersión en forma uniforme de las semivarianzas. Para el caso del sodio a una profundidad de 20-40 cm se encontró dependencia espacial a 110 m. de distancia entre unidades de observación. El hecho de considerar a esta variable con estructura, puede ser discutible, ya que la disposición de las semivarianzas tienden a incrementarse en forma de un modelo parabólico. Los semivariogramas y modelos ajustados se presentan en las figuras 23, 24 y 25.

Potasio intercambiable

En la fig 26 (B) se observa que el semivariograma presenta una tendencia uniforme, alejándose en menor o mayor grado de la varianza pepita que es de 0.107, lo que no permite definir una estructura espacial. En cambio la presencia de una estructura espacial claramente definida es reconocida a una profundidad de 0-20 cm, ya que el

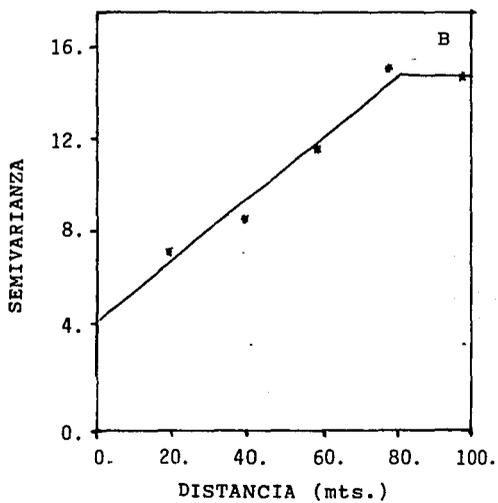
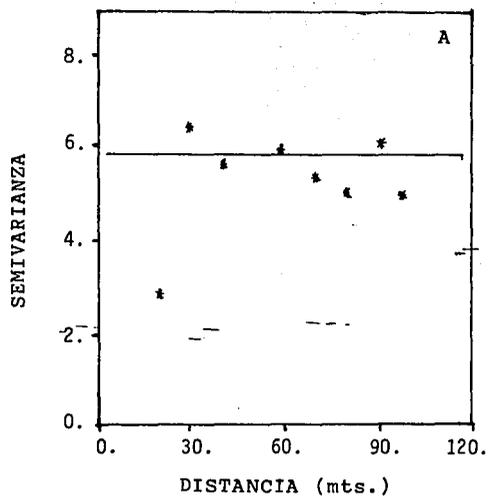


Fig. 22 Semivariograma experimental (*) y modelos ajustados (-) de la C.I.C. del suelo A) 0-20 B) 20-40 cm.

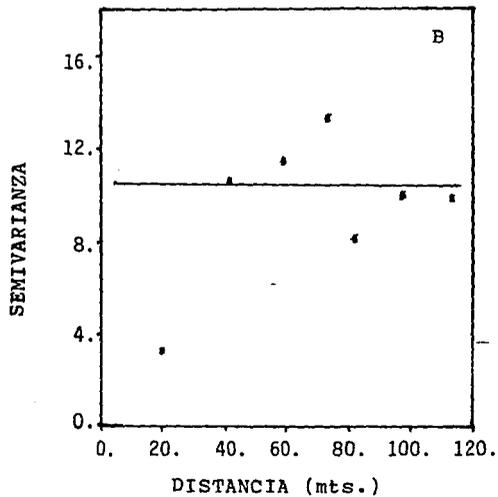
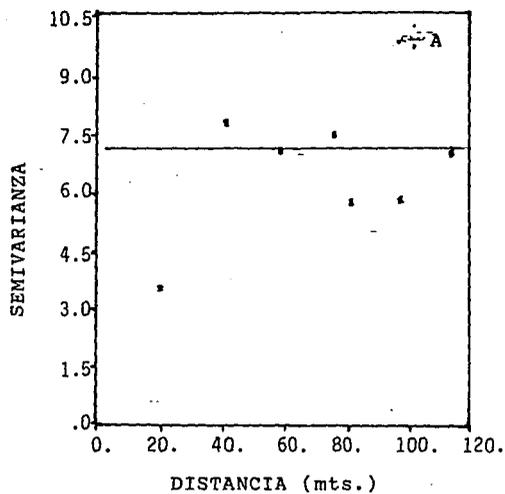


Fig. 23 Semivariograma experimental (*) y modelos ajustados (-) de Calcio Intercambiable del suelo
A) 0-20 B) 20-40cm.

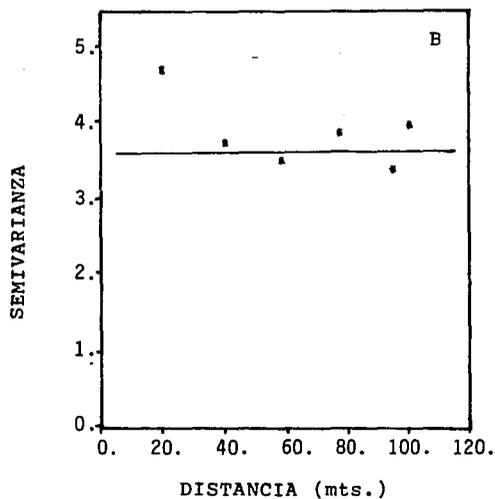
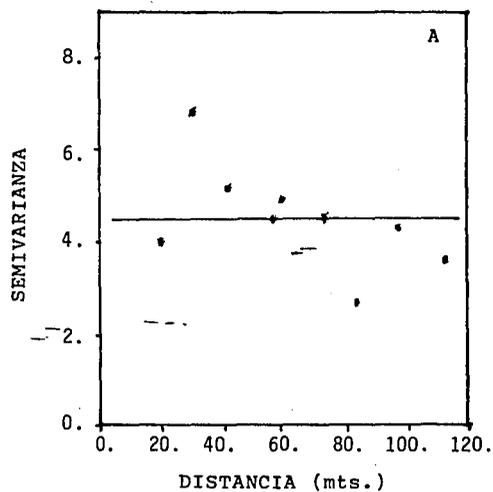


Fig. 24 Semivariograma experimental (*) y modelos ajustados (-) de Magnesio Intercambiable del Suelo A) 0-20 B) 20-40 cm.

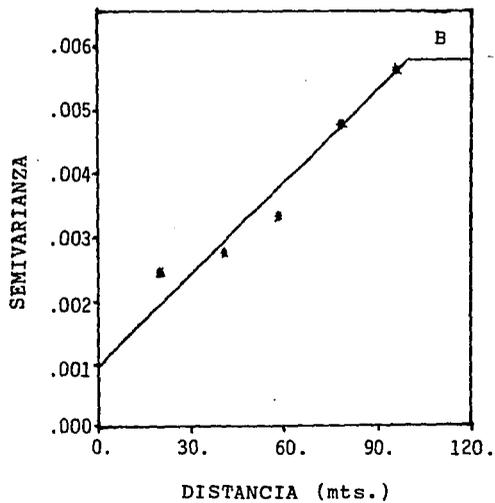
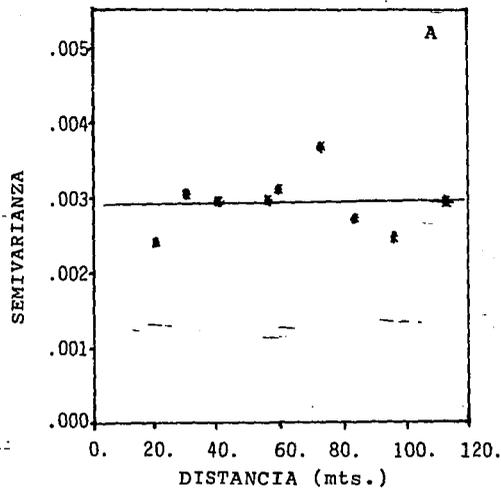


Fig. 25 Semivariograma experimental (*) y modelos ajustados (-) de Sodio Intercambiable del Suelo
 A) 0-20 B) 20-40 cm.

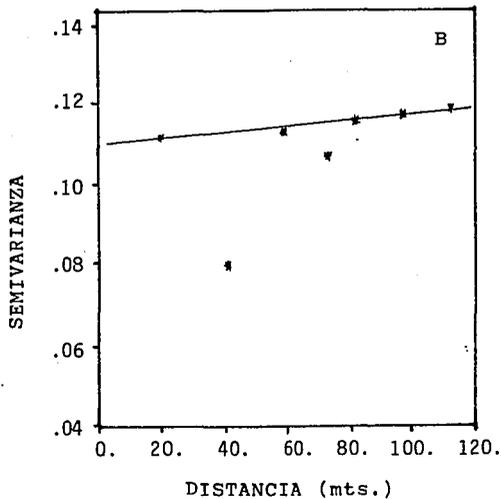
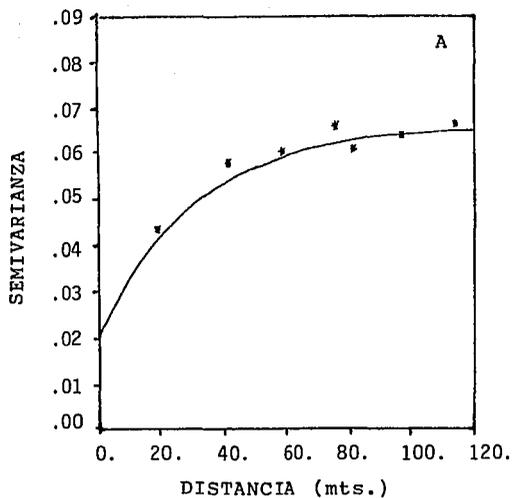


Fig. 26 Semivariograma experimental (*) y modelos ajustados (-) de Potasio Intercambiable del suelo
A) 0-20 B) 20-40 cm.

semivariograma experimental sigue una tendencia a incrementarse la semivarianza conforme aumenta la distancia, siguiendo una forma similar a un modelo exponencial en el cual el alcance queda definido a una distancia de 90 m. y una varianza pepita de 0.020.

Fósforo asimilable

Como se puede apreciar, en ambas profundidades, los valores de las semivarianzas observadas tienden a ser irregulares, es decir no se observa una estructura espacial claramente definida, sin alejarse mucho de la semivarianza pepita que es de 150 y 110 para la profundidad de 0-20 y 20-40 cm respectivamente. Los semivariogramas y modelos ajustados se presentan en la fig 27.

Nitrógeno total

Los semivariogramas obtenidos para esta variable muestran un comportamiento definido. Para ambas profundidades, el semivariograma experimental sigue una tendencia similar al modelo exponencial, en el cual el alcance queda definido a 90 y 95 m de distancia y una varianza pepita de 0.00005 y 0.00058 (siendo los valores de menor proporción de todas las variables estudiadas) para las profundidades de 0-20 y 20-40 cm respectivamente. Los semivariogramas y modelos ajustados se presentan en la fig 28.

De acuerdo a lo anterior el análisis de la estructura de la variabilidad espacial expresado a través del semivariograma experimental y teórico, permite observar lo siguiente:

Se constató la estructura espacial de las variables químicas, a una equidistancia de 20 mts entre unidades de observación, encontrando que hay mucha semejanza entre los semivariogramas de las variables estudiadas, al no haber (o no mostrar) la existencia de estructuras anidadas a distancias pequeñas, indicando con esto la escasa presencia de pequeños agregados, dentro de agregados mayores.

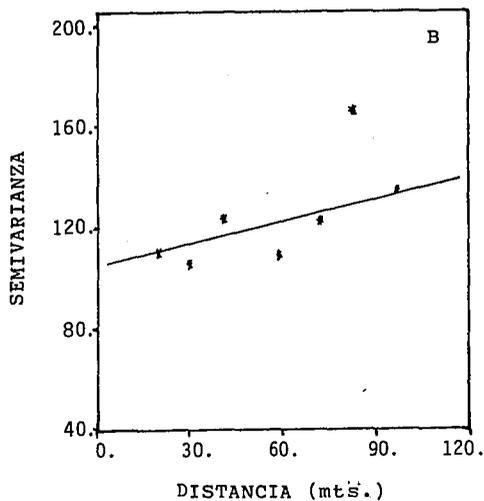
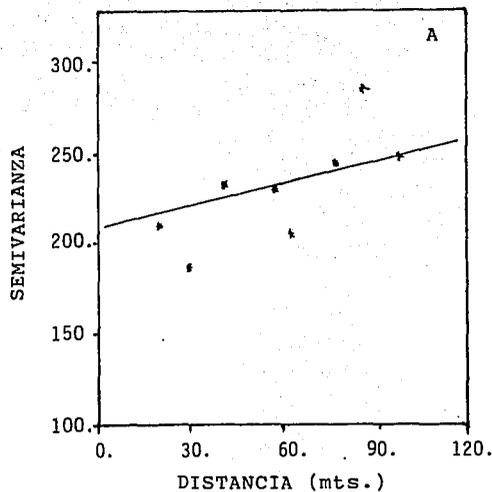


Fig. 27 Semivariograma experimental (*) y modelos ajustados (-) de Fosforo asimilable A) 0-20 B) 20-40 cm.

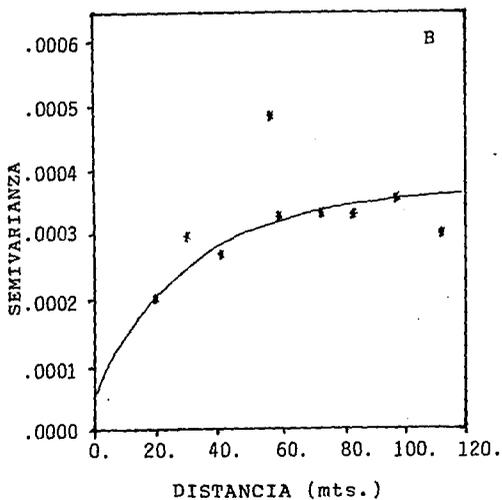
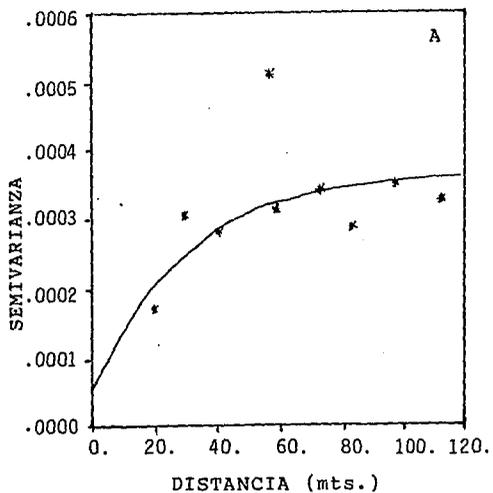


Fig. 28 Semivariograma experimental (*) y modelos ajustados (-) de Nitrógeno A)0-20 B)20-40cm.

En algunos semivariogramas experimentales se infirió muy poca estructura de la variación (cuadro 5a y 5b). La mayor parte de esta fue varianza de pepita, y en general para las propiedades en que se detectó estructura, la amplitud de influencia o alcance oscila entre 78 a 120 m. para la profundidad de 0-20 cm, mientras que de 20-40 cm este oscila de 47 a 110 m. Sobre cuál variograma usar en el diseño de muestreo con fines de krigado, este dependerá de la precisión que se desee; la mayor precisión se logrará con aquel variograma que presente la menor varianza de pepita.

Hacia aquellas variables en donde se observa una clara dispersión de los valores de las semivarianzas [pH (b), bicarbonatos (A), cloruros (B), sulfatos (B), calcio soluble (A), materia orgánica (A), nitrógeno (A y B)] se requiere profundizar al respecto; posiblemente la inspección gráfica del variograma resulte subjetiva y se requiera buscar un estadístico de prueba para juzgar la significancia de los semivariogramas, por distancia o globalmente. Hacia este aspecto el trabajo desarrollado por Cristóbal (1993) propone realizar procedimientos matemáticos (no de manera gráfica como se ha manejado hoy en día) para poder obtener de esta manera los valores de los parámetros de manera insesgada, y poder decidir que parámetro utilizar para el cálculo de los valores de semivarianza.

En todas aquellas variables, donde se presenta una ausencia de estructura espacial se puede señalar que es debido al efecto de la escala de medición (equidistancia) del muestreo trabajado, además de estar influenciado por las condiciones experimentales (técnicas, toma de muestras, error experimental). En los casos en que un muestreo usado en este trabajo no reporte estructura de variación, los resultados pueden usarse para analizar cualitativamente la variografía de los datos. Ello puede evidenciar ciertas alternativas de muestreo basadas en el comportamiento de los niveles de semivarianza.

6.3 Interpretación de los resultados obtenidos en los análisis de laboratorio.

En el apéndice A se presentan los resultados numéricos de todos los análisis químicos efectuados en las muestras de suelos considerados al hacer este trabajo.

El examen de los datos permite formular las siguientes observaciones con respecto a las características químicas de los suelos:

Un aspecto de importancia en la solución del suelo es su reacción, valorada en término de la concentración de iones de hidrógeno expresado como pH. Si un suelo está destinado al cultivo, el valor de pH es importante ya que con él se conocen las condiciones en que se encuentran los nutrientes para ser aprovechados por las plantas y si bien la medición de este parámetro presenta ciertas limitaciones, no por ello, deja de ser un criterio para dilucidar las posibles condiciones químicas de un suelo.

En la fig 29 se muestra el mapa con isoclinas de acuerdo a la disposición espacial realizada por el método de interpolación por Kriging (apéndice c).

Se observa una zonificación: la zona 1 hacia el norte del área presenta un pH que oscila de 6.5 a 7.4, muy ligeramente ácido a muy ligeramente alcalino, y una segunda zona presentándose en la porción superior del mapa en dirección sur, donde los valores de pH oscilan de 7.45 a 8.2, ligeramente a moderadamente alcalino, según la clasificación propuesta por Moreno, 1970.

Estos registros de pH reflejan cierta disponibilidad de nutrientes asimilables de acuerdo a las condiciones que se presentan, es decir en la zona 1 donde existe cierta ligereza de acidez que conforme aumenta la distancia esta disminuye, acercándose a la neutralidad, la reacción refleja la presencia de iones hidrógeno, aunque esta no mayor que la de iones calcio y magnesio, además que ante estos valores de pH se espera

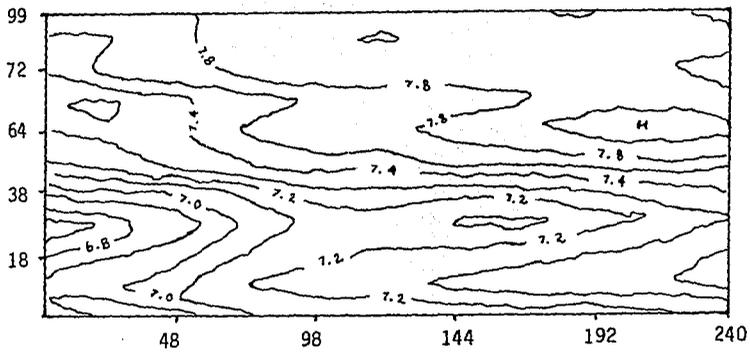


Fig. 29 Mapa de isolíneas de pH del suelo por Interpolación Kriging

que agentes químicos y biológicos se encuentren en equilibrio y que la asimilación de nutrimentos y actividad de los microorganismos sea satisfactoria (Brady, 1984). El fósforo se encuentra en el mejor rango de pH para que sea asimilable, el potasio también se encuentra en posibilidad de ser asimilable, en cuanto al nitrógeno, su aprovechamiento aumenta a un pH alcalino; el Fe^{2+} y Mn^{2+} puede disminuir mientras aumenta el valor de pH, el cobre y el zinc se encuentran en posibilidades de ser asimilables al igual que el boro y azufre así como el calcio y magnesio (Brady, 1984; Donahue *et al.*, 1981).

En la zona 2 donde existe cierta alcalinidad, es posible que el hierro, manganeso y zinc tiendan a ser menos disponibles y el molibdeno aumente su disponibilidad; el fósforo es un nutrimento difícilmente soluble y parece adquirir menor firmeza en la fijación a un $\text{pH}=6.5$ (Ortega, 1978). El aprovechamiento del nitrógeno se espera sea considerable en este rango de valores de pH, ya que los valores ligeramente alcalinos estimulan la actividad de los microorganismos y a su vez la descomposición de la materia orgánica fuente principal de nitrógeno (Brady, 1984; Donahue *et al.*, 1981). El calcio y magnesio se encontrarán activos en este rango de pH.

El valor del pH en la mayoría de los pozos varía en función de la profundidad, generalmente el valor más alto corresponde a una profundidad de 0-20 cm, indicando con ello una concentración de cationes debido a la alta evapotranspiración existente en el lugar.

La conductividad eléctrica nos da un índice de la concentración de iones solubles en el suelo y en base a su concentración el grado indirecto de la alcalinidad del suelo.

Debido a la falta de estructura espacial de esta propiedad, fue totalmente nulo la conformación de un mapa con isolíneas, por el método de interpolación anteriormente citado.

En base a los resultados químicos de las muestras de los pozos se manifiesta la existencia de una zona muy homogénea, oscilando los

valores de 0.11 a 0.53 dS/m. De acuerdo a lo anterior se puede observar que la distribución de la conductividad en términos de profundidad sigue un comportamiento similar al pH (el valor más alto corresponde a la primera capa superficial), pero no así en la formación de zonas, es decir su distribución no presenta un patrón similar al pH. Dentro de la clasificación general de 0 a 2 dS/m quedaria la conductividad eléctrica de estos suelos, en aquellos cuyos efectos salinos son usualmente despreciables en el desarrollo de las plantas.

Para la zona donde se registran valores de pH ligeramente alcalinos, no se tiene correspondencia con la conductividad eléctrica observada, lo cual se podría pensar que no es provocada por el exceso de sales solubles ya que estos se encuentran en condiciones normales de salinidad (0-2 dS/m) así como presentar un valor de PSI menor de 15.

Dichos pH observados son posiblemente causados a través de las elevadas concentraciones de calcio intercambiable presentes en dichos suelos.

Por registrarse valores de pH que varía de muy ligeramente ácido a neutro para la primera zona, se esperaría que los iones carbonato y bicarbonato se presenten en cantidades muy bajas, dado que estos iones abundan en suelos salinos o donde el pH es alcalino (Russell y Russell, 1968).

En la fig 30 se observa una homogeneidad de valores de bicarbonatos para toda el área de estudio a excepción de la parte central inferior donde se observa una acumulación en la concentración (> 1.7 meq/lit) correspondiendo a una zona de depositación de puntos aledaños a la zona. Dichas concentraciones bajas son usualmente despreciables en el desarrollo de las plantas, así como disminuir en profundidad debido a que estos iones son fácilmente lixiviables.

Relacionando los valores de pH y las cantidades encontradas de ión bicarbonato existe cierta concordancia (como se ve expresado en la fig 29 y fig 30) pues con estos valores muy ligeramente ácidos a neutros se

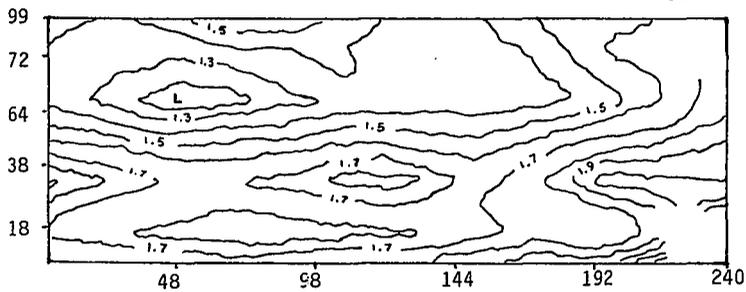


Fig. 30 Mapa de isolíneas de bicarbonatos del suelo por interpolación Kriging.

esperaría que predominaran los iones bicarbonatos y en cambio no se registran carbonatos posiblemente a que éstos tienden a combinarse con calcio y magnesio y se precipiten (Brady, 1984).

De los cationes intercambiables, el calcio es el primero en abundancia y le siguen en orden decreciente el magnesio, potasio y por último el sodio, los niveles de calcio son muy altos, el máximo valor es de 19.91 meq/100 gr y desciende a 4.26 meq/100 gr. El origen de tal proporción de calcio en el área de estudio se encuentra relacionado con la movilidad del calcio a través del suelo, a partir del material parental y con la presencia de coloides minerales y orgánicos que retienen los cationes, es decir, las proporciones de arena facilitan el drenaje, así la movilidad de los cationes a través del suelo será más eficiente.

Idéntica situación existe con el magnesio presente en concentraciones menores que el calcio, pero en cantidades apreciables por sí mismo teniendo el valor más alto de 14.01 meq/100 gr donde es posible que su relativa abundancia se encuentre relacionada con el material parental y además se vea relacionado con los mismos efectos de movilidad y lixiviación del calcio.

En el caso del sodio intercambiable se presentan concentraciones bajas y es poco probable que se tengan los efectos adversos que provocan cantidades excesivas de sodio, además sus bajas concentraciones en las muestras de suelo analizado, indican que no es el que contribuye a obtener valores alcalinos de pH.

Los niveles de sodio intercambiable descienden conforme aumenta la profundidad. Se observa que a una prof. de 0-20 cm se tiene el valor de 0.58 meq/100 gr (apendice A), pero también se tiene el valor ligeramente bajo de calcio, si bien el sodio es un catión fácilmente desplazable y lixiviable, la presencia de concentraciones suficientes de calcio no permite que el suelo retenga grandes cantidades de sodio (Teuscher y Adler, 1980).

Todos aquellos minerales de origen vegetal o animal que se encuentran en diferentes estados de descomposición constituyen parte importante como materia orgánica del suelo. Este material acumulado se encuentra en un estado activo de desintegración y sujeto al ataque por parte de los microorganismos (Ortiz y Ortiz, 1984).

En la fig 31 se muestra la distribución de la materia orgánica observada para el área de estudio. Dicho mapa manifiesta cuatro zonas: una abarcando la mayor parte del área, con valores menores de 1.4%, medianamente pobre, ubicada en la parte superior y central en dirección sur y la segunda zona, ligeramente pequeña, donde los valores son mayores de 1.4%, medianamente rica (Moreno, 1970), ubicada en la porción extrema con dirección norte.

Para la pequeña zona donde corresponden niveles medios de materia orgánica, no sólo representa un almacén de nutrientes, sino también refleja que las condiciones físicas para el desarrollo de raíces vegetales son favorables, así como posiblemente la presencia de fosfatos de amonio, que debido a su elevada solubilidad y casi completa disociación a diferentes valores de pH contribuyen sin lugar a dudas a la nutrición de las plantas (Teuscher y Adler, 1980); la materia orgánica también influye en las condiciones de agregación y granulación del suelo evitando mayor compactación con el aumento de profundidad, para de esta manera facilitar la penetración y elongación de las raíces.

La dos siguientes zonas ubicadas en dirección este-sureste y oeste-noroeste, se observa una disminución en el contenido de materia orgánica, es probable que la proporción de partículas gruesas, es decir la fracción arenosa, se encuentra en forma predominante, los espacios porosos o entre las partículas se pierde la materia orgánica por percolación con el movimiento del agua a niveles mayores del suelo, provocando pérdidas de nutrientes y agua, condición inadecuada para los vegetales (Cajuste, 1977).

Si realizamos una interpretación conjunta de materia orgánica y pH se observa que cuando el pH se presenta ligeramente ácido, se tiene

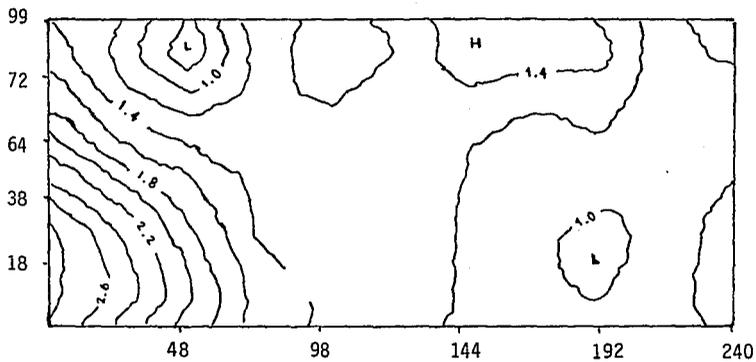


Fig. 31 Mapa de isolíneas de Materia Orgánica del suelo por Interpolación Kriging.

correspondencia con los niveles observados de materia orgánica, ya que probablemente este sea un sitio receptor de partículas finas así como de materiales provenientes de elevaciones aledañas con respecto a los demás puntos.

El nitrógeno en el suelo se encuentra muy relacionado con el contenido de materia orgánica que éste tenga, ya que puede encontrarse en diversas formas, ya sea en su forma elemental (N_2) en la atmósfera del suelo y disuelto en la solución del mismo o combinado como óxido nitroso (N_2O), óxido nítrico (NO) o ambos gases; por último las fuerzas iónicas en la solución del suelo: NH_4^+ , NO_2^{2-} , NO_3^- , son las formas realmente importantes para ser absorbidas por las propias plantas (Ortega, 1978).

Considerando que la fracción de materia orgánica en un suelo es fuente de nitrógeno y fósforo, cuando el contenido de materia orgánica aumenta, los contenidos de nitrógeno y fósforo aumentan también, puesto que son importantes constituyentes de dicha materia orgánica.

De acuerdo a los valores obtenidos de nitrógeno como se puede observar en la fig 32 este permite definir tres zonas; una pequeña zona donde los valores oscilan de 0.092 a 0.148%, ubicándose en la porción norte del área, que va de medianamente pobre a medianamente rico, mientras que hay dos zonas, que abarca la mayor parte del área, donde los valores fluctúan de 0.085 a 0.002%, de medianamente pobre a pobre respectivamente, de acuerdo a la clasificación propuesta por Moreno, 1970.

De acuerdo a los valores medios de materia orgánica, para la primera zona, encontramos cierta correspondencia con los valores medios de nitrógeno total; como se ve la cantidad de nitrógeno en el suelo se encuentra directamente relacionada con la cantidad de materia orgánica, coincidiendo con las observaciones hechas por Brady (1984).

Comparando los valores para un mismo pozo, los porcentajes más altos se tienen en los primeros 20 cm disminuyendo con la profundidad,

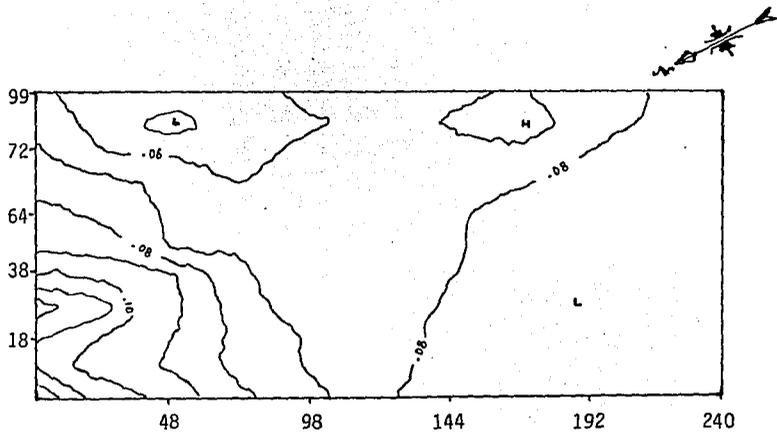


Fig. 32 Mapa de isolíneas para Nitrógeno total del suelo por interpolación Kriging.

aunque la diferencia entre uno y otro porcentaje no es relevante, indicando que en la superficie existe cierta acumulación de materia orgánica y sin embargo existen tales condiciones de drenaje y percolación que permiten -y facilitan- la presencia de partículas orgánicas. Para las siguientes zonas, los suelos poseen un bajo contenido de nitrógeno total en la capa superficial, como en la segunda capa analizada. Esta escasez puede afectar en forma considerable el desarrollo de las plantas.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es una expresión del número de sitios de adsorción de cationes por unidad de peso del suelo (Foth y Millar, 1980).

Debido a la falta de estructura espacial observada a través del semivariograma fué totalmente nula la conformación de un mapa de isolíneas por el método de interpolación por kriging (apendice c).

Actualmente se tiene una escala que nos indica los valores de C.I.C y que indica que valores menores de 15 meq/100 gr tiene capacidad baja; valores de 15 a 40 es de capacidad media y valores mayores de 40 meq/100 gr posee una alta capacidad (Moreno, 1970; Donahue *et al*, 1981).

Comparando estos valores con los valores obtenidos para el área de estudio nos permite definir dos zonas, en base a las propiedades químicas, con características bien específicas: una pequeña zona donde los valores oscilan de 15.00 a 19.48 meq/100 gr clasificándose como una área con capacidad media, conformada por los pozos 1, 2, 3, 4b, 6b, 13, 14, 15, 16, 17b, 18b, 24b, 32, 36, 39, 43a y una zona más grande donde los valores oscilan de 14.78 a 3.81 meq/100 gr clasificándose como suelos con capacidad baja. Para dicha segunda zona lo anterior nos indica que existe un reducido número de sitios de intercambio, así como presentar poca cantidad de cationes intercambiables por unidad de suelo. Esto puede atribuirse a que en dicha zona la proporción de materia orgánica en estos suelos es baja y por lo tanto la proporción de coloides orgánicos como centros activos de adsorción e intercambio

también disminuyen correspondiendo con los bajos contenidos de arcilla presentes (apendice b).

El fósforo es uno de los macronutrientes importantes, cuyo abastecimiento para la demanda de las plantas, depende de diversas fuentes como son: (1) fertilizantes comerciales; (2) estiércol de granjas; (3) residuos vegetales incluyendo plantas enterradas en verde; (4) compuestos naturales de estos elementos, tanto orgánicos como inorgánicos ya presentes (Brady, 1984) y (5) las micorrizas que no sólo asimilan el elemento sino que también lo hacen soluble en gran porción, liberándolo en cantidades superiores a sus propias demandas nutricionales (Alcalde, 1971).

El aprovechamiento del fósforo en las plantas está determinado en alto grado por la forma iónica de este elemento y ésta a su vez viene determinada por el pH de la solución en que dicho elemento se encuentre. En soluciones muy ácidas se tiene el ión PO_4H_2^- , si el pH aumenta predomina el ión PO_4H^{2-} y luego el PO_4^{3-} . En los niveles intermedios de pH, dos de los iones fosfato pueden estar presentes simultáneamente. Esta relación sin embargo, se ve afectada por la presencia o ausencia de otros compuestos o iones, como el hierro o aluminio en condiciones muy ácidas son solubles y en condiciones alcalinas, el calcio predomina y afecta en ambas condiciones la asimilación del fósforo (Teuscher y Adler, 1980; Ortega, 1978).

El fósforo carece de una estructura espacial, expresado a través del semivariograma, por lo que fué totalmente nulo la conformación de un mapa de isolíneas por el método de interpolación por kriging.

De acuerdo a lo anterior, si realizamos una interpretación conjunta de los valores de pH con fósforo, en la primera zona donde se tienen valores de 6.5 a 7.4 se esperaría un favorable aprovechamiento de fosfatos por las plantas; sin embargo aunque algunos de estos pozos pertenecen a un nivel medianamente rico en materia orgánica, que por su carácter aniónico, se esperaría que compitiera con el fosfato y esto provocara una disminución en la fijación de fósforo. En la siguiente zona

donde se tienen valores de pH mas alcalinos -entre 7.4 y 8.2- para esta condición la abundancia de calcio puede influir en la fijación de fosfatos pero de una manera tal que disminuya la asimilabilidad del fósforo, formando compuestos más o menos insolubles, porque comparándolos con los fosfatos de aluminio o fierro estos últimos son todavía más insolubles (Teuscher y Adler, 1980).

De acuerdo a los valores químicos observados en las muestras de suelos en varios pozos se registran valores bajos de fósforo asimilable, no solo en concentraciones de ppm sino tambien en Kg/ha calculados para los primeros 20 cm de profundidad. Los pozos 7b, 9b, 10b, 12a, 14, 16b, 18b, 19a, 20, 21, 22, 24, 25a, 26b, 27, 28a, 29b, 30b, 31a, 32a, 33, 34a, 36b, 37, 40a, y 41a conforman una zona con valores muy bajos de fósforo asimilable -de 1 a 12 ppm- (apendice a). Dentro de esta misma zona los pozos 1, 2, 3, 4, 5a, 8, 11, 17, 23, 28b y 29a registran valores correspondientes a un suelo rico -22 a 28 ppm-, coincidiendo dichos pozos con el porcentaje medio de materia orgánica, ademas de presentarse valores de pH cercanos de 7.0 se esperaría un aprovechamiento favorable de fosfatos para las plantas.

El tercer macronutriente de importancia es el potasio, su contenido en los suelos generalmente es mucho mayor que el nitrógeno o fósforo y una adecuada cantidad de potasio utilizable tiene mucha relación con el tono general y el vigor del crecimiento de las plantas, además de frustrar los efectos nocivos de un exceso de nitrógeno y retrasando la madurez de las plantas, el potasio actúa contra las influencias de un efecto excesivo del fósforo, en general ejerce un efecto compensador sobre el nitrógeno y fósforo (Ortega, 1978).

La cantidad de potasio en los suelos analizados corresponde a las dos últimas fracciones que son extraídas simultáneamente con la solución salina, sin embargo la fracción de potasio soluble llega a ser tan insignificante que se incluye en la fracción de potasio intercambiable, fracción de mayor interés (Ortega, 1978).

De acuerdo a los valores químicos observados en las muestras de suelo se manifiesta la existencia de una zona muy homogénea de potasio, donde los valores oscilan de 0.45 a 2.14 meq/100 gr considerandose como niveles altos de acuerdo a la clasificación propuesta por Etchevers *et al*, 1971.

Dichos niveles altos de potasio intercambiable se puede atribuir a que se encuentra relacionado con toda aquella zona donde se presenta un alto contenido de materia orgánica, la cual como materia coloidal adsorberá con efectividad gran cantidad de cationes, entre ellos el potasio.

En general el suelo así analizado (estudio variográfico y análisis químico de laboratorio) manifiesta una fertilidad baja para la mayor parte del área debido a diversos factores edafológicos, así como ambientales que también son determinantes en la distribución y disponibilidad de los principales nutrimentos para las plantas.

7.1 CONCLUSIONES.

Las conclusiones obtenidas a partir del estudio variográfico a través del semivariograma son:

La variación de los datos, considerando el estadístico coeficiente de variación (c.v.) se agrupa en tres categorías:

VARIABLES

Variación alta	Cloruros, sulfatos, calcio, magnesio, sodio y potasio solubles, magnesio intercambiable y fósforo asimililable
Variación media	Conductividad eléctrica, bicarbonatos, materia orgánica, C.I.C. cationes intercambiables y nitrógeno total
Variación baja	pH

La distribución de los datos fué heterogénea en ambas profundidades de estudio, donde todas las variables a excepción del sodio soluble (20-40 cm), se distribuyeron normalmente.

Se constató la estructura espacial de las variables pH, cloruros, sulfatos, calcio y magnesio solubles, materia orgánica, C. I. C, sodio intercambiable y nitrógeno total a una profundidad de 0-20 cm. A una profundidad de 20-40 cm las variables pH, bicarbonatos, cloruros, calcio y magnesio solubles, materia orgánica, potasio intercambiable y nitrógeno total manifiestan estructura espacial definida.

En ambas profundidades las tendencias de los modelos de los semivariogramas encontrados fueron lineales, esféricos y exponenciales.

La presencia de la varianza al azar en aquellas variables que lo presentan, indican que el procedimiento de krigado no será posible como lo estipula Woperels *et al* (1988) en el sentido de que la varianza al azar o varianza pepita es debido a la microheterogeneidad presente en cada muestra de suelo.

De acuerdo a los resultados en los análisis de las muestras de los pozos se llegan a las siguientes conclusiones:

La alcalinidad registrada en estos suelos es baja trayendo consigo efectos despreciables en el desarrollo de las plantas, el cual no es provocada por sales de sodio, sino por la presencia de bicarbonatos de calcio y magnesio.

El área de estudio posee suelos con niveles medianamente pobres de materia orgánica, ofreciendo desventajas físicas y químicas del suelo.

Posee un pH adecuado para un suelo agrícola para la absorción de nutrientes necesarios para un buen desarrollo del cultivo.

En cuanto a los niveles de nitrógeno total, así como de fósforo asimilable ambos corresponden a niveles medios y bajos, cada nivel conforma una zona en el área de estudio.

La abundancia del calcio en los suelos analizados puede provocar deficiencias de micronutrientes en las plantas, tales como Fe^{2+} , Mn^{2+} , Cu^{+} , Zn^{2+} y B^{3-} . Sin embargo, ofrece ventajas tanto físicas (mejoramiento de textura, estructura, etc), como químicas (capacidad de retención, impide lixiviación de humus etc.) y biológicas (estimula actividad de bacterias, actividad de materia orgánica y nitrógeno), además su abundancia anula el riesgo de deficiencias de calcio y la toxicidad del aluminio.

Agrícolamente es un suelo temporalero, climáticamente corresponde a una zona semiseca templado, con lluvias en verano y en el concepto estricto de fertilidad este suelo es de baja fertilidad.

7.2 SUGERENCIAS.

Para estudios posteriores sobre el tema de estudio de semivariogramas se recomienda lo siguiente:

Hacia aquellas variables en las cuales no se detectó estructura espacial se sugiere aumentar o disminuir la equidistancia entre puntos de muestreo, pero sin descuidar el aspecto de tener semivariogramas con un número suficiente de pares de datos para cada distancia entre unidades de observación.

Los resultados obtenidos en el laboratorio, así como las observaciones de campo efectuadas, indican que pueden incrementarse substancialmente los rendimientos de las cosechas manteniendo el suelo en un buen estado de productividad, mediante la aplicación inmediata de las siguientes prácticas agrícolas:

Adiciones de materia orgánica.

Con objeto de resolver el problema del bajo nivel de materia orgánica en los suelos analizados, deberá incorporarse ésta mediante el establecimiento de cultivos adecuados destinados a abonos verdes. Para efectuar dicha labor y debido a que en la zona de estudio se dispone únicamente de volúmenes limitados de agua para riego, se recomienda el establecimiento de cultivos resistentes a la sequía tales como sorgos forrajeros, que con 2 ó 3 riegos pueden producir cantidades apreciables de material verde para su incorporación al suelo. Esta planta deberá enterrarse cuando el 10% de las plantas hayan llegado a la floración, pero en este caso como no son leguminosas, deberá aplicarse entre 100 y 150 Kg de sulfato de amonio (20% de nitrógeno), con objeto de que el material

incorporado sea transformado rápidamente en materia orgánica humificada, por los microorganismos presentes en el suelo.

Este tipo de abono verde ayudarán a mantener un buen nivel de fertilidad en los suelos al llevar periódicamente su contenido de materia orgánica, y mejorarán la estructura del suelo, así como la efectividad del agua de riego y favorecerán la acción benéfica de los abonos químicos aplicados a los cultivos.

Nivelación del suelo.

El área de estudio presenta ligeras depresiones, así como ciertas áreas de acumulación debido a su topografía. Con el objeto de obtener una mayor eficiencia en la aplicación del agua de riego, deberán eliminarse esas pequeñas depresiones y de esta manera formarse pendientes uniformes mediante el uso de una máquina "niveladora". Esta labor de nivelación traera además, como consecuencia, la eliminación de los daños ocasionados por las acumulaciones excesivas de agua, que favorecen al proceso de acumulación de sales solubles.

Aplicación de fertilizantes nitrogenados.

Se considera que un nivel medio aceptable de nitrógeno total en los suelos analizados debería ser alrededor de 0.1%. Sin embargo, en este estudio se ha visto que el contenido de este elemento en el suelo superficial tiende a ser pobre, siendo aún menor en el subsuelo.

Como este contenido es de decisiva importancia en el buen desarrollo de las plantas, se recomienda aplicarlo en pequeña cantidad, en forma de abonos químicos en proporciones que complementen en forma adecuada, el nitrógeno asimilable liberado por la descomposición de la materia orgánica del suelo.

Para este propósito se recomienda la aplicación de cualquiera de los abonos químicos nitrogenados siguientes:

Urea con 46% de N
Nitrato de Amonio con 33.5% de N
Sulfato de Amonio con 20.5% de N.

Con el objeto de obtener la mayor eficiencia posible de la aplicación de los abonos químicos nitrogenados en el cultivo, se recomienda aplicar el 50% de la cantidad deseada al momento de la siembra. El 50% restante deberá aplicarse despues de efectuada la labor llamada "Aclareo".

Aplicación de fertilizantes fosfóricos.

Se recomienda la aplicación de abonos químicos que contengan el elemento fósforo en forma asimilable por las plantas, en aquellas zonas con deficiencia principalmente, para la obtención de buenos rendimientos.

7.3 CONSIDERACIONES GENERALES.

Para el manejo del suelo no sólo es importante su estudio como tal, del cual se conozcan sus características físicas y químicas, sino también el tipo de cultivo, rotación de los mismos, fertilizantes y los cuidados incluidos de antemano, el uso del estiércol, residuos de cultivos, plantas verdes etc.

De ninguna manera un mapa de suelo es un reflejo exácto de cómo es o cómo debe ser la agricultura, a partir de un mapa de suelos no puede pedirse que se traduzca inmediatamente en consejos prácticos sobre el uso de la tierra, considerando que se necesitan más estudios (in situ y de laboratorio) que permitan catalogar la potencialidad agrícola del suelo.

Los mapas de suelo son usados principalmente para ayudar e indicar, por una parte, aquellas zonas donde el suelo no presente ningún problema de salinidad, ni en la disponibilidad de los principales nutrimentos, y por otra parte aquellas zonas de baja fertilidad y con problemas de salinidad; asimismo da pauta para un mejor manejo del suelo, al aplicar soluciones apropiadas para un aumento de la productividad.

Por lo arriba expuesto se debe recordar que los resultados obtenidos en el presente trabajo son una mera aproximación a la realidad, ya que el suelo no es una entidad muerta, se encuentra en cambio permanente, así la siguiente etapa es realizar una investigación de campo y laboratorio, hasta entonces, el suelo será sometido a un sistema de producción, programando los cultivos, posible establecimiento de ganado etc, sería favorable entonces realizar una serie de análisis no solo edafológicos, sino también socio-económicos para poder emitir un modelo de agroecosistemas acorde a la región de estudio, que sirviera como estímulo entre los habitantes de la misma.

8. BIBLIOGRAFIA

- 1.- Aguilar R.M. 1987. *Variabilidad espacial y muestreo de algunas propiedades físicas del suelo*. Tesis E.N.A Chapingo México.
- 2.- Alcalde B.S. 1971, *Nutrición vegetal*, Vol. 3, Colegio de Postgraduados Montecillos, México.
- 3.- Biggar J.W. 1983. Apuntes de clase Water Science 103 Resources Land, Air and Water
- 4.- Brady N.C. 1984. *The nature and properties of soil*. 8th edic. Edit. MacMillan Publishing Co. New York U.S.A.
- 5.- Bressler F, Asberg S.D, Russo D and Dagan G.1981. *Spatial variability of crop yield as a stochastic soil process*. Soil Soc. Am. J. 45:600-605.
- 6.- Bressler E.G, Dagan G. and Hanks R.J. 1982. *Statistical analysis of crop yield under controlled line-source irrigation*. Soil Sci. Soc. Am. J. 46:841-847.
- 7.- Burgues T.M. and Webster R. 1980a. *Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties I. The semivariogram and punctual kriging*. Journal of Soil Science. 31:315-331.
- 8.- Burrough P.A. 1983 b. *Problems of super imposed effects in the statistical study of the spatial variation of soil*. Agric. Water. Manage. 6:123-143.
- 9.- Cajuste J. Lenom. 1977. *Química de suelos con un enfoque agrícola*. Colegio de Postgraduados Chapingo, México.
- 10.- Cajuste B. Lenom. 1993. *Variabilidad espacial de suelos*. (Curso-Taller). Centro de Edafología. Colegio de Postgraduados. Chapingo. México.

- 11.- Camargo H.A. 1989. *Estudio variográfico exploratorio de la dinámica de sales en un suelo en proceso de ensalitramiento*. Tesis M.C. Colegio de Postgraduados México.
- 12.- Campbell J.B. 1978. *Spatial variation of sand content and pH within single contiguous delineations of two soil mapping units*. Soil Sci. Soc. Am. J. 42:460-464.
- 13.- Cassel D.K. and Bauer A. 1975. *Spatial variability in soil below depth of tillage: Bulk density and fifteen atmosphere porcentaje*. Soil Sci. Am. Proc. 39:247-250.
- 14.- Cline M.G. 1944. *Principles of soil sampling*. Soil Sci. 58:275-288.
- 15.- Cressie N. and Hawkins D.M. 1980. *Robust estimation of the variogram: I Mathematical. Geology* 12:115-125.
- 16.- Cressie N.A.C. and R. Horton. 1987. *A robust-resistant spatial analysis of soil water infiltration*. Water. Resour. Res. 23(5):911-917.
- 17.- Cristobal A.D. 1993. *Comparación de métodos de interpolación en variables hidricas del suelo*. Tesis M.C. Colegio de Postgraduados, México.
- 18.- De la Loma J.L. 1982. *Experimentación agrícola*. Edit Hispano Americana. México 493 p.
- 19.- Donahue R.L, R. Miller and J.C Shickluna. 1981. *Soils: and introduction to soils and plant growth*. Edit. Prentice Hall, New York U.S.A.
- 20.- Englund E. and Sparks A. 1991. *Geostatistical environmental Assessment Software. User's Guide*.

- 21.- Etchevers B.J.D, W. Espinoza, E. Riquelme. 1971. *Manual de fertilidad y fertilizantes*. 2a. edicion corregida. Universidad de Concepción, Facultad de Agronomía, Chillán, Chile.
- 22.- Flores F. J.L. 1987. *Estudio variográfico exploratorio del encostramiento en suelos desnudos de El Barril, Villa de Ramos, S.L.P.* Tesis M.C. Colegio de Postgraduados. México.
- 23.- Foth D.H. y Millar C.E. 1980. *Fundamentos de la ciencia del suelo*. Edit. CECSA, México.
- 24.- Gajem Y.M, A.W. Warrick and D.E. Myers. 1981. *Spatial structure of physical properties of a typic torrifuvent soil*. Soil Sci. Soc. Am. J. 45:709-715.
- 25.- García E. 1981. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para aduaptarlo las condiciones de la Republica Mexicana)*. 2a Edic. Universidad Nacional Autonoma de México. México.
- 26.- Gómez D.J.D. 1984. *Evaluación de la homogeneidad de algunas propiedades del suelo dentro de 3 sistemas terrestres del área de influencia de Chapingo*. Tesis U.A.Ch. Chapingo, México.
- 27.- Grande L.R. 1985. *Métodos para análisis físicos y químicos en suelos agrícolas*. Depto. de suelos. Instituto de investigaciones de zonas desérticas de la Universidad Autonoma de San Luis Potosi. México.
- 28.- Gurovich L.A y Ramos R. 1985. *Spatial variability of rainfall and yield of maiza in a semiarid region*. Agric. Water. Manage. 10:15-29.
- 29.- Hamlett J.M, R. Horton and N.A.C. Cressie. 1986. *Resistant and exploratory techniques for use in semivariogram analysis*.

Soil. Sci. Soc. Am. J. 50:868-875.

- 30.- Hughes J.O. and D.P. Lettenmaier. 1981. *Data requirements for kriging estimation and Network design*. Water Resour. Res. 17:1641-1650.
- 31.- INEGI. 1986. *Síntesis geográfica, nomenclator y anexo cartográfico del estado de Querétaro*. México.
- 32.- Jackson M.L. 1982. *Análisis químico de suelos*. Ed. Omega. Barcelona, España.
- 33.- Journel A.G. and C.J. Huijbregts. 1978. *Mining geostatistics*. Academic Press. New York 634 p.
- 34.- Kachanosky R.G. Rolston D.E and de Jong E. 1985 *Spatial variability of a cultivated soil as affected by past and present microtopographic*. Soil Sci. Soc. Am. J. 49:1082-1087.
- 35.- Knighton R.E. and D.W. James. 1985. *Soil test phosphorus as a regionalized variable in leveled land*. Soil. Sci. Soc. Am. J. 49:675-679.
- 36.- Márquez S.F. 1977. *Sistemas de producción agrícola (agroecosistemas)*. Apuntes. Universidad Autónoma Chapingo. pp 4-34.
- 37.- Martínez M.M. 1974. *Situación actual de la agricultura de temporal en México*. VII Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Gto. México.
- 38.- Mcbratney A.B. and R. Webster. 1981. *Spatial dependence and classification of the soil along a transect in North east Scotland*. Geoderma 26:63-82.

- 39.- Mcbratney A.B. and R. Webster. 1983. *How many observations are needed for regional estimation of soil properties?* Soil Sci. 135(3):177-183.
- 40.- Mcbratney A.B. and R. Webster. 1986. *Chosing functions for semi-variogram of soil properties and fitting them to sampling estimates.* J. Soil Sci. 37: 617-639.
- 41.- Miyamoto S. and I. Cruz. 1987. *Spatial variability of soil salinity in furrow-irrigated torrifluvents.* Soil. Sci. Soc. Am. J. 51:1019-1025.
- 42.- Moreno D.R. 1970. Instituto de Investigaciones Agrícolas, Depto. de suelos SARH, México.
- 43.- Odeh I.O.A. Mcbratney A.B and Chittleborough D.J. 1990. *Design of optimal sample spacings for mapping soil using Fuzzy-K -means and Regionalized variable theory.* Geoderma 47:93-122.
- 44.- Oliver M. A. and Webster R. 1986a. *Semivariograms for modelling the spatial pattern of land form and soil properties.* Earth Surface Processes and Land Forms 11:491-504.
- 45.- Olsen S.R. 1954. *Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate.* U.S. Dept. Agr. Ciec. 939.
- 46.- Ortega T.E. 1978. *Química de suelos.* Departamento de suelos Chapingo, México.
- 47.- Ortiz V. B. y Ortiz S.C.A. 1984. *Edafología.* 4a edic. Universidad Autonoma Chapingo. México.
- 48.- O'Sullivan M.F, J.W. Dickson and D.J. Campbell. 1987. *Interpretation and presentation of cone resistance data in tillage and traffic studies.* J. Soil Science. 38:137-148.

- 49.- Ovalles F.A. and Collins M.E. 1988. *Evaluation of soil variability in Northwest Florida Using Geostatistics*. Soil Sci. Am. J. 52:1702-1708.
- 50.- Pizarro F. 1978. *Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos*. Edit Agrícola España, S.A. Madrid p 521.
- 51.- Ramírez A. Palacios C.O y Zarate de L. G.P. 1981. *Interpolación espacial de datos de sales en el suelo*. Agrociencia 45:89-103.
- 52.- Rao P.V. Rao P.C.S. Davidson J.M. and Hammond L.C. 1979. *Use of goodness of fit test for characterizing the spatial variability of soil properties*. Soil Sci. Soc. Am. J. 43:274-278.
- 53.- Román C.A. 1980. *Aplicación de la metodología Kriging universal en la elaboración de planos del nivel freático*. Tesis M.C. Colegio de Postgraduados. México.
- 54.- Russell J. y W. Russell. 1968. *Las condiciones del suelo y el crecimiento de las plantas*. 4a edic. Edit. Aguilar Madrid España.
- 55.- Russo D. 1983. *A geostatistical approach to the trickle irrigation design in heterogeneous soil I. Theory*. Water. Resour. Res. 19(3):632-642.
- 56.- Russo D. 1984. *Design of an optimal sampling network for estimating the variogram*. Soil. Sci. Soc. Am. J. 48:708-716.
- 57.- Russo D. and Jury W.A. 1987. *A theoretical study of the estimation of the correlation scale in spatially variable fields. 2. Nonstationary fields*. Water Res. Res. Vol. 23 No. 7 1269-1279.
- 58.- Shainberg I. 1975. *Salinity of soils-effects of salinity on the physics and chemistry of soils*. In A. Poljakoff-Mayber and J.

- Gale (eds.). *Plants in Saline Environments*. Springer-Verlag, Berlin p 36-55.
- 59.- Tabor J.A.A, A.W. Warrick, D.A. Pennington and D.F. Myers. 1984. *Spatial variability of nitrate in irrigated cotton: I. Petioles*. Soil Sci. Soc. Am. J. 48:602-607.
- 60.- Teuscher H. y R. Adler. 1980. *El suelo y su fertilidad*. Edit. CECSA México.
- 61.- Trangmar B.B, R.S. Yost and G. Uehara. 1985. *Application of geostatistics to spatial studies of soil properties*. Advances in Agronomy vol.38
- 62.- Vauclin M, S.R. Vieira, R. Bernard and J.L. Hatfield. 1982. *Spatial variability of surface temperature along two transects of a bare soil*. Water. Res. Res. 18(6):1677-1686.
- 63.- Vauclin M. 1983. *Methodes d' etude de la variabilite spatiale des proprietes d' un sol*. dans: Variabilite spatiale des processus de transfert dans les sols, Avignon 24-25 Juin 1982. Ed.IRINA publ. 1983 (les colloques del INRA No. 15) Tr. por Dr. Palacios Velez O.L. Colegio de Postgraduados. Chapingo. México.
- 64.- Vieira S.R. 1981. *Spatial variability of field measured infiltration rate*. Soil Sci. Soc. Am. J. 45:1040-1048.
- 65.- Vieira S.R, J.L Hatfield, D.R. Nielsen and J.W. Biggar. 1983. *Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties*. Hilgardia 51(3):1-75.
- 66.- Volke H.V. 1979. *El uso del criterio económico de capital limitado para optimizar niveles de insumos en la agricultura de Temporal-Subsistencia*. Agrociencia 36:121-136.

- 67.- Warrick A.W. Myers D.E and Nielsen D.R. 1986. *Geostatistical Methods applied to soil science*. Agronomy Monograph no. 9 Madison. U.S.A.
- 68.- Warrick A. W. and Myers D.E. 1987. *Optimization of sampling locations for variogram calculations*. Water Resour. Res. 23:496-500.
- 69.- Warrick A.W and Nielsen D.R. 1980. *Spatial variability of soil physical properties in the field*. 319-344. In Applications of soil physics By D. Hillel. academic Press, New York.
- 70.- Webster R. and Cuanalo de la C. H. 1975. *Soil transects correlograms of north oxfordshire and their interpretation*. J. Soil Sci. 26(2):176-194.
- 71.- Webster R. 1985. *Quantitative spatial analysis of soil in the field*. Advances in soil science, Vol. 3 B. A Stewart (ed.), Springer-Verlag, New York. pp 1-71.
- 72.- Webster R. and Oliver M.A. 1990. *Statistical methods in soil and land resource survey*, Oxford University Press.
- 73.- Wilding L.P. and Dress L.R. 1983. *Spatial variability and pedology*. In Wilding L.P, Semec N.E. and Hall G.F (Eds). Pedogenesis and soil taxonomy. Concept and interactions 83-116. Developments in soil science. II A. Elsevier. Amsterdam Oxford, N.Y.
- 74.- Wollum A.G. and D.K. Cassel. 1984. *Spatial variability of Rhizobium japonicum in two North Carolina soil*. Soil Sci. Soc. Am. J. 48:1082-1086.
- 75.- Wopereis M.C. Gascuel-Oudoux C. Bourrie G and Soignet G. 1988. *Spatial variability of heavy metals in soil on a one hectare scale*. Soil Sci. 146(2):113-119.

- 76.- Yost R.S. Uehara G. and Fox R.L. 1982a. *Geostatics analysis of soil chemical properties of large land areas. I Semivariograms.* Soil Sci. Soc. Am. J. 46:1028-1032.
- 77.- Yost R.S. Uehara G. and Fox R.L. 1982b. *Geostatics analysis of soil chemical properties of large land areas. II Kriging.* Soil Sci. Soc. Am. J. 46:1033-1037.
- 78.- Zarate de L.G. 1972. *Representación de variables aleatorias asociadas a una localidad geográfica (Aplicación de la metodología en la representación distribucional de las sales en los suelos).* Tesis M.C. Colegio de Postgraduados. México.

Analisis quimicos de las muestras de pozos

MUESTRA	PH	CONDUCT. ELECTRIC. (ds/cm)	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
						Meq/LI	Mg ²⁺ Na ⁺ K ⁺ SOLUBLES		
1-a	6.50	0.25	2.20	0.71	0.10	2.08	0.69	0.18	0.21
1-b	6.60	0.26	2.11	0.43	0.23	1.45	0.67	0.18	0.21
2-a	6.75	0.29	1.66	0.07	0.27	1.64	0.77	0.17	0.21
2-b	6.90	0.30	1.21	n.c.	n.p.	2.83	0.74	0.18	0.21
3-a	6.75	0.26	1.73	n.c.	n.p.	1.51	0.62	0.19	0.21
3-b	6.80	0.24	1.58	n.c.	n.p.	1.54	0.38	0.17	0.21
4-a	7.05	0.24	1.74	n.c.	n.p.	1.44	0.60	0.17	0.21
4-b	7.25	0.22	1.38	0.20	n.p.	1.80	0.28	0.17	0.21
5-a	7.10	0.24	1.70	n.c.	n.p.	1.21	1.34	0.17	0.21
5-b	7.30	0.14	1.27	n.c.	0.10	0.99	0.47	0.16	0.21
6-a	7.10	0.25	1.02	0.14	n.p.	1.54	0.74	0.16	0.21
6-b	7.10	0.19	1.40	0.56	n.p.	1.09	0.69	0.16	0.21
7-a	7.20	0.22	1.02	0.98	n.p.	1.14	1.34	0.17	0.21
7-b	7.20	0.19	1.42	1.07	n.p.	0.67	0.52	0.17	0.21
8-a	7.05	0.24	1.64	0.79	n.p.	1.16	0.33	0.17	0.21
8-b	7.20	0.18	1.44	0.79	n.p.	1.46	0.30	0.17	0.21
9-a	6.90	0.23	1.42	0.20	n.p.	1.44	0.80	0.17	0.21
9-b	6.90	0.28	1.40	0.97	0.10	1.57	0.21	0.18	0.21
10-a	7.20	0.18	1.74	0.30	0.10	1.36	0.40	0.17	0.21
10-b	7.10	0.17	1.30	0.31	0.10	1.10	0.85	0.17	0.21
11-a	7.10	0.19	2.18	0.97	0.23	1.19	0.45	0.18	0.21
11-b	7.10	0.26	1.18	0.29	0.10	1.12	0.40	0.16	0.21
12-a	7.20	0.20	1.28	0.96	0.10	1.06	0.47	0.16	0.21
12-b	7.15	0.18	1.40	0.71	0.16	1.06	0.15	0.16	0.21
13-a	7.40	0.18	1.23	2.71	0.28	0.77	0.67	0.17	0.21
13-b	7.55	0.18	1.18	2.30	0.10	0.72	0.60	1.80	0.18
14-a	7.20	0.58	1.04	2.08	0.71	2.12	1.35	2.47	0.20
14-b	7.35	0.48	1.18	1.46	0.97	2.05	1.71	1.40	0.20
15-a	7.35	0.28	1.18	1.29	0.10	1.12	0.32	0.75	0.21
15-b	7.40	0.27	1.04	2.00	0.10	1.11	0.92	4.88	0.20
16-a	7.55	0.25	0.94	1.87	0.16	1.06	1.01	1.60	0.20
16-b	7.50	0.27	1.18	2.08	0.97	1.21	0.87	1.80	0.20
17-a	7.00	0.18	1.42	2.20	0.71	0.82	1.00	1.10	0.20
17-b	7.60	0.16	1.32	2.08	0.28	1.06	0.93	0.77	0.20
18-a	7.55	0.21	1.18	1.46	0.94	1.57	0.84	1.10	0.20
18-b	7.35	0.21	1.42	1.47	0.47	0.91	0.82	1.78	0.20
19-a	7.65	0.28	1.32	1.20	0.94	1.42	1.11	0.88	0.21
19-b	7.55	0.24	1.28	2.08	0.84	1.46	1.11	1.95	0.20
20-a	7.65	0.22	1.32	1.27	0.60	1.28	1.04	0.78	0.20
20-b	7.80	0.21	1.38	1.47	0.40	1.14	0.98	0.87	0.20
21-a	7.70	0.16	1.32	1.47	0.47	0.80	1.04	0.72	0.20
22-a	7.70	0.21	1.28	1.70	0.47	1.28	0.82	0.88	0.20
22-b	7.50	0.21	1.18	1.25	0.57	1.28	0.58	0.90	0.20
23-a	7.80	0.17	1.42	1.47	0.28	1.38	0.77	0.66	0.20
23-b	7.70	0.19	1.32	1.87	0.97	1.28	0.60	0.77	0.20
24-a	7.90	0.21	1.31	1.96	0.80	1.02	0.98	0.88	0.20
24-b	7.60	0.23	1.55	1.46	0.80	0.88	0.90	0.88	0.20
25-a	7.40	0.22	1.37	1.98	0.80	1.62	0.62	0.68	0.20
25-b	7.30	0.18	0.94	1.77	0.80	0.97	0.40	0.48	0.22
26-a	7.60	0.17	1.34	1.56	0.81	1.03	0.50	0.43	0.22
26-b	7.80	0.18	0.89	1.47	1.20	0.57	1.13	0.88	0.22
27-a	7.70	0.24	1.86	1.77	0.97	1.18	0.88	0.80	0.20
27-b	7.65	0.22	1.42	1.28	0.88	0.88	0.88	0.88	0.22
28-a	7.65	0.20	1.00	1.77	0.81	1.22	0.62	0.68	0.22
28-b	7.05	0.18	1.28	1.47	1.02	1.42	0.60	0.95	0.22
29-a	7.55	0.20	1.70	1.87	1.18	1.70	0.65	0.48	0.20
29-b	7.30	0.11	1.04	1.77	1.19	0.42	0.97	0.87	0.20
30-a	7.90	0.28	1.29	1.47	1.18	1.85	0.70	0.90	0.20
30-b	7.30	0.21	1.18	1.94	1.18	1.33	0.65	0.65	0.20
31-a	7.50	0.20	1.28	1.46	0.97	1.18	0.82	0.41	0.20
31-b	7.65	0.15	0.99	1.98	1.02	0.67	0.17	0.64	0.21
32-a	7.90	0.21	1.34	1.77	1.86	1.72	0.67	0.46	0.21
32-b	7.65	0.18	1.30	1.86	1.19	0.77	0.72	0.48	0.21
33-a	7.60	0.20	1.47	1.47	1.18	1.35	0.81	0.48	0.21
33-b	7.45	0.18	1.28	1.77	1.29	1.12	0.40	0.81	0.21
34-a	7.60	0.18	1.06	1.15	1.25	1.33	0.33	0.33	0.21
34-b	7.7	0.17	1.28	1.87	1.25	1.13	0.80	0.45	0.21
35-a	7.68	0.19	1.06	0.41	0.30	0.60	0.74	0.23	0.21
35-b	7.45	0.17	1.32	0.38	1.38	0.71	0.95	0.25	0.21
36-a	7.95	0.21	1.32	0.88	0.20	1.01	0.60	0.24	0.21
36-b	7.80	0.19	1.37	0.72	0.40	1.01	0.95	0.27	0.21
37-a	7.90	0.17	1.37	0.88	0.24	0.74	0.97	0.70	0.21
37-b	7.70	0.15	1.32	0.67	0.20	0.85	0.47	0.47	0.21
38-a	8.00	0.17	1.32	0.81	0.20	0.45	0.84	0.21	0.21
38-b	8.00	0.15	1.30	0.67	0.44	0.50	0.90	0.23	0.21
39-a	8.20	0.19	1.42	1.11	0.20	0.74	0.95	0.27	0.21
39-b	8.05	0.17	1.23	1.10	0.40	0.71	0.90	0.24	0.21
40-a	8.00	0.18	1.38	0.94	0.20	0.86	0.95	0.21	0.21
40-b	7.90	0.16	1.31	0.80	0.24	0.71	0.91	0.20	0.21
41-a	7.80	0.18	1.28	0.81	0.24	0.83	0.95	0.20	0.21
41-b	7.85	0.12	1.28	0.56	0.20	0.80	0.80	0.20	0.21
42-a	7.81	0.18	1.20	0.47	0.20	0.81	0.60	0.20	0.21
42-b	7.75	0.19	0.99	0.72	0.24	0.71	0.60	0.23	0.21
43-a	7.80	0.16	1.46	1.00	0.24	0.60	0.50	0.20	0.21
43-b	7.80	0.14	1.80	0.78	0.40	0.45	0.43	0.22	0.21

MATERIA ORGANICA (%)	C. I. C.	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	POSFORO ASIMIL. ppm	NITRO-GENO Kg/ha
		INTERCAMBIABLES Meq/100 gr					
2.00	17.24	12.77	4.91	0.89	2.14	31.44	81.07
1.83	17.02	11.11	7.03	0.31	2.14	27.08	80.64
2.10	10.48	18.14	5.57	0.20	1.00	24.01	62.48
1.87	19.20	18.82	5.07	0.24	0.80	20.18	78.46
1.87	13.56	11.66	5.18	0.20	1.20	17.83	60.89
1.44	16.40	18.51	5.18	0.28	2.01	44.00	109.7
1.40	14.78	16.85	5.55	0.34	1.00	18.79	49.04
1.28	15.79	12.22	5.92	0.31	0.94	34.04	80.16
1.66	16.66	10.18	5.18	0.20	1.06	19.04	130.24
0.88	14.89	10.92	4.11	0.28	2.01	10.27	20.04
1.40	14.39	10.55	5.74	0.28	1.11	36.17	64.04
0.88	15.00	11.80	5.37	0.20	1.07	14.23	87.23
0.88	18.44	10.58	5.92	0.20	1.07	18.44	84.04
0.36	10.39	7.06	6.39	0.50	1.01	14.08	101.86
1.14	15.92	9.07	6.26	0.39	0.94	40.08	104.1
0.68	10.97	9.72	4.46	0.25	0.83	19.17	102.8
1.04	12.09	10.00	4.84	0.21	0.75	14.23	87.28
0.60	10.58	7.77	5.00	0.27	0.68	5.33	13.88
0.90	7.61	7.96	4.98	0.20	0.70	44.10	114.6
0.52	10.30	6.85	4.35	0.27	0.60	10.80	28.07
0.66	9.20	7.87	4.07	0.27	0.93	64.00	109.7
0.48	9.18	6.85	7.46	0.25	0.68	47.27	80.16
1.36	11.42	6.68	4.66	0.20	0.91	10.27	20.04
0.51	10.80	5.92	5.92	0.26	0.71	16.06	44.10
1.61	17.02	18.27	5.58	0.25	1.78	16.06	44.10
1.20	17.02	15.08	4.78	0.20	1.51	22.29	57.85
1.29	17.13	17.11	14.01	0.27	0.98	9.33	19.80
1.10	18.14	10.85	10.90	0.90	0.75	8.51	22.11
1.47	15.00	13.70	7.23	0.25	2.25	24.23	32.35
1.00	15.00	10.91	0.10	0.28	0.84	14.32	37.38
1.12	15.90	18.81	6.00	0.20	1.19	20.14	32.35
1.12	10.57	14.21	6.00	0.28	0.82	11.68	80.86
1.34	14.56	12.18	4.47	0.25	2.20	32.38	130.1
1.05	15.90	18.87	6.28	0.28	0.81	20.14	32.35
1.82	14.16	11.16	7.36	0.20	1.00	18.79	49.04
1.00	15.68	10.80	5.90	0.30	0.94	10.27	20.04
1.34	14.44	10.28	3.42	0.26	1.38	10.80	28.07
1.10	15.00	18.88	5.18	0.26	1.14	17.83	40.89
0.90	18.39	12.27	4.32	0.26	0.98	9.33	19.80
1.34	14.11	12.07	5.28	0.26	1.04	6.19	16.06
0.91	18.39	12.07	4.41	0.24	0.90	18.79	49.04
1.10	11.09	11.77	2.51	0.24	1.04	10.80	24.07
0.78	10.78	14.08	0.00	0.20	0.62	11.68	80.86
0.99	10.41	11.05	5.98	0.29	1.30	24.39	64.72
0.92	11.57	11.47	5.28	0.24	1.11	20.14	32.35
1.06	14.78	9.74	7.11	0.21	1.00	14.08	101.86
1.06	15.41	9.75	7.11	0.21	1.25	6.72	10.82
0.22	12.21	8.28	5.08	0.10	1.02	6.74	17.38
0.22	7.39	5.38	2.85	0.19	0.71	15.20	39.52
0.26							

Apendice B.

Analisis preliminar de las propiedades físicas y químicas de las muestras de suelo.

Muestra No.	Arena	Limo %	Arcilla	Clase textural	pH	Conductividad Electrica (dS/m)	Materia Orgánica (%)
I	72.28	15.0	12.72	Mig - arenoso	7.02	0.960	2.47
2	74.56	14.0	11.44	Mig - arenoso	7.35	1.493	1.54
3	69.28	18.0	12.72	Mig - arenoso	7.10	0.845	1.34
4	74.56	14.0	11.44	Mig - arenoso	7.60	0.972	1.17
5	73.56	15.7	10.72	Mig - arenoso	7.00	1.063	1.07
6	72.84	13.7	13.44	Mig - arenoso	7.05	1.342	1.17
7	72.56	14.3	13.14	Mig - arenoso	7.50	1.394	1.07
8	77.84	14.7	7.44	Mig - arenoso	7.60	0.786	0.97
9	76.00	13.2	10.72	Mig - arenoso	7.27	0.416	0.73
IO	77.28	14.0	8.72	Mig - arenoso	7.50	0.548	0.30
II	67.28	16.7	16.00	Mig - arenoso	7.20	1.294	0.95
I2	70.56	16.0	13.44	Mig - arenoso	7.20	0.592	0.87
I3	59.28	24.0	16.72	Mig - arenoso	7.35	0.715	1.13
I4	67.28	23.0	14.72	Mig - arenoso	7.40	1.067	0.75
I5	74.56	14.0	11.44	Mig - arenoso	7.25	0.935	0.84

Apendice C.

Método de interpolación Kriging

El Kriging es un método de interpolación para procesos aleatorios espaciales, desarrollado por D.G. Krige en los 50's y 60's. Subsecuentemente Matheron y sus colaboradores desarrollaron la teoría de las variables regionalizadas que dio el esquema formal de inferencia.

Este método consiste básicamente en efectuar interpolaciones ó extrapolaciones por medio de un estimador insesgado y con mínima varianza, partiendo de la información obtenida de los puntos-datos.

Hanley (1981) citado por Trangmar *et al* (1985), define al kriging como una técnica para hacer óptimos los estimadores insesgados de variables regionalizadas en localizaciones no muestreadas, usando las propiedades estructurales del semivariograma y el conjunto inicial de valores de datos.

Frecuentemente las estimaciones se hacen para la formación de una malla "fina", a partir de la cual se pueda dibujar isolíneas "suavizadas".

La forma más simple de "kriging" estima valores puntuales y es denominada "Kriging puntual", o áreas, en cuyo caso es denominado kriging de bloques, para los dos casos se asume que los datos se distribuyen normalmente. De acuerdo con Yost *et al*, (1982); Hajrasulina *et al* (1980); Webster y Burgues (1980); citado por Trangmar *et al*, (1985) en el caso de que no se cumpla la normalidad de los datos se debe de usar el Kriging disyuntivo, y si los datos no muestran estacionaridad, solo pueden ser interpolados usando el kriging universal.

De acuerdo con Flores (1982); Webster y Burgues (1980); Hughes y Lettenmaier (1991) y Cristobal (1993), la técnica del kriging universal se basa en realizar estimaciones en la dicotomía:

$$Z(x) = Y(x) + m(x) \quad (1)$$

Donde:

$z(x)$ = variable estudiada

$m(x)$ = tendencia o deriva (*drift* en inglés)

$Y(x)$ = residual o fluctuación alrededor de la media

Hughes y Lettenmaier (1981), afirman que el kriging simple, la tendencia es asumida constante, y en el kriging universal no se suma una tendencia constante, pero se asume que la tendencia es conocida. En muchos casos los métodos tienen deficiencias; en el primer caso el supuesto de una tendencia constante es insostenible para muchos procesos, en el segundo caso, el supuesto de una tendencia conocida es simplemente no razonable, pues los parámetros estadísticos son raramente conocidos *a priori* para sistemas naturales.

Cuando existen casos de fácil identificación de la deriva el "kriging universal" es un buen estimador, pero en otros casos de estimación es difícil identificar la deriva, y aun más, no se sabe definirla, y por tanto se desconoce lo que está haciendo al realizar la dicotomía residuo-deriva; además si el fenómeno es altamente complejo no seremos capaces de definir esta deriva con una expresión analítica simple de la forma:

$$m(x) = \sum a_i(x) f_i(x) \quad (2)$$

Donde:

a_i = coeficiente

f_i = monomios

Por otra parte, cuando se utiliza el modelo de kriging universal se está obligando a trabajar con residuales:

$$Y(x) = Z(x) - m(x) \quad (3)$$

pero debido al conocimiento inexacto de la deriva se incurre en graves

sesgos en los cálculos.

En un trabajo realizado por Ovalles y Collins (1988), sobre evaluación de la variabilidad los semivariogramas obtenidos indicaron tendencia en los datos; por tanto se usaron residuales para calcular los nuevos semivariogramas, y el resultado fue que la tendencia disminuyó ligeramente pero no desapareció.

Knudsen y Kim (1977) citado por Cristobal (1993), afirman que en los casos donde la variable muestra un incremento sistemático, o un decrecimiento en cierta dirección, se dice que existe una tendencia, entonces el supuesto de que $E[Z(x)]$ es constante es obviamente violada, por tanto debe usarse un modelo que tiene en cuenta este hecho. La forma más sencilla es considerar que la tendencia $(m(x)) = E[Z(x)]$, puede ser aproximada a un polinomio de la forma dada en (2).

Por ejemplo en dos dimensiones una expresión explícita de una tendencia lineal sería:

$$m(x,y) = a_0 + a_1x + a_2y \quad (4)$$

y una tendencia cuadrática sería:

$$m(x,y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2 \quad (5)$$

Russo y Jury (1987), afirman que la presencia de tipos específicos de tendencia (drifts) pueden ser inferidos de la forma del variograma, por ejemplo el caso particular de una tendencia lineal, el semivariograma se incrementa linealmente sin límite.

El objetivo del kriging es encontrar el mejor estimador lineal insesgado de una función lineal en el campo aleatorio $Z(n)$. El estimador P^* es lineal por que está formado por una combinación lineal de las variables aleatorias $Z(u_i)$:

$$P^* = \int g Z(u) \quad (6)$$

Es insesgado, porque el valor esperado del estimador, es igual al valor esperado de la variable bajo consideración:

$$E[P^*] = E[P] \quad (7)$$

Tiene varianza mínima porque la varianza de la estimación o el error cuadrado medio sera el mínimo. Esto es, no existe otro estimador insesgado que tenga varianza más pequeña:

Davis (1973) citado por Cristobal (1993), afirma que el kriging intenta no solo estimar el valor de una variable

$$\text{Var} [P^* - P] = \text{mínima}$$

distribuida espacialmente, sino también señalar el error probable asociado con la estimación.

Criticas al método de kriging

La mayoría de los artículos escritos sobre el método de kriging, hacen referencia a él señalando supuestas ventajas en comparación con otros métodos de interpolación; un artículo que se sale de esta tendencia fué escrito por Philip y Watson (1986), y sus señalamientos son los siguientes:

Las limitaciones del método de "Kriging" como método de interpolación son:

- 1.- Los parámetros usados so estimados globalmente. Por tanto se podría esperar una fidelidad local mayor en una superficie interpolada con el método de distancias inversas.
- 2.- El "Kriging" es restringido por el rango de los datos, de la misma forma que el método de distacias inversas, de tal forma que si los "picos"

o las "depresiones" no han sido muestreados específicamente, ellos no pueden ser inferidos. La tendencia local dentro de los datos es ignorada.

3.- Debido a que el "kriging" es un método lineal, producira sesgos locales de manera inevitable, dichos sesgos pueden ser inaceptablemente grandes, existen métodos mas simples que pueden ser mejores.

Las conclusiones del artículo de Philip y Watson apuntan que el Kriging es un método incomodo de interpolación, que utiliza parámetros globales para realizar interpolaciones locales. Toma una combinación lineal de valores dato, que pueden ser restringidos por un rango, así mismo utiliza subconjuntos de datos en una superficie de interpolación que contendrá discontinuidades, debido a que es un método lineal tendra sesgos, debido a que ignora la tendencia local no puede esperarse fidelidad en la interpolación local. La varianza de estimación es un término sin significado de variación local dentro de un conjunto de datos especiales y las "bondades" asignadas a ella han inhibido la búsqueda de medias útiles de variación local.

Gambulati *et al* (1979), al analizar el método de Kriging llega a las siguientes conclusiones:

1.- La tecnica del "Kriging" puede ser desarrollada en un contexto determinístico. Una similaridad básica resulta entre éste y otras técnicas de interpolación comunmente usadas.

2.- En principio la técnica del "Kriging" debería de dar estimaciones más exactas, debido a que el variograma teórico incorpora una gran cantidad de información que relaciona a los datos disponibles. Pero en la práctica esto no ocurre.

3.- La ventaja primaria del "Kriging" sobre los otros métodos es su habilidad para dar el error de interpolación, que es una medida de la exactitud de la interpolación.

4.- El variograma final resultante del modelo de validación, puede ser

sustancialmente diferente del semivariograma experimental basado en datos observados, por lo que la elección del semivarianza es una operación arbitraria.

5.- El concepto de "tendencia" implica un componente adicional de arbitrariedad.