

VARIABILIDAD ESPECIAL DE VARIABLES
AGRONOMICAS EN UN PREDIO CULTIVADO
CON ALFALFA (Medicago activa)

Universidad Autónoma Agraria
"ANTONIO NARRO"



BIBLIOTECA

RAFAEL CASTRO FRANCO

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
EN SUELOS



**Universidad Autónoma Agraria
Antonio Narro**

PROGRAMA DE GRADUADOS

Buenavista, Saltillo, Coah.

DICIEMBRE DE 1989

Tesis elaborada bajo la supervisión del comité particular de asesoría y aprobada como requisito parcial, para optar al grado de

MAESTRO EN CIENCIAS EN SUELOS



COMITE PARTICULAR BIBLIOTECA
EGIDIO G. REBONATO
BANCO DE TESIS
U.A.A.N.

Asesor principal: _____

Arturo Gallegos del Tejo
Dr. Arturo Gallegos del Tejo

Asesor: _____

Javier de J. Cortéz Bracho
M.C. Javier de J. Cortéz Bracho

Asesor: _____

Edmundo Peña Cervantes
Dr. Edmundo Peña Cervantes

Eleuterio López Pérez
Dr. Eleuterio López Pérez
Subdirector de Asuntos de Postgrado

Buenavista, Saltillo, Coahuila. Diciembre de 1989

DEDICATORIA

A la memoria de mi querido PADRE DON JESUS CASTRO CONTRERAS (q.e.p.d.) hombre infatigable, luchador de las causas del campesino Lagunero, honesto y comprometido con su familia.

A mi MADRE CONCEPCION FRANCO VDA. DE CASTRO. Madre, amiga y consejera, ejemplo de la familia Castro-Franco.

A mi HIJA. OZUKY, con todo mi amor, compañera de los momentos mas emotivos de mi vida, razón de mi existir.

A mis HERMANOS. HERLINDO, JESUS, FERNANDO, ESTHER, OFELIA Y JAIME: personas que han vivido para servir a su Patria y principalmente al sufrido campesino Mexicano.

A MIS DEMAS FAMILIARES.

AL PUEBLO DE MEXICO.

AGRADECIMIENTOS

A Instituciones:

A la Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro", por brindarme la oportunidad de superarme académicamente.

A la Universidad Autónoma Chapingo por el apoyo para la elaboración de la tesis.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por otorgarme la beca crédito para la realización de mis estudios de Postgrado.

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, (antes INIA.) Por el apoyo para la realización de mis estudios de Postgrado.

A Personas:

Al Doctor Arturo Gallegos del Tejo, por su atinada asesoría para la realización del presente trabajo.

A los demás miembros del Jurado Examinador, M.C. Javier de J. Cortéz Bracho por la motivación que despertó en mí para la realización del presente trabajo y al Dr. Edmundo Peña C. por la revisión y sugerencias hechas al escrito original.

A los M.C., José R. Romo y Ricardo D. Valdez Cepeda por sus valiosas aportaciones y sugerencias.

A la Srta. Norma Alicia García Rivera por su desinteresada y esmerada labor en la captura y procesamiento de datos computacionales. Amiga de siempre.

INDICE DE CONTENIDO

INDICE DE CONCEPTOS	1
INDICE DE FIGURAS	14
	Página.
I. INTRODUCCION	1
1.1. Objetivo General	1
1.2. Objetivos Especificos	1
1.3. Hipotesis	3
1.4. Supuestos	4
II. REVISION DE LITERATURA	5
2.1. Metodos para diagnosticar deficiencias nutrimentales	5
2.1.1. Sintomatología visual	5
2.1.2. Analisis de suelo	6
2.1.3. Analisis de la planta	7
2.2. Factores de variabilidad nutricional inherentes a la planta	8
2.2.1. Especie	8
2.2.2. Variedad	8
2.2.3. Etapas fenologica	8
2.2.4. Organó a muestrear	9
2.2.5. Posición del organó a muestrear	9
2.3. Sistemas de interpretación de analisis foliar	10
2.3.1. Metodos de niveles criticos	10
2.3.2. Metodo de valores estandar	11
2.3.3. Sistema DRIS	13
2.3.3.1. Determinación de las normas DRIS	16
2.3.3.2. Factores que afectan las normas DRIS	21
2.3.4. Diagnostico del estado nutricional	23
2.3.5. Suposiciones sobre los datos	25
2.4. Geoestadística	26
2.4.1. Fundamentos del metodo de Kriging	27

2.1.1. Introducción al uso de las redes neuronales	17
2.1.2. Funciones de activación	18
2.1.3. Funciones de activación derivadas	21
3.1. ANÁLISIS DE DATOS	32
3.1.1. Descripción del área de estudio	42
3.2. Muestreo	43
3.3. Análisis de series	47
3.4. Análisis de regresión	51
4. RESULTADOS	51
5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	51
VI. CONCLUSIONES	62
VII. RESUMEN	64
LITERATURA CITADA	65
ANEXOS	72

INDICE DE CUADROS

		Página
1	Mapa de localización del estudio.	10
2	Propiedades físicas del suelo del estudio La Galleguita, Gómez Palacios, Sgo.	20
3	Propiedades químicas de los planes del estudio La Galleguita, Gómez Palacios, Sgo.	20
4	Relaciones de las relaciones entre variables.	24
5	Funciones para cada relación de los elementos analizados en el cultivo de alfalfa.	31
6	Índices EARO para los elementos N, P, K, Ca, Mg, Cu, Zn.	35
7	Valores de coeficientes de correlación (r) y coeficientes de determinación (R^2), de las variables agronómicas.	35
A1	Estadística general para puntos cercanos de vecindad de Kriging Puntual de conductividades eléctrica del suelo.	73
A2	Estadística general para puntos cercanos de vecindad de Kriging Puntual de pH del suelo.	73

A1	Estadística general para puntos cercanos de vecindad de Kriging Puntual de Calcio en el suelo.	74
A6	Estadística general para puntos cercanos de vecindad de Kriging Puntual de Fósforo en el suelo.	75
A8	Estadística general para puntos cercanos de vecindad de Kriging Puntual de Magnesio en el suelo.	76
A9	Estadística general para puntos cercanos de vecindad de Kriging Puntual de Sodio en el suelo.	76
A7	Estadística general para puntos cercanos de vecindad de Kriging Puntual de Sodio en plantas.	76
A8	Estadística general para puntos cercanos de vecindad de Kriging Puntual de Magnesio de plantas.	76
A9	Estadística general para puntos cercanos de vecindad de Kriging Puntual de Manganeso en plantas.	77
A10	Estadística general para puntos cercanos de vecindad de Kriging Puntual de Calcio en plantas.	77
A11	Estadística general para puntos cercanos de vecindad de Kriging Puntual de Zinc de plantas.	78

A12	Estadística general para puntos cercanos de vecindad de Kriging Funcional de Hierro en plantas.	75
A13	Interpolación de Kriging de Conductividad eléctrica del suelo.	80
A14	Interpolación de Kriging de Calcio del suelo.	80
A15	Interpolación de Kriging para Potasio del suelo.	81
A16	Interpolación de Kriging de Fosforo en el suelo.	82
A17	Interpolación de Kriging de Magnesio del suelo.	83
A18	Interpolación de Kriging de Sodio del suelo.	84
A19	Interpolación de Kriging de Sodio en plantas.	85
A20	Interpolación de Kriging de Magnesio en plantas.	85
A21	Interpolación de Kriging de Manganeso en plantas.	87
A22	Interpolación de Kriging de Calcio en plantas.	88
A23	Interpolación de Kriging de Zinc en plantas.	89
A24	Interpolación de Kriging de Hierro en plantas.	90

INDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Representación de la respuesta del cultivo a diversas cantidades de nitrógeno suministradas (Sumner y Ferrera, 1986).	15
2	Relación entre las concentraciones en el tejido vegetal y el rendimiento del cultivo en identificación de diferentes rangos (Low y Roberts, 1982).	17
3	Ilustración esquemática de las observaciones usadas para generar las normas DRIS. Las áreas sombreadas representan poblaciones afectadas debido a insuficiencias, excesos o desbalances del nutriente o nutrientes en cuestión (Walworth y Sumner, 1987).	19
4	Efecto de la edad de la hoja sobre diferentes formas de expresión de la composición nutricional en hojas de duraznero (<i>Prunus persica</i>) (Sumner, 1988).	22
1A	Variación espacial en tres y dos planos de Calcio en el suelo.	91
2A	Variación espacial en tres y dos planos de Calcio en la planta.	92
3A	Variación espacial en tres y dos planos de Magnesio en planta.	93
4A	Variación espacial en tres y dos planos de Sodio en el suelo.	94

5A	Variación espacial en tres y dos planos de Sodio en el suelo.	86
6A	Variación espacial en tres y dos planos de Sodio en planta.	93
7A	Variación espacial en tres y dos planos de Potasio en el suelo.	9
8A	Variación espacial en tres y dos planos de Conductividad Eléctrica del suelo	98
9A	Variación espacial en tres y dos planos de Hierro en planta	97
10A	Variación espacial en tres y dos planos de Manganeso en planta.	100
11A	Variación espacial en tres y dos planos de Zinc en planta.	101

COMPENDIO

VARIABILIDAD ESPACIAL DE VARIABLES AGRONOMICAS EN UN
PREDIO CULTIVADO CON ALFALFA (*Medicago sativa*).

POR

RAFAEL CASTRO FRANCO

MAESTRIA
SUELOS

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
BUENAVISTA SALTILLO, COAHUILA. DICIEMBRE DE 1989

DR. Arturo Gallegos del Tejo. asesor

Palabras claves:Kriging,DRIS,isotropía,semivarianza.

En este trabajo se pretende demostrar que con la utilización de las metodologías Kriging, que nos permita conocer la distribución espacial de los factores de sitio y el DRIS que nos muestre el estado nutrimental de un cultivo, es posible diagnosticar con mayor precisión el estado fisiológico del cultivo de alfalfa.

Los índices DRIS obtenidos, dieron un orden de requerimientos como sigue:

Ca	>	Cu	>	P	>	Zn	>	N	>	Mg	>	K
-47		-39		-36		-35		-13		+62		+107

Los resultados del método de Kriging muestran que el elemento Ca, es de mayor participación en la estructura espacial. Todas las variables mostraron isotropía, y con un efecto nugget cercano a cero, lo que indica que el muestreo fué apropiado. En general la semivarianza tuvo un comportamiento similar. De esta manera se concluye que la relación entre el método de kriging y el DRIS es altamente promisorio para la diagnosis nutrimental de los cultivos.

ABSTRACT

SPATIAL VARIABILITY OF AGRONOMIC VARIABLES IN ALFALFA
CROP (*Medicago sativa*).

BY

RAFAEL CASTRO FRANCO

MASTER OF SCIENCE
IN SOILS

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MEXICO.
DECEMBER 1989

Dr Arturo Gallegos del Tejo. Adviser

Key Words: Kriging, DRIS, isotropy, semivariance.

This study was designed to demonstrate that the use of kriging methodology let us know the spatial distribution of site factors and that the DRIS methodology show us the nutrimental state of alfalfa crop.

The DRIS index obtained showed the following requeriment order:

Ca	>	Cu	>	P	>	Zn	>	N	>	Mg	>	K
-47		-39		-36		-35		-13		+62		+107

The kriging methodology resultates show that the Ca element has the main participation in the spatial structure. All the variables showed isotropy with a nugget effect near to zero. In general the semivariance had similar behavior. This way, we conclude that the relations between both methodologies is highly promissory for nutrimental diagnosis of crops.

I. INTRODUCCION

El cultivo de mayor importancia forrajera en la región Lagunera, es la alfalfa; cubre la mayor parte de la demanda que en forrajes se tiene a través del año, ya sea en verde o henificado. A pesar de que la alfalfa es de los cultivos más ineficientes en la transformación de agua a materia seca y de que tiene una relación directa con el abatimiento que en el manto freático se presenta anualmente, la superficie de este forraje se incrementó de 7,500 has, en 1965 a 24,436 has en 1983, lo que representa un aumento de más del 300 por ciento y su rendimiento anual promedio es de 75 toneladas de forraje verde por hectárea.

A pesar de que hace más de 25 años se realizan en la comarca experimentos de campo, con el fin de incrementar la producción de éste forraje, aún persisten los métodos de extrapolación de resultados de sitios escogidos más por el sentido común, que por la representatividad del mismo, ya que es de sobra conocido, las variaciones ecológicas que hacen que este tipo de extrapolaciones pierdan validez, tanto en el tiempo como en el espacio.

Debido a que la planta es el integrador de todos los factores, el efecto total se refleja en su composición química y se expresa en el rendimiento comercial de la

alfalfa (materia seca). La composición foliar es más sensible a los cambios del ambiente que el rendimiento; pero a la vez, es mucho más difícil de interpretar con fines de diagnóstico y recomendación. Al respecto, las técnicas de mayor uso se fundamentan en valores críticos y rangos de suficiencia. Estas técnicas relacionan directamente la concentración de un elemento mineral con el rendimiento, y no se fundamentan en el principio de que los altos rendimientos se obtienen cuando los nutrimentos, y otros factores del crecimiento, están en niveles favorables balanceados. Con la finalidad de eliminar las limitantes señaladas, se ha desarrollado, el método denominado primeramente Diagnóstico Fisiológico, ahora conocido como Sistema Integrado de Diagnóstico y Recomendación, DRIS.

Por otra parte, múltiples evidencias muestran que las variables de sitio, tienen relación con el estado nutrimental, por ser estas el soporte de la planta, y que estas variables pueden tener una variación en el espacio. Para representar la variación, un método convencional es el mapeo. sin embargo, la construcción de los mapas se basa en muestreos no representativos de las tierras involucradas, pues es común que se incluyan series contrastantes de suelos en los que se encuentran los cultivos.

Así pues, el desconocimiento de la magnitud de la variación espacial o de distancia implica un error en la determinación del tamaño de muestras, aún cuando se utilicen para ello las estadísticas clásicas. Tal desventaja es superada al usar el método de diferencias balanceadas para obtener mejores valores del estimador varianza al hacer un muestreo sistemático; o bien, la técnica de variables regionalizadas.

De esta manera, con la utilización de una metodología que nos permita conocer la variación de los factores de sitio y otra, que nos muestre el estado nutrimental; es posible diagnosticar con mayor precisión a nivel de predio el estado fisiológico de la alfalfa y poder generar recomendaciones específicas. Para el logro de esta proposición se plantearon los siguientes objetivos, hipótesis y supuestos.

1.1. Objetivo general

Determinar la composición nutrimental de la planta de alfalfa (Medicago sativa) y la relación que existe con el suelo como variable regionalizada, a través del uso de la metodología DRIS.

1.2. Objetivos específicos

1. Evaluar el estado nutricional del cultivo de alfalfa (Medicago sativa) mediante la metodología DRIS bajo diferentes condiciones físicas y químicas del suelo.
2. Generar la información sobre los factores de sitio que tienen influencia en el desarrollo y rendimiento del cultivo de alfalfa en el área de estudio.
3. Estudiar la variabilidad espacial de los 4 componentes de suelo y planta.
4. Determinar la relación de variables de sitio que influyen en la distribución espacial.

1.3. Hipótesis

1. El uso del DRIS permite determinar con precisión el grado de abastecimiento nutrimental del cultivo de alfalfa.

2. La capacidad predictiva del método DRIS permite diagnosticar el estado nutrimental de la planta.

3. Las características de sitio suelo-planta, se distribuyen espacialmente.

1.4. Supuestos

1. La metodología para determinar los componentes de sitio y la distribución espacial son las apropiadas para lograr el objetivo deseado.

2. La época de muestreo no influye en la precisión y el esfuerzo de muestreo.

3. Las prácticas de manejo no influyen en el estado nutrimental de la alfalfa.

II. REVISION DE LITERATURA

2.1 Métodos para diagnosticar deficiencias nutrimentales

Existen tres métodos para evaluar y diagnosticar la condición nutrimental de una planta: a) el análisis del suelo, b) el análisis de la planta y c) síntomas visuales. También se hace mención que estos métodos presentan ciertas ventajas y desventajas, pero cuando se integran constituyen una herramienta valiosa para el diagnóstico del estado nutrimental y la definición de las prácticas de fertilización de cualquier cultivo, (Valdez , 1989).

2.1.1. Sintomatología visual

La deficiencia de un elemento no produce síntomas directamente. Es más bien el desequilibrio causado en los procesos normales lo que conduce a una acumulación de ciertos compuestos orgánicos y una deficiencia de otros, lo cual se traduce en condiciones anormales consideradas como síntomas (Tisdale y Nelson, 1982).

En general, se considera como síntoma a una señal de aviso o a un signo de enfermedad. En el caso de las plantas superiores, se define como síntoma por anomalía nutrimental a toda desviación de las plantas normales, seleccionándose para ello como comparación a una planta que se acerque lo máximo al ideal, bajo las condiciones

específicas del sitio. Dado que el desarrollo de las plantas puede ser restringido por numerosas causas, éste método de diagnóstico puede presentar ciertas desventajas al tratar de realizar una interpretación de la sintomatología visual que presenta una planta (Fisdale y Nelson 1982) . No obstante lo anterior, el reconocimiento del síntoma puede ser de suma utilidad cuando es complementado con otros métodos de diagnóstico, como son los análisis de suelo y los análisis foliares.

2.1.2. Análisis de suelo

Los análisis de suelo se basan en el concepto de que la respuesta del cultivo a los fertilizantes se debe relacionar con la cantidad de nutrimentos asimilables presentes en el suelo (Foth y Turk, 1975).

En el laboratorio de análisis, los nutrimentos de una muestra de suelo son removidos mediante reactivos para evaluar su disponibilidad para las plantas. Se asume que las raíces extraen los nutrimentos del suelo en una forma similar a las soluciones extractoras empleadas en el laboratorio y que hay una relación directa entre los nutrimentos extractables presentes en el suelo y su absorción por las plantas. Sin embargo, en el campo, las cantidades de los nutrimentos que las plantas pueden aprovechar dependen básicamente de las condiciones climáticas y edáficas, así como del volumen del suelo explorado por las raíces (Cooke 1983). Debido a esto, no siempre el análisis del suelo es una guía para determinar la fertilización de los cultivos, ya que el valor obtenido depende de como se haya realizado el muestreo, del manejo practicado en la muestra en el campo y en el laboratorio y de la interpretación de dichos resultados,

para lo cual se requiere de valores estandar apropiados, que muchas veces en nuestro medio no se tienen a la mano.

2.1.3. Análisis de la planta

La importancia del análisis vegetal, como técnica de diagnóstico para evaluar necesidades nutrimentales, fué reconocida en la primera mitad del Siglo XIX por el científico alemán Justus von Liebig, (Donahue et al. 1981).

Debido a que la planta puede ser considerada como el integrador de su ambiente, el análisis vegetal refleja los efectos resultados de todos los factores de crecimiento externos a la planta. Por lo tanto, la composición de la planta representa una medida de su condición nutrimental interna. La cantidad de un elemento dado en una planta es una indicación del suministro de este nutrimento en particular, y por lo tanto se relaciona directamente con la cantidad presente en el suelo (Tisdale y Nelson, 1982).

El análisis foliar, como guía para evaluar el estado nutrimental de la planta, está basado en que: a) la hoja es el sitio principal del metabolismo vegetal; b) los cambios en el abastecimiento nutrimental son reflejos en la composición de la hoja; c) estos cambios son más pronunciados en ciertas etapas de desarrollo que en otras y d) la concentración de los nutrimentos en la hoja, en etapas específicas de desarrollo, están relacionadas con la producción del cultivo (Valdez, 1989).

2.2. Factores de variabilidad nutrimental inherentes a la planta

2.2.1. Especie

Las investigaciones realizadas sobre nutrición vegetal han demostrado que las necesidades de los diferentes nutrimentos varían de acuerdo a la especie de que se trate.

2.2.2. Variedad

Las variedades mejoradas y los híbridos tienen una mayor capacidad de absorción de nutrimentos que las variedades criollas.

Munson y Nelson (1973), encontraron variaciones en la concentración nutrimental de k de las hojas de maíz, según el híbrido y el ciclo de cultivo. En general, las características genéticas influyen grandemente en la absorción y concentración nutrimental de la planta. Por ello, la composición nutrimental es reflejo de características ambientales y genéticas.

2.2.3. Etapa fenológica

La edad fisiológica del tejido es el factor que probablemente tiene mayor efecto, después del suministro de nutrimentos, sobre la composición nutrimental de una determinada especie.

La acumulación de nutrimentos en la planta, cuando es joven, ocurre en un grado más rápido que el aumento de peso. Sucede lo inverso cuando la planta llega a la madurez. Esto causa una declinación en la concentración de nutrimentos al ir aumentando la edad de la planta (Foth).

y Turk, 1975). Al respecto, Smith (1962) señala que para los árboles frutales en la mayoría de los casos la concentración de N, P, K, y Zn disminuye en relación a la edad de la hoja, sucediendo lo contrario para el caso de los nutrimentos Ca, Mg, Mn, Fe, Al y B, los cuales tienden a incrementar su concentración.

2.2.4. Órgano a muestrear

Para una especie en particular, hay una parte de la planta donde, para una etapa fenológica determinada, existe una mejor relación entre concentración nutrimental y rendimiento. La translocación de muchos nutrimentos es un proceso continuo dentro de la planta y los diferentes órganos tienen distinta prioridad por los elementos.

Para la selección del tejido a muestrear deben considerarse tanto aspectos prácticos como aspectos funcionales; principalmente: a) que exista la mejor correlación entre el funcionamiento de la planta y el contenido de elemento y b) ser de fácil identificación y colección. De manera general, (Embleton y Jones, 1966) señalan que las hojas reúnen estas dos cualidades.

2.2.5. Posición del órgano a muestrear

En cuanto al proceso de translocación, existe una gran diferencia en la movilidad de los diversos nutrimentos. Cuando se presenta una escasez de un elemento móvil, éste se toma de los tejidos más viejos formados con anticipación y se trasloca a los puntos de crecimiento. Los nutrimentos móviles dentro de la planta son el nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio y zinc. Los

nutrimentos que presentan una movilidad limitada son el calcio, boro, fierro, cobre y maganeso (Foth y Turk, 1975).

Lo anterior afecta grandemente la relación concentración nutrimental-rendimiento, según la posición del órgano muestreado sobre la planta. La información que se logra por medio del análisis químico de una planta en crecimiento indica no solo la concentración de los diversos nutrimentos sino también la relación de los elementos entre sí. El equilibrio de los elementos existentes en el interior de la planta es tan importante como la concentración real que de esos elementos se tenga.

2.3. Sistemas de interpretación del análisis foliar

La interpretación de los resultados de los análisis foliares puede ser realizada desde diversos puntos de vista, ya que existen diferentes metodologías a través de las cuales se puede llegar a diagnosticar el estado nutrimental de las plantas y con ello estar en la posibilidad de hacer recomendaciones, básicamente sobre la aplicación de fertilizantes para satisfacer los requerimientos nutrimentales para su normal desarrollo. Dichas metodologías son (Valdéz, 1989):

- a) niveles críticos,
- b) valores estandar y
- c) DRIS.

2.3.1. Método de niveles críticos.

El nivel crítico es definido como aquel nivel del

nutrimento en el tejido de la planta abajo del cual la tasa de crecimiento, rendimiento o calidad disminuye significativamente en un 5 a 10 por ciento (Sumner, 1978). Generalmente es obtenido variando un nutrimento que es limitante cuando todos los demás están presentes en cantidades adecuadas (Valdéz, 1989).

Sin embargo, la diagnosis de un problema de nutrición mineral en plantas, usando el método de niveles críticos, es severamente limitado por la incapacidad del método para tomar en cuenta las variaciones del contenido nutrimental conforme se incrementa la edad de la planta. Así mismo, el sistema requiere que la composición mineral del tejido vegetal sea comparado con normas establecidas en forma de índices con rangos permisibles de variación para cada elemento en un estado de desarrollo particular. Estos rangos son a menudo muy amplios, hecho que reduce mucho la sensibilidad del método (Sumner, 1977).

Una forma de incrementar la confiabilidad del método es que las hojas analizadas con fines de diagnóstico sean muestreadas en el mismo estado de desarrollo que aquellas que fueron utilizadas para calcular los índices, con lo cual la precisión aumenta. No obstante, no siempre es posible o conveniente muestrear las hojas en un estado de desarrollo particular (Sumner, 1977).

Otro problema que presenta éste método es que asume la ausencia de interacciones entre nutrimentos. Sin embargo, las interacciones, ya sean positivas o negativas, existen. Además, si dos o más nutrimentos son diagnosticados deficientes por este sistema, no es

posible establecer cual de ellos es más limitante en términos de rendimiento.

2.3.2. Método de valores estandar

También conocido como Indices de Balance, el enfoque de valor estandar ha sido desarrollado por (Kenworthy, 1961.1973), siendo aplicado originalmente para el caso de los árboles frutales. Un valor estandar es definido como la media del contenido nutrimental de un tejido en particular, muestreado en una etapa específica de desarrollo, dentro de una población de plantas que tienen un comportamiento hortícola óptimo. Este método requiere de suficiente información preliminar disponible para determinar la variación normal para cada elemento, especie, ambiente, etc.

Los valores de composición de la hoja son expresados como porcentajes de los valores estandar y ajustados por la variación en la composición de las plantas normales (Kenworthy, 1973).

Los nutrimentos pueden ser ordenados de acuerdo a su requerimiento por la planta, siendo el más requerido aquel que presente el menor índice de balance y el menor requerido aquel cuyo valor de balance sea el mayor.

La capacidad de este método para clasificar los nutrimentos por su orden de requerimiento es una ventaja sobre el método de niveles críticos. Sin embargo, éste también supeditado a que las muestras sean tomadas en la misma etapa fenológica y de la misma posición relativa en la planta que aquellas que fueron utilizadas para el cálculo de los valores estandar, siendo estas sus principales desventajas.

2.3.3. Sistema DRIS.

El DRIS considera la posibilidad de ausencia de interacciones (Aditividad); y que cuando existen, es factible la obtención de respuestas mayores (sinergismos) o menores (antagonismos) que la suma de los efectos individuales de los factores, Sumner y Farina, (1986). Entonces el DRIS se basa en la Ley de Liebig, o del mínimo, la cual establece que el rendimiento máximo posible, es función directa del factor más limitante de acuerdo a las necesidades del cultivo; pero también se basa en la Ley de Mitscherlich, o de los rendimientos decrecientes misma que se fundamenta en que el rendimiento que de incrementarse por efecto de cada uno de los factores, siempre y cuando no esten presentes en sus niveles subóptimos o mínimos. Ambas leyes deberían llamarse conceptos porque no cumplen como tales (Mitchel, 1970); Sin embargo, la de Mitscherlich es menos rigurosa, porque también concibe a la respuesta como función de los factores que no son limitantes (Sumner y Farina, 1986).

El DRIS se rige por el tipo de respuesta que se muestra en la figura 1. En el punto A, el rendimiento es bajo debido a una deficiencia de X, o bien, a un exceso de Y; lo cual puede corregirse al incrementar X, y permitir que se obtenga un rendimiento B determinado por n factores. Niveles altos de X (o bajos de Y) pueden provocar rendimientos relativamente estables, como se aprecia con la línea BO. Valores de X más altos que el correspondiente a O, conllevan a reducir el potencial de rendimiento. Si el más limitante de los n factores es elevado a un nivel no limitante, el rendimiento puede incrementarse a C como resultado de un aumento de X, y

depender de no-1 factores limitantes. Niveles altos de X pueden causar respuestas estables hasta alcanzar el punto N, pero después del mismo causan un efecto negativo sobre el rendimiento. Situaciones en las cuales se induce a los puntos N y O corresponden a antagonismos: mientras que los incrementos del rendimiento de B a C resultan de eliminar la influencia de factores limitantes, y el efecto del nuevo nivel de X y demás factores refleja un caso de sinergismo. El incremento del rendimiento de C a D resulta de eliminar uno más de los factores limitantes, el cual obtuvo muy poca respuesta a X, y tal evento refleja una situación de aditividad. Conforme los factores limitantes son eliminados el rendimiento se incrementa en respuesta al aumento de X.

Lo anterior ilustra que las reacciones biológicas son complejas; tanto que existe la posibilidad de que más de un factor edáfico, climático o de la misma planta, sea limitante. Por ello, el DRIS contempla la calibración de los factores determinantes como funciones de producción (Sumner, 1977 a y b).

El DRIS representa una técnica o método holístico y, de hecho, se constituye por un grupo integrado de normas (valores de referencia) representativas de parámetros del vegetal, suelo, ambiente y prácticas de manejo (Sumner, 1982; Sumner, 1986). Sin embargo, Beaufils, Sumner y colaboradores de ambos se han limitado, casi exclusivamente, a perfeccionar el método en base a composición foliar; porque consideran que la planta es el integrador de los efectos de su ambiente (Sumner y Boswell, 1981) No debe olvidarse que los análisis de suelo son necesarios para determinar las cantidades de nutrimentos que se necesita añadir para corregir las

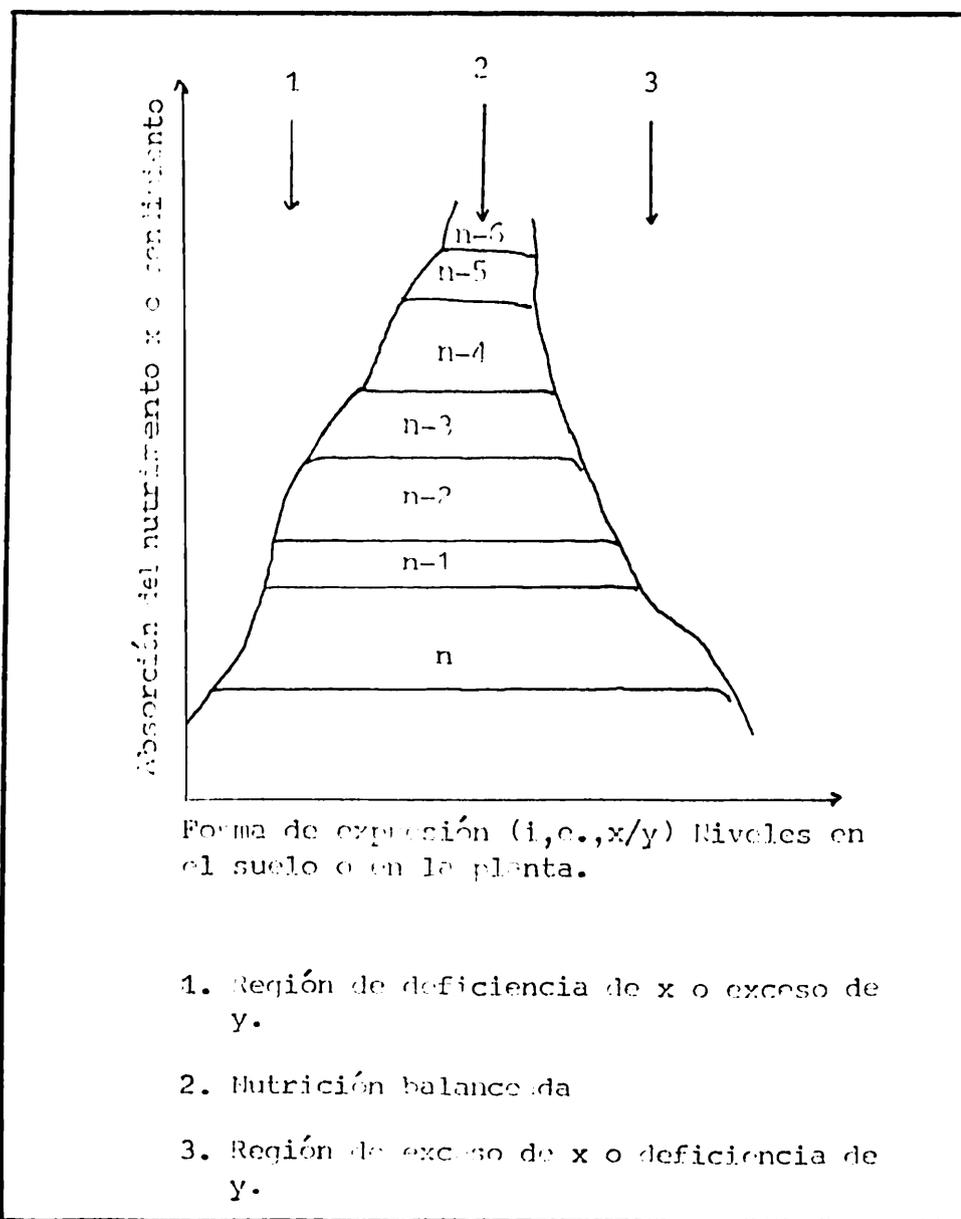


Fig. 1. Representación de la respuesta del cultivo a diversas cantidades de factores limitantes - (Cunner y Farina, 1986).

posibles deficiencias, y complementarlos con una adecuada interpretación de los análisis foliares; siempre y cuando se carezca de las normas del DRIS para factores edáficos y/o climáticos.

2.3.3.1. Determinación de las Normas DRIS.

El hombre ha manipulado la producción de cosechas, adaptado las especies a diversos ambientes. Para hacer las cosechas las plantas absorben continuamente los nutrimentos de la solución del suelo y contribuyen al detrimento de la fertilidad natural del mismo, porque se rompe el ciclo normal de los elementos en forma de elementos químicos. Así, surge la necesidad de suplementar los minerales necesarios para satisfacer los requerimientos nutrimentales de los cultivos.

Por ello, es de suma importancia conocer la composición foliar con la cual se pueden obtener altos rendimientos. Al respecto, el DRIS, como sistema de diagnóstico foliar, tiene como primer paso el establecimiento de valores estándar o normas (Walworth y Sumner, 1987), valiéndose del modelo de respuesta Desafortunadamente, la sensibilidad a los factores X y Y esta definida por la longitud de las líneas horizontales en diversos niveles de rendimiento (Sumner y Farina, 1986), que bien puede ser el rango de adecuancia señalado por Dow y Roberts (1982). El cual se aprecia en el figura 2.

Focos grupos de datos (población) de la concentración de algún nutrimento se distribuyen normalmente, sobre todo si se colectaron en el campo; pero ello se debe, en mayor grado, a las prácticas agrícolas que a la respuesta

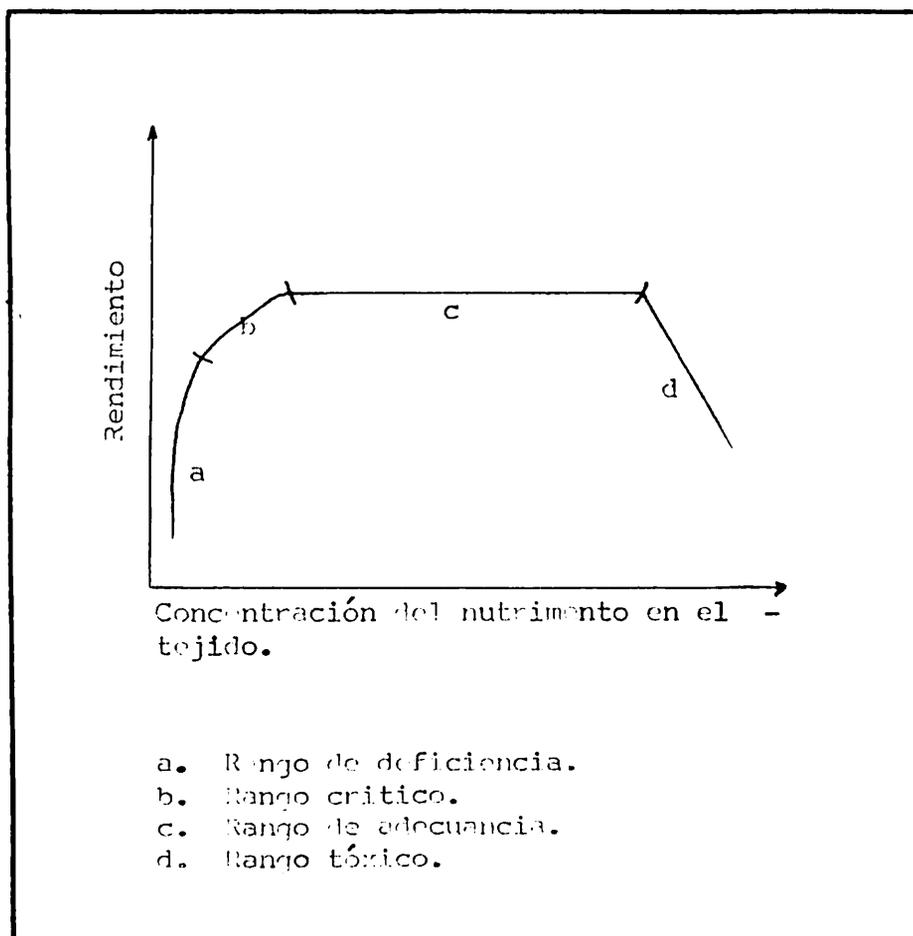


Fig. 2. Relación entre la concentración en el tejido vegetal y el rendimiento del cultivo e identificación de diferentes rangos (Dow y Roberts, 1932).

de la planta (Walworth y Sumner, 1977b). Sin embargo, esto no representa problemas para que los datos sean utilizados en la generación de los valores estándar o normas; y que, aún empíricamente, es posible apreciar una fuerte tendencia de los datos a distribuirse normalmente, y cuyo valor máximo representa la mejor concentración o valor de la forma de expresión con respecto al rendimiento más alto. La porción superior, puede ser abierta, lo cual indica un potencial de rendimiento genéticamente indefinido (Walworth y Sumner, 1977b).

En general, la población debe dividirse en dos grupos: uno correspondiente a altos rendimientos y el otro a bajos. Letzsch y Sumner (1984) demostraron la poca importancia del tamaño de los grupos; pero Walworth y Sumner (1977a y 1977b) recomendaron que el punto de transición, entre ambos grupos, sea aproximadamente igual al rendimiento que obtengan los mejores productores.

Las desviaciones normales respecto al valor óptimo se estiman con los coeficientes de variación del grupo de altos rendimientos. Para que los grupos sean diferentes estadísticamente, es necesario eliminar aquellas observaciones que se ubiquen en las colas de la distribución de Gauss representadas con las áreas sombreadas de la figura No. 3. Es conveniente que estas áreas sean maximizadas con la finalidad de incrementar la sensibilidad de los diagnósticos (Walworth y Sumner, 1977a) a realizar con diferentes formas de expresión, mismas que si en base a una prueba de homogeneidad de varianzas (Sumner, 1977 a; Sumner, 1977 b; Chan et al., 1985a) o de "t de Student" (Chan et al., 1985b) para mayor precisión, son diferentes entre grupos: se definen como factores limitantes del rendimiento.

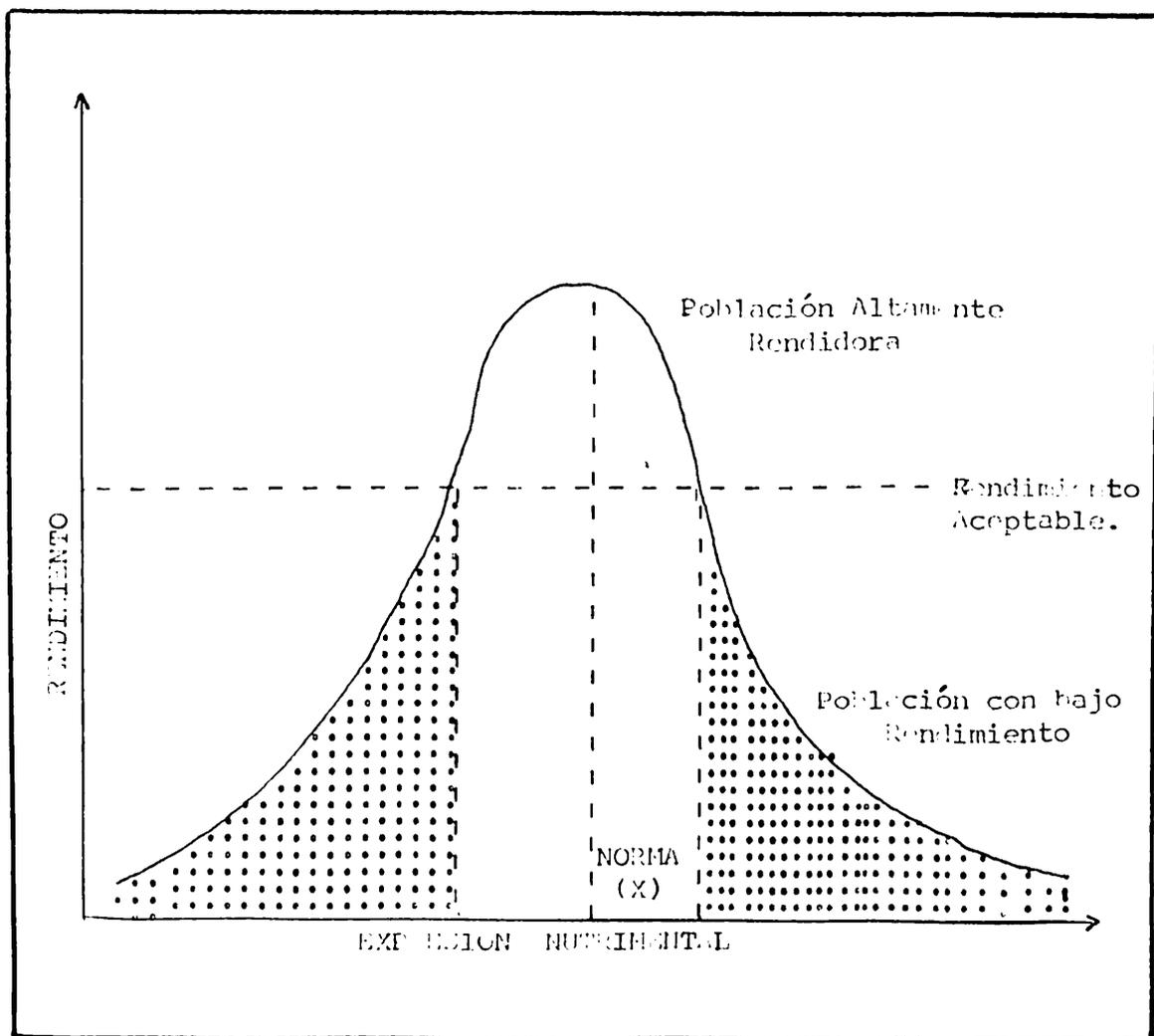


Fig. 3. Ilustración esquemática de las observaciones usadas para generar las normas DRI. Las áreas sombreadas representan poblaciones afectadas debido a insuficiencias, excesos o desbalances del nutriente o nutrientes en cuestión. (Wilworth y Turner, 1987).

La meta final del diagnóstico foliar es discriminar entre plantas con características deseables e indeseables (generalmente en base al rendimiento); pero solamente las plantas cuya composición foliar (respecto a la forma de expresión del caso) se ubica en las áreas sombreadas, se clasifican como indeseables debido al efecto de los nutrimentos involucrados (Walworth y Sumner, 1977). Esto significa que las plantas son composiciones casi iguales a la óptima pueden ser de bajos rendimientos, siempre y cuando los factores limitantes no sean los que estén en consideración; lo cual se explica con las pruebas de homogeneidad de varianzas y/o de "t de Student". La validez de las normas depende de la veracidad de los datos y su origen. Si la fuente es un gran número de sitios ampliamente distribuidos, de ser posible del planeta entero o cuando menos de las principales regiones productoras de algún cultivo en particular, las normas tenderán a ser de aplicación universal; sin embargo, al comparar las generadas en ciertas regiones (normas locales) es posible que se presente una confusión debido a diferencias substanciales, aunque éstas resultan de la amplitud de los rangos permisibles, lo cual se corrobora con los valores de los coeficientes de variación asociados (Walworth y Sumner, 1987) a cada una de las formas de expresión. Ejemplos de nutrimentos con rangos amplios permisibles son el Cl y el Mg (Walworth y Sumner, 1987).

Existen fuertes restricciones para que los investigadores generen normas universales. Eso ha ocasionado que los interesados trabajen a nivel local y, entre ellos se encuentran Sumner y Beaufile (1975) con caña de azúcar, Meldal-Johnsen y Sumner (1980) con papa, Lee (1980) con té (*Camellia Sinensis* L.), Beverly et al., (1984) con naranjo, Chan et al., (1985b)

con duraznero. Jones et al. (1986) con trébol, Davee et al. (1986) con cerezo dulce, y Erickson et al. (1982) y Walworth et al. (1986) con alfalfa.

En cambio, Elwali et al., (1985) propusieron las normas universales para maíz y se apoyaron en mas de 8000 datos de Composición foliar colectados en diversas partes del planeta.

2.3.3.2. Factores que afectan las Normas DRIS.

La exactitud de los diagnósticos foliares depende de la validez de las normas en situaciones específicas (Walworth y Sumner, 1986); impuestas por factores exógenos tales como variedad o cultivar, interacciones de nutrimentos, condiciones ambientales y edad de la planta, entre otros.

Cuando se estudian factores difíciles de medir y controlar se obtienen respuestas muy variables y, por lo general, los efectos se manifiestan con bajos rendimientos, a tal grado que no se puede definir la contraparte para determinar las normas.

Las concentraciones de los nutrimentos en las hojas raras veces son constantes. Algunas disminuyen durante la estación de crecimiento, mientras otras aumentan (figura 4). Esa variación se elimina, en parte, al expresar la concentración en base a materia seca porque se reduce el efecto de la humedad (Valdéz et al., (1989) y como tal, es una forma de expresión en proporción, adecuada para cuando ambos nutrimentos decrecen o se incrementan;

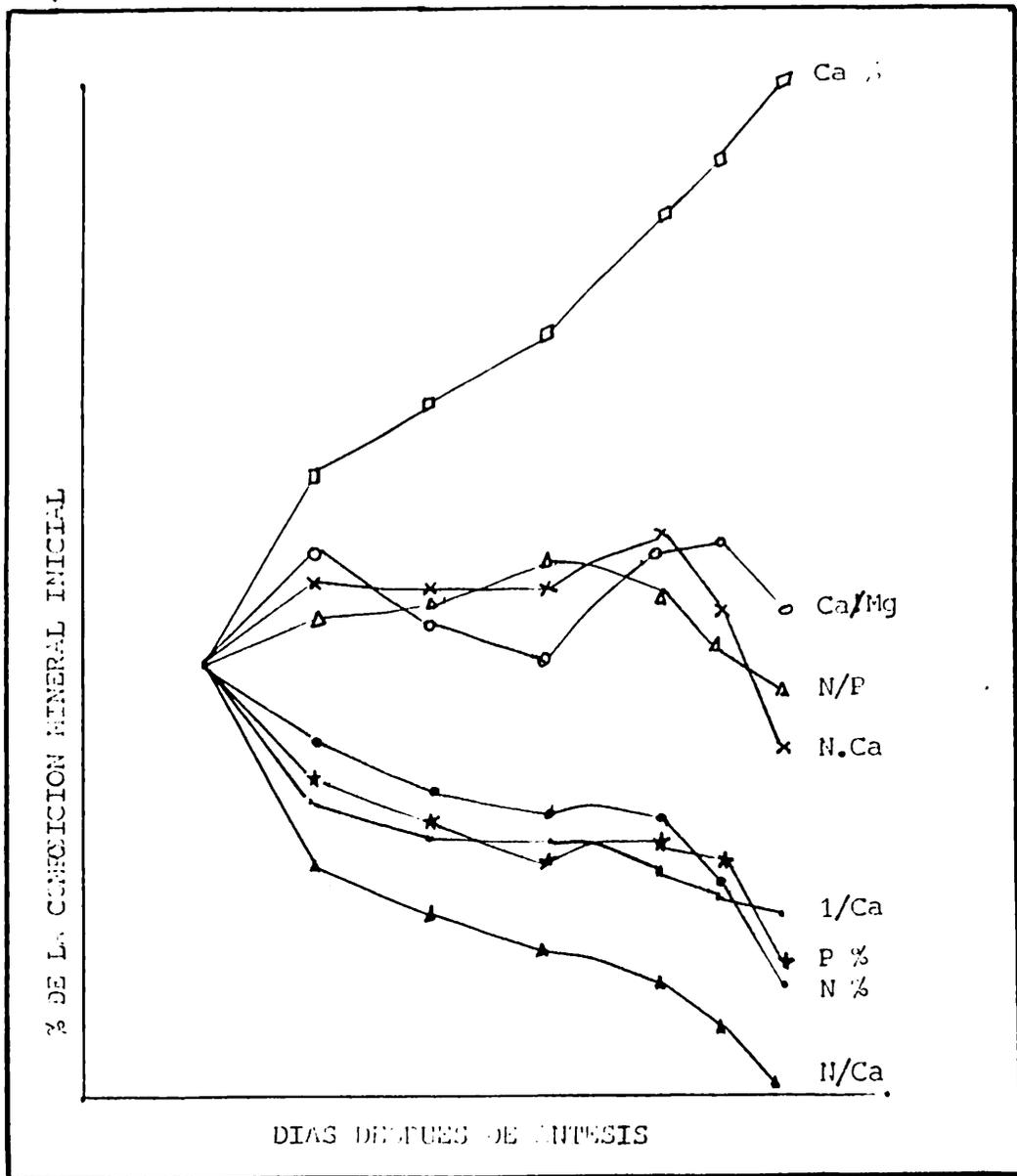


Fig. 4. Efecto de la edad de la hoja sobre diferentes formas de expresión de la composición nutricional en hojas de duraznero (*Prunus persica*) (Sumner, 1985).

mientras que si los comportamientos son opuestos la mejor forma de expresarlos (Ecuación 1) es el producto (Sumner, 1986; Walworth y Sumner, 1986 y 1987). El cociente del denominador, $1/Ca$, puede definirse como un nutrimento nuevo e identificarse con cualesquier literal, por ejemplo X (Sumner, 1986; Walworth y Sumner 1986 y 1987).

$$N = \frac{N}{\frac{1}{Ca}} \cdot Ca(1)$$

Donde:

$$\frac{1}{Ca} = X(2)$$

$$N \cdot Ca = \frac{N}{X} \quad (3)$$

2.3.4. Diagnóstico del estado nutrimental.

El DIRS establece que los diagnósticos en base a las normas establecidas para un cultivo en particular, se pueden hacer mediante las técnicas de cartas e índices. Los diagnósticos correspondientes a las respuestas del cultivo (concentración de los elementos en sus diversas formas de expresión), a los tratamientos de estudio en estructuras experimentales, o bien, al manejo general de predios agrícolas.

Las cartas se construyen utilizando las formas considerando a éstas como rangos, por lo que necesariamente se involucran las medias aritméticas y las desviaciones estándar de tres formas de expresión correspondientes a igual número de nutrimentos.

A su vez, los índices del DRIS se estiman en función de la diferencia entre los valores medios de la forma de expresión de la muestra en diagnóstico y la norma correspondiente.

$$F(A/B) = 100 \left[\frac{a/b}{A/B} - 1 \right] \frac{10}{CV}; \text{ Cuando } (a/b < A/B) \quad (4)$$

$$F(A/B) = 100 \left[1 - \frac{A/B}{a/b} \right] \frac{10}{CV} ; \text{ Cuando } (A/B < a/b) \quad (5)$$

donde:

$F(A/B)$ = Función para la forma de expresión A/B

A Y B = Nutrimentos A y B

a/b = Valor medio de la forma de expresión a/b de la muestra

A/B = Norma del DRIS

CV = Coeficiente de variación de la norma del DRIS

Posteriormente, se calculan los índices del DRIS mediante la Ecuación 6, la cual representa la forma general.

$$IA = \sum \left[f(A/B) + f(A/C) \dots - f(B/A) - f(C/A) \dots \right] / n \quad (6)$$

Donde:

IA = Índice de A

A, B, C, etc. = Nutrientos

n = número de formas de expresión en que interviene A.

En casos como el representado en la Ecuación 1, el índice para X se computa con la Ecuación 6 pero dado que se procede al cálculo con la aproximación N/X, el signo debe ser cambiado para que el índice corresponda al Ca (Walworth y Sumner, 1986).

El sistema establece que la suma de los índices obtenidos debe ser igual a cero. Valores negativos significan deficiencias del elemento y positivos, excesos.

2.3.5. Suposiciones sobre los datos y resultados.

Uno de los supuestos básicos fundamentales en el DRIS, es la formalidad de los datos; su ajuste a un modelo de curva de Gauss permite operar con ellos los estadísticos comunes, como lo son la Media y la Desviación estándar, parámetros que garantizan estimaciones seguras; desafortunadamente cuando los datos de rendimiento y análisis foliar son pocos, no se observa visualmente una distribución normal de los datos,

precisamente por lo escaso de los mismos; de ahí la necesidad de probar, mediante una Prueba de Chi cuadrada, el ajuste de los datos a un modelo normal.

2.4. Geoestadística.

Los primeros métodos de interpolación desarrollados para explicar la variación espacial de un proceso fueron desarrollados en la década de los 40, por Drozov y Sephelevskii (1946), retomados en la década de los 60 por Gandin (1965). Al mismo tiempo, G. Matheron (1971) introduce la teoría de las variables regionalizadas, la cual condujo al desarrollo de la técnica de estimación denominada "Kriging". Este método de interpolación esencialmente consiste en obtener los mejores estimadores lineales e insesgados, con una varianza mínima y conocida.

El término regionalizado propuesto por Matheron (1971) describe un fenómeno que se distribuye en el espacio y/o tiempo con una cierta estructura. Una variable que caracteriza a un fenómeno de este tipo se denomina "variable regionalizada", (Delhomme, 1978).

Originalmente el método de interpolación de "kriging" se utilizó en el área de ingeniería de minas, pero posteriormente su uso se generalizó como una herramienta

para la interpolación de cualquier tipo de datos, entre los que destacan la hidrología, propiedades físicas y químicas de los suelos (Delhomme, 1978; Burgess y Webster, 1980; Webster y Burgess, 1984; Campbell, 1978; Mcbratney y Webster, 1983; Oliver, 1987;).

Muchos son los factores que afectan la distribución espacial de un elemento tanto en el suelo como en la planta de un cultivo dado, debido principalmente a la capacidad de muestrear un predio adecuadamente, dicha distribución, y el método empleado para estimar la concentración media debe ser apto para representar esa distribución. Las variaciones espaciales de la concentración del elemento pueden estudiarse mediante procesos estadísticos que las representen en forma continua sobre la región considerada (campos aleatorios) y a partir de esta hipótesis construir un método, llamado Kriging, para estimar valores puntuales o funciones lineales del campo aleatorio en una región, utilizando un conjunto de valores observados. Adicionalmente a la estimación puntual o promedio de la concentración, el método Kriging provee una medida de la precisión de los valores estimados.

2.4.1 Fundamentos del método Kriging

Sea $Z(x)$ un proceso estadístico continuo describe la distribución de la concentración total en un intervalo fijo de tiempo, donde la notación vectorial x representa las coordenadas de un espacio bidimensional. Asumiendo que las mediciones pueden efectuarse sin error instrumental. la observación $z(x)$ es una realización del proceso $Z(x)$ y, para hacer inferencias sobre éste, es

necesario reconstruir su función de distribución de probabilidades a partir de una sola realización. Esto se debe a que dos elementos constituyen eventos analíticamente independientes y, por tanto, poseen estructuras espaciales diferentes. Sin embargo, una sola realización es insuficiente incluso para deducir los momentos de un campo aleatorio, por lo cual es necesario establecer hipótesis simplificadoras que permitan identificar la estructura espacial de la concentración.

El objetivo de cualquier método de estimación es extraer información de los datos disponibles. En particular, el método Kriging es un estimador de funciones lineales de un campo aleatorio que toma en cuenta la variabilidad espacial. a través de la covarianza, el semivariograma o la covarianza generalizada del proceso $Z(x)$. A su vez, estas funciones tienen que identificarse y sus parámetros estimarse a partir de la observación de $Z(x)$. Entonces, la concentración media de un elemento de un área A , definida como:

$$P = 1/A \int_A Z(x) dx \quad (1)$$

se calculará con un estimador lineal que considera n puntos de muestreo (suelo y/o plantas).

$$P = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (2)$$

donde los pesos λ_i , $i = 1, \dots, n$ se determinan de tal manera que el valor esperado del estimador sea igual al valor esperado de la concentración media del elemento.

$$E(\hat{P}) = E(\bar{P}) \quad (3)$$

y que el error cuadrado medio de la estimación sea mínimo.

$$\text{Var}(\hat{P} - \bar{P}) = \min \quad (4)$$

La primera condición asegura que el estimador no produzca errores sistemáticos en los valores estimados, esto es Kriging es un estimador insesgado. La segunda propiedad establece un criterio de optimalidad con respecto a la varianza de estimación; esto es, cualquier otro estimador lineal e insesgado tiene una varianza del error de la estimación mayor que la de Kriging. A continuación se exponen las hipótesis que permiten identificar y utilizar la estructura espacial de la concentración en la construcción del estimador Kriging.

2.4.2. Estacionaridad de segundo orden

Un campo aleatorio es estacionario de segundo orden si satisface las siguientes condiciones:

i) La media es una constante independiente de las coordenadas, esto es

$$E[Z(X)] = m(X) = m, \quad (5)$$

ii) La varianza es una consante independiente de las coordenadas, o sea

$$\text{Var} \left[Z(X^2) \right] = \sigma^2(X^2) = \sigma^2, y \quad (6)$$

iii) La función de covarianza es independiente de la ubicación de cada punto, sólo depende de la distancia entre ellos

$$\text{cov}(X_1, X_2) = \text{cov}(X_1 - X_2) = \text{cov}(y) \quad (7)$$

$$\text{donde } y = x_1 - x_2.$$

Asumiendo que la función de convarianza (7) y la media (5) son conocidas, la condición de inesejadura (3) aplicada al estimador (2) conduce a

$$E \left[\sum_{i=1}^n \lambda_i Z(X_i) \right] = E \left[1/A \int_A Z(X) dX \right] \quad (8)$$

como ambas ecuaciones son lineales

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i E \left[Z(X_i) \right] = 1/A \int_A E \left[Z(X) \right] dX \quad (9)$$

Utilizando la propiedad (5), la ecuación (9) se reduce a

$$m \sum_{i=1}^n \lambda_i = m \cdot 1/A \int_A dX \quad (10)$$

por lo que la condición de insesgadura se simplifica a

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (11)$$

El error cuadrado medio de la estimación por minimizar, ecuación (4), es

$$\begin{aligned} \sigma_p^2 &= E \left[(\hat{P} - P)^2 \right] = E(\hat{P}^2) - 2E(\hat{P} P) + E(P^2) \\ &= E \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j Z(X_i) Z(X_j) \right] - \\ &\quad \left[\frac{1}{A} \int_A \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(X) Z(X_i) dX \right] + \\ &\quad + E \left[\frac{1}{A^2} \int_A \int_A Z(X_1) Z(X_2) dX_1 dX_2 \right] \quad (12) \end{aligned}$$

Invocando linealidad y la propiedad (7), la varianza del error de la estimación se puede expresar como

$$\begin{aligned} \sigma_p^2 &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j \text{cov}(X_i - X_j) - \\ &\quad - \frac{2}{A} \int_A \sum_{i=1}^n \lambda_i \text{cov}(X - X_i) dX + \end{aligned}$$

$$+ 1/A^2 \int_A \int_A \text{cov} (X_1 - X_2) dX_1 dX_2 \quad (13)$$

introduciendo un multiplicador de Lagrange (μ) el error cuadrado medio de la estimación (13) puede minimizarse sujeto a la condición de insesgadura (11). Después de formar la función auxiliar, de derivar con respecto a los pesos y al multiplicador de Lagrange, y de igualar a cero, se obtiene un sistema lineal de $n + 1$ ecuaciones con igual número de incógnitas

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j \text{cov}(X_i - X_j) + \mu = 1/A \int_A \text{cov} (X - X_i) dX_i, \quad i=1,2,\dots,n$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (14)$$

de donde se obtienen los pesos óptimos λ_i y el multiplicador μ .

El error cuadrado medio de la estimación puede ser derivado multiplicando las primeras n ecuaciones (14) por λ_i y sumando, con lo que se obtiene

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i^* \lambda_j^* \text{cov}(X_i - X_j) + \sum_{i=1}^n \lambda_i^* =$$

$$= \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n \lambda_i^* \int_A \text{cov}(X - X_i) dx \quad (15)$$

y sustituyendo esta expresión en (13), se llega a la mínima variancia del error de la estimación

$$\begin{aligned} \sigma_p^2 &= \frac{1}{A^2} \int_A \int_A \text{cov}(X_1 - X_2) dX_1 dX_2 - \\ &- \frac{1}{A} \int_A \sum_{i=1}^n \lambda_i^* \text{cov}(X - X_i) dx - \mu \end{aligned}$$

La evaluación de las integrales en (16) requiere una definición funcional de la covarianza y, en general, no es posible encontrar una solución en forma cerrada: hipótesis de homogeneidad e isotropía pueden reducir las integrales de bidimensionales a unidimensionales. Otra forma de calcular dichas integrales es mediante el método Monte Carlo, ya que el primer término de la ecuación (16) es el valor medio de la función de covarianza entre dos puntos barriendo independientemente el área A, y la integral del segundo término en (16) es el valor medio de la covarianza entre el punto de medición x_i , y un punto que describe el área A.

Existe un número limitado de clases de covarianzas apropiadas para procesos espaciales que pueden ser comparadas con la covarianza empírica o experimental y así identificar una posible estructura. Una vez identificada la forma funcional de la covarianza, sus

parámetros pueden estimarse por prueba y error, y la bondad de ajuste puede ser evaluada con el método de validación cruzada .

El sistema Kriging (14) muestra que la estimación considera i) las distancias entre los puntos muestreados mediante los términos $cov(x_i - x_j)$, ii) las distancias entre los puntos de observación y un punto que describe el área A con los términos $cov(x - x_i)$, y iii). La estructura espacial de la concentración a través de la función de covarianza. Los pesos óptimos y la varianza de estimación se calculan para cada caso específico, y sólo dependen de la estructura espacial de la concentración y de la configuración geométrica de los puntos de medición. En particular, las λ s no dependen de los valores observados $z(x_i)$, excepto porque éstos son utilizados para identificar la estructura y para estimar los parámetros de la función de covarianza.

Las ecuaciones (14) son conocidas como Kriging por bloques, debido a que los pesos óptimos obtenidos con ellas conducen a estimar una funcional lineal (1) del proceso $Z(x)$, definida en un área A, considerada como un bloque. Sin embargo, un caso límite se presenta cuando el área A se reduce a un punto x_0 , donde se desea conocer el valor de la concentración: en este caso, la integral doble que aparece en (16) es igual a la varianza del proceso σ^2 , y las integrales simples de las ecuaciones (14) y (16) se reducen a $cov(x_0 - x_1)$. Las ecuaciones (14) son conocidas como Kriging puntual, y el estimador (2), funciona como un interpolador exacto, restituyendo en cada punto de medición x el valor observado $z(x_i)$ con nula varianza de estimación.

La estimación de valores puntuales o promedios espaciales requiere solucionar tantos sistemas Kriging como puntos o áreas se deseen estimar. Sin embargo, si todos los puntos de muestreos se utilizan para cada punto o área, solamente cambia el lado derecho de las ecuaciones (14) y la matriz de los sistemas Kriging necesita ser invertida una sola vez. En este caso se habla de una vecindad única. Pero si el número de puntos de medición es muy grande o el área de influencia de la función de covarianza representa una distancia menor que la de los puntos alejados, para Kriging puntual se pueden utilizar sólo los 10 ó 20 puntos de muestreo más cercanos al punto por estimar, en cuyo caso se habla de una vecindad móvil para Kriging por bloques, se deben usar todos los puntos comprendidos dentro del área de interés y, si es posible, observaciones hechas en la vecindad inmediata del área, ya que las varianzas de estimación más grandes se presentan en la frontera de la región que contiene los muestreos de cada punto de la malla.

2.4.3. Hipótesis intrínseca

Un campo aleatorio $Z(x)$ satisface la hipótesis intrínseca y se le denomina función intrínseca aleatorio (FIA) si las diferencias de primer orden $Z(x_1) - Z(x_2)$ son estacionarias en la media y en la varianza

$$E \left[Z(x_1) - Z(x_2) \right] = m(y) \quad (17)$$

$$\text{Var} \left[Z(x_1) - Z(x_2) \right] = 2\gamma(y) \quad (18)$$

y por lo tanto, independientes de las coordenadas de los puntos x_i , esto es, sólo dependen de la diferencia vectorial $y = x_1 - x_2$. La hipótesis intrínseca es una

condición menos restrictiva que la de estacionariedad de segundo orden, ya que puede manejar procesos con varianzas infinitas. Se asume que sólo diferencias de la variable aleatoria $Z(x)$, tales como $Z(x_1) - Z(x_2)$, poseen una varianzas finitas e igual al variograma estacionario $2\gamma(y)$, definido por la ecuación (18). La $\text{var } Z(x)$ y la $\text{cov}(x_1, x_2)$ no necesariamente deben existir.

La varianzas de una combinación lineal de una función intrínseca aleatoria es finita si la suma de los pesos es igual a cero. A dicha combinación lineal se le califica como autorizada y, bajo la hipótesis intrínseca, sólo las combinaciones lineales autorizadas tienen una varianzas finitas. Adicionalmente ésta puede ser calculada reemplazando la función de covarianza $\text{cov}(x_i - x_j)$ por menos el semivariograma $(x_i - x_j)$. Sin embargo, el objetivo principal de la hipótesis intrínseca no es tratar con procesos de varianzas infinitas, debido a que los procesos geofísicos poseen por lo general varianzas finitas. La implicación práctica del cálculo de la varianzas de una combinación lineal autorizada es que si la media del proceso es constante, aunque sea desconocida, el semivariograma puede estimarse sin sesgo, ya que se requiere estimar la media. Asumiendo que la media $m(x)$ y el semivariograma $\gamma(y)$ definido por la ecuación (18) son conocidos, la condición de insesgadura (3) resulta ser

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i m(x_i) = 1/A \int_A m(x) dx \quad (19)$$

De fundamental importancia para Kriging con semivariogramas, es la existencia de la varianzas del error de la estimación. El error de la estimación es

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) - 1/A \int_A Z(x) dx \quad (20)$$

y para que posea una varianza finita debe ser una combinación lineal autorizada; es decir, la suma de los pesos debe ser igual a cero. Introduciendo una función continua de peso

$$\int_A w(dx) \equiv \sum_{i=1}^n \lambda_i \delta_{xi} - 1/A \int_A dx \quad (21)$$

donde:

$$\delta_{xi} = \begin{cases} 1, & x=x_i \\ 0, & x \neq x_i \end{cases} \quad (22)$$

el error (20) puede expresarse como una combinación lineal continua

$$\int_A Z(x) w(dx) \quad (23)$$

que debe satisfacer la condición

$$\int_A w(dx) = 0 \quad (24)$$

para ser una combinación lineal autorizada. De la ecuación (24) se obtiene que la condición para que el error de la estimación (20) posea una varianza finita es

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (25)$$

La función auxiliar por minimizar se obtiene al substituir la función de covarianza por menos el semivariograma en (13) y sumar las restricciones de autorización (25) y de insesgadura (19), multiplicadas por sus respectivos multiplicadores es Lagrange μ_0 y μ_1 . Derivando e igualando a cero, se llega al sistema

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma(X_i - X_j) + \mu_0 + \mu_1 m(X_i) &= \\ &= 1/A \int_A \gamma(X - X_i) dX, \quad i=1,2,\dots,n \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j &= 1 \end{aligned} \quad (26)$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i m(X_i) = 1/A \int_A m(X) dX$$

cuyos pesos óptimos se utilizan para calcular el mínimo error cuadrado medio de la estimación

$$\begin{aligned}
\sigma_p^{z*} = & - 1/A^2 \int_A \int_A \gamma (X_1 - X_2) dX_1 dX_2 + \\
& + 1/A \int_A \sum_{i=1}^n \lambda_i^* \gamma(X - X_i) dX + \\
& + \mu_0 \sum_{i=1}^n \lambda_i^* + \mu_1 \sum_{i=1}^n \lambda_i^* m (X_i)
\end{aligned}
\tag{27}$$

Si la media $m(x)$ es constante, la última ecuación de (26) es redundante y la condición de insesgadura (19) coincide con la condición de autorrealización (25) y, los términos, que contienen el multiplicador de Lagrange μ_1 en las ecuaciones (26) y (27) deben removerse. En el caso de Kriging puntual, la integral doble es (27) igual a cero, y las integrales sencillas que contienen el semivariograma es (26) y (27) se reemplazan con $\gamma(X_0 - X_i)$. La estimación estadística del semivariograma puede efectuarse, por ejemplo, mediante regresión con mínimos cuadrados con máxima verosimilitud y métodos interactivos o bien con estimadores robustos tipo M.

2.4.4 Hipótesis intrínseca generalizada

Un campo aleatorio bidimensional $Z(x)$ satisface la hipótesis intrínseca generalizada si los pesos de la combinación lineal

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i Z(X_i) \quad (28)$$

Satisfacen las condiciones

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i u_i^{p_1} u_i^{p_2} = 0 \quad (29)$$

para todos los enteros

$$0 \leq p_1 + p_2 \leq k \quad (30)$$

siendo U_i y V_i las coordenadas cartesianas del punto X_i . Al proceso $Z(x)$ se le denomina función intrínseca aleatoria de orden k (FIA- k) y a la combinación lineal (28), incremento generalizado de orden k . Simplificando la notación, los monomios que aparecen en (29) se pueden reemplazar por funciones básicas $f(x)$ donde l representa la condición (30). Así, la combinación lineal (28) es un incremento generalizado de orden k si

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i f^l(X_i) = 0 \quad (31)$$

se satisface para todos los monomios de orden $l \leq k$.

La consideración de incrementos generalizados de orden k implica trabajar con toda una clase equivalente de procesos; esto es, las funciones $Z(x)$ y $Z(x) + R(x)$,

donde el orden $R(x)$ es menor o igual que k , poseen exactamente el mismo incremento generalizado de orden k (Matheron. 1973). La implicación práctica de esta propiedad es que un incremento generalizado de orden k puede filtrar un polinomio de k ; por ejemplo, para $k=0$, la combinación lineal (28) filtra una constante, que es lo que se obtiene cuando se utiliza la hipótesis intrínseca. En otras palabras, las primeras diferencias filtran constantes; las segundas, funciones lineales etc. La idea de la hipótesis intrínseca generalizada es, entonces, considerar diferencias sucesivas o incrementos de $Z(x)$ hasta obtener un proceso estacionario.

Similar al caso de las combinaciones lineales autorizadas dentro de la hipótesis intrínseca generalizada sólo los incrementos generalizados de orden k tienen una varianza finita, y ésta se puede calcular con una función de covarianza generalizada (FCG) estacionaria de orden k $K(y)$. Casi siempre se trabaja con covarianzas generalizadas homogéneas e isotrópicas, que pueden expresarse en función del módulo. h , de la diferencia vectorial y , $K(h)$.

La extensión al caso de incrementos generalizados continuos de orden k se expresa de la siguiente manera. Si la condición

$$\int_A f^l(x) W(dx) = 0 \quad (32)$$

se satisface para toda $f^l(x)$ de orden $1 \leq k$ entonces

$$\int_A Z(x) W(dx) \quad (33)$$

es un incremento generalizado de x en k , y $Z(x)$ es una FIA- k .

La teoría de las FIA- k asume que la media también conocida como deriva o tendencia, puede modularse localmente con un polinomio

$$m(X) = \sum_{l=0}^v \alpha_l f^l(X) \quad (34)$$

donde las funciones básicas $f^l(x)$ son los monomios referidos en (31). y los coeficientes α son constantes desconocidas que por fortuna no se requieren estimar. El orden de la media se denota con k , y v es el número de monomios. por ejemplo, en un plano definido por las coordenadas cartesianas u y v .

$$k = 0 \quad m(X) = \alpha_0 \quad (\text{tendencia constante})$$

$$k = 1 \quad m(X) = \alpha_0 + \alpha_1 u + \alpha_2 v \quad (\text{tendencia lineal})$$

$$k = 2 \quad m(X) = \alpha_0 + \alpha_1 u + \alpha_2 v + \alpha_3 u^2 + \alpha_4 v^2 + \alpha_5 uv$$

(Tendencia cuadrática)

Asumiendo que la función de covarianzas generalizadas y el orden de la media son conocidos, la condición del insesgadura es idéntica a (9). Sustituyendo la definición de la media (34), se obtiene

$$\sum_{i=1}^{nv} \lambda_i \sum_{l=0}^v \alpha_l f^l(X_i) = 1/A \int_A \sum_{l=0}^v f^l(X) dX \quad (35)$$

$$\sum_{l=1}^n \alpha_l \left[\sum_{i=1}^n \lambda_i f^l (X_i) - 1/A \int_A f^l (X) dX \right] = 0 \quad (36)$$

Esta ecuación debe ser satisfecha para cualquier valor de las constantes α_l , por lo tanto, la condición de insesgadura se expresa en las siguientes $v+1$ ecuaciones

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i f^l (X_i) - 1/A \int_A f^l (X) dX = 0, \\ l = 0, 1, \dots, v \quad (37)$$

o, en forma continua

$$\int_A f^l (X) W(dX) = 0 \quad (38)$$

Si en el caso de la hipótesis intrínseca la media se modelara polinomialmente (34). La condición de insesgadura (19) se expresaría de manera idéntica a (37) y coincidiría con la condición de autorización (24) que, en este caso, es igual a (38).

Por lo que se refiere a la hipótesis intrínseca generalizada la ecuación (38) es la condición requerida para que la combinación lineal (33) sea un incremento generalizado de orden k y, por tanto para que tenga una varianza finita. Debe notarse que la ecuación (33) es

el error de la estimación (compárese con (23)). por lo cual coinciden las condiciones de insesgadura y de existencia de la varianza del error de la estimación, y se expresan mediante (37).

Análogamente a los casos anteriores, la varianza de la estimación se minimiza sujeta a las condiciones de insesgadura. resultando el sistema Kriging

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j k(X_i - X_j) - \sum_{l=0}^v \mu_l f^l(X_i) =$$

$$= 1/A \int_A K(X - X_i) dX, \quad i=1,2,\dots,n \quad (39)$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i f^l(X_i) = 1/A \int_A f^l(X) dX, \quad l=0, 1,\dots,v$$

y la mínima varianza

$$\sigma_p^{2*} = 1/A^2 \int_A \int_A K(X_1 - X_2) dX_1 dX_2 -$$

$$- 1/A \sum_{i=1}^n \lambda_i^* \int_A K(X - X_i) dX +$$

$$+ 1/A \sum_{l=0}^v \mu_l \int_A f^l(X) dX \quad (40)$$

En el caso de Kriging puntual, la integral de la primera ecuación de (39) se sustituye por $K(X_0 = X_1)$ y la integral de la segunda se reduce a (X_0) y la integral doble de (40) se simplifica a $K(0)$, que es una cantidad no negativa.

La principal ventaja de utilizar incrementos generalizados es que se evita el problema de estimar la media o tendencia. Así, como este enfoque sólo se requiere que el orden k de la FIA sea capaz de filtrar la media, si es distinta de cero.

Se ha encontrado que la mayor parte de los datos registrados en la práctica pueden describirse satisfactoriamente con funciones intrínsecas aleatorias de orden 0, 1 ó 2. El cuadro 1 muestra funciones de covarianza generalizada polinomiales, junto con las restricciones que aseguran que las varianzas de incrementos generalizados sean siempre positivas. Al término C se le denomina efecto de pepita (nugget effect), de acuerdo con la práctica mineralógica de llamar pepita a un pequeño macizo. y presenta errores de muestreo en los valores observados $z(x_i)$, o bien irregularidades del proceso $Z(x)$ a una escala mucho menor que el espaciamiento de los puntos de medición. Esto significa que la suavidad de la superficie predicha depende del comportamiento de $K(h)$ para h pequeña, y que la propiedad del estimador Kriging de ser un interpolador exacto se obtiene a costa de discontinuidades en los puntos de medición si $K(h)$ no es continua en el origen.

Para identificar la estructura de una FCG- k no es necesario estimar los coeficientes de la media polinomial. sólo se requiere conocer el orden k de los incrementos generalizados que filtran la media. El orden k de la FCG que represente adecuadamente el proceso muestreado puede determinarse como se explica a

continuación . Si se eliminan secuencialmente los datos de los puntos de medición, los errores Kriging de estimación obtenidos con $K(h) = \rho(h)$ pueden compararse para $k=0,1$ y 2 , dado que este modelo de covarianza generalizada es apropiado para cualquier valor de k . Al orden que produce el error Kriging más pequeño se le asigna el grado 1, a los restantes los grados 2 y 3, el último de los cuales es el mayor error Kriging. Los grados de cada orden se promedian sobre todos los puntos estimados, y el orden con el menor grado promedio se considera el mejor.

Cuadro No 1. Modelos apropiados para $K(h)$

Orden K	$K(h)$	Restricciones
0	$C_0(h) + a_1 \rho(h)$	$C_0 > 0, a_1 < 0$
1	$C_0(h) + a_1 \rho(h)$	$C_0 > 0, a_1 < 0, a_3 > 0$
2	$C_0(h) + a_1 \rho(h) +$ $a_3 \rho(h)^3 + a_5 \rho(h)^5$	$C_0 > 0, a_1 < 0, a_3 < 0, a_5 >$ $-(10/3)(a_1 a_5)$

Donde $\rho(h) = 1.0$ si $h = 0$, y $\rho(h) = 0$, si $h \neq 0$

Una vez que se determina el orden k de la FCG, es necesario estimar sus parámetros. Un primer enfoque es construir incrementos generalizados con todas las covarianzas generalizadas apropiadas para el orden considerado y minimizar el error cuadrado medio de las varianzas Kriging .

Otra forma de hacerlo es utilizar regresión con mínimos cuadrados, regresión con mínimos cuadrados pesados o bien con máxima verosimilitud .

Por último, debe considerarse el número de puntos n , requeridos para utilizar el método kriging con covarianzas generalizadas. En el caso de Kriging por bloques, es necesario emplear todos los puntos comprendidos en el área estudiada y si es posible, puntos localizados en la vecindad inmediata. Para Kriging puntual, se sugiere usar los 8, 12 ó 16 puntos más cercanos al punto por estimar, si $k = 0, 1$ ó 2 , respectivamente.

III. MATERIALES Y METODOS

3.1 Descripción del área de estudio

Este estudio se estableció en el predio agrícola de la pequeña propiedad "La Galleguita" localizado al sur de la ciudad de Bermejillo, Municipio de Gómez Palacio, Dgo.

El área total de estudio mide 800 m de norte a sur, por 300 m de oriente a poniente lo que implica un total de 24-00-00 ha.

La comarca lagunera, es de clima seco con lluvias en verano e invierno, con una precipitación media anual muy variante (200 a 700 mm), con temperatura media anual de 20 °C, con máxima de 40 y mínima de -5 °C; siendo el mes más caluroso Junio y el mes más frío Enero; los suelos dominantes son Xerosol, Yermosol y Solonetz, con texturas medias a finas. La altura promedio sobre el nivel del mar es de 1200 m.

3.2. Muestreo.

El muestreo se realizó cuadriculando el área en distancia de 50 por 50 m, cada muestra fue tomada del centro del cuadrado trazado. En cada sitio se tomó una planta completa de alfalfa con todo y cepa de suelo.

Las muestras obtenidas se llevaron de inmediato al laboratorio de la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas de la Universidad Autónoma Chapingo donde se separaron el suelo y la planta cuidadosamente.

A la planta se le cortó la parte aérea completa y se pesó, posteriormente se secó en una estufa de circulación de aire forzado, a una temperatura de 60 °C durante 24 horas. Una vez secas las plantas, se molieron en un micro molino de aspas y tamices de acero inoxidable, de esta manera se obtuvieron las muestras para el análisis de suelos y foliar.

3.3. Análisis de suelos

Al suelo de la cepa, se secó en un cuarto cerrado a la temperatura ambiente, y se molió con un rodillo de madera, presionando ligeramente sobre las partículas, y se tamizó en una malla 20, guardándose las muestras en bolsas de plástico.

En cuanto al suelo se hicieron las siguientes determinaciones:

pH, se determinó con un potenciómetro digital.

Conductividad eléctrica, con un conductivímetro digital.

La materia orgánica se determinó por el método de Walkley y Black (1974).

El contenido de Nitrógeno total por el método de Kjeldalh.

El análisis de las proporciones de arcilla, limo y arena se determinó por el método de Bouyoucos (1951).

El fósforo se determino en el extracto soluble por el método de Olsen.

Cationes extraíbles. estos fueron medidos en el extracto soluble de la muestra de suelo, determinándose calcio, magnesio, sodio, y elementos menores en un espectrofotómetro de absorción atómica.

3.4. Análisis de tejidos.

El nitrógeno se determinó por el método de micro-Kjeldalh.

El fósforo por el método vanado-molibdato modificado (Zasoski y Burau, 1977).

La extracción total de los elementos analizados se llevó a cabo por digestión húmeda, usando como solución digestora la mezcla de ácidos Sulfúrico y Ferclórico en relación 4:1. Se usaron 0.2 gr. de material vegetal y 7 ml de solución digestora. Los residuos de la digestión se aforaron a 25 ml con agua destilada. De estos extractos se tomaron las alícuotas para el análisis de los siguientes elementos: Potasio, Calcio, Magnesio, Sodio, Fierro, Manganeso y Zinc.

IV RESULTADOS

Los resultados de los análisis practicados a los suelos del predio agrícola La Galleguita , municipio de Gómez Falacio,Dgo. se presentan en el cuadro No 2 Mientras que que los resultados de los análisis practicados a las plantas de alfalfa del mismo predio se muestran en el cuadro No 3.

De acuerdo a la metodología descrita en el capítulo anterior, de los análisis practicados a las plantas de alfalfa ; se obtuvieron los resultados de las relaciones entre los elementos,que se presentan en el cuadro No 4.

Con los resultados de las relaciones entre los elementos se procedió a formular las funciones para cada relación, con las ecuaciones 4 y 5, de acuerdo a las normas para el cultivo de alfalfa.Los resultados se muestran en el cuadro No 5.

Con cada valor de la función por elemento, se procedió a calcular los índices DRIS mediante el uso de la ecuación 6 y se verificó que la suma de dichos valores fuera igual a cero. Los resultados se muestran en el cuadro No 6. el cual incluye el orden de requerimiento del cultivo de alfalfa para dicha localidad ; el orden fué de la siguiente manera:

Ca > Cu > P > Zn > N > Mg > K

En el cuadro No 7 se presentan los coeficientes de correlación y determinación de las variables en estudio.

Cuadro No 2 Propiedades químicas del suelo del predio
la Galleguita. Gómez Palacio, Dgo.

COORDENADAS		pH	CE	MO	F	Ca	Mg	Na	K
X	Y		S	%		----- ppm ----			
0	0	8.2	5.28	2.31	10.96	605	174	510	68
50	0	8.2	5.28	2.04	3.43	545	162	505	44
0	50	8.3	7.75	2.17	2.83	500	181	635	49
50	50	8.3	6.34	2.17	5.08	525	171	565	42
0	100	8.2	5.99	2.50	5.35	505	168	515	54
50	100	8.0	6.34	2.57	2.98	485	175	560	46
0	150	8.3	5.28	2.04	7.04	470	153	455	38
50	150	7.8	5.99	2.31	6.14	465	159	560	49
0	200	8.3	5.99	2.04	3.73	400	141	450	46
50	200	8.4	4.58	2.37	5.99	410	127	355	30
0	250	8.0	4.23	0.92	4.78	435	99	255	22
50	250	8.1	3.38	0.92	3.43	476	84	209	11
0	300	8.1	4.08	1.71	5.38	470	94	305	16
50	300	8.1	3.52	1.51	4.33	516	105	270	9
0	350	7.9	3.87	0.92	2.23	467	118	331	10
50	350	8.0	3.17	1.18	1.46	377	81	235	13
100	0	7.3	6.34	1.57	5.08	590	188	585	40
150	0	6.7	4.51	1.91	4.48	410	124	315	31
100	50	7.2	5.64	2.52	4.33	500	168	500	31
150	50	6.8	4.93	3.69	6.29	450	127	350	35
100	100	6.8	5.99	1.36	6.74	470	144	495	60
150	100	7.3	5.35	0.41	7.19	430	145	385	37
100	150	7.4	5.28	0.41	6.44	525	167	510	46
150	150	6.8	7.05	0.61	6.59	560	186	505	63
100	200	7.2	7.75	3.55	7.49	560	204	695	47
150	200	7.3	7.87	2.59	7.94	479	139	272	25
100	250	6.8	3.73	0.47	9.31	480	123	295	23
150	250	7.1	3.73	0.13	9.46	443	129	298	22
100	300	7.3	3.87	2.25	8.54	479	132	317	26
150	300	7.2	3.94	2.46	7.49	475	131	385	59
100	350	7.4	3.87	2.52	9.46	514	144	321	25
150	350	7.3	3.38	3.00	7.34	436	112	251	18

Cuadro No. 3 Propiedades químicas de las plantas del predio La Galleguita, Gómez Palacio, Dgo.

=====

COORDENADAS

X	Y	P	Ca	Mg	Na	K	Fe	Mn	Cu	Zn
0	0	537	2.72	0.62	0.16	2.76	1844	132	14	42
50	0	500	1.62	0.36	0.24	2.34	500	38	14	34
0	50	275	0.45	0.46	0.30	2.83	1890	101	12	54
50	50	575	2.06	0.48	0.16	3.48	798	58	14	44
0	100	375	2.12	0.42	0.08	2.20	672	68	14	38
50	100	425	2.36	0.58	0.18	2.70	1922	102	14	44
0	150	475	1.78	0.36	0.12	3.04	304	38	14	42
50	150	250	2.06	0.36	0.08	3.06	266	64	14	30
0	200	300	1.60	0.38	0.12	2.76	946	66	16	56
50	200	375	0.46	0.32	0.09	4.11	469	45	8	52
0	250	275	1.64	0.36	0.14	2.12	910	50	14	42
50	50	250	2.24	0.34	0.10	1.86	458	44	12	28
0	300	262	0.35	0.23	0.06	2.56	547	53	8	69
50	300	275	2.06	0.44	0.14	1.32	1080	64	16	44
0	350	262	1.98	0.44	0.16	1.66	1402	60	16	54
50	350	400	1.98	0.46	0.18	1.96	1380	60	22	50
100	0	250	0.23	0.25	0.01	3.78	185	50	7	52
150	0	325	0.24	0.27	0.03	4.35	217	46	8	53
100	50	325	0.26	0.32	0.02	3.90	207	55	11	59
150	50	350	0.29	0.27	0.01	3.97	184	57	12	50
100	100	325	0.22	0.23	0.08	3.54	190	55	10	57
150	100	400	0.22	0.25	0.05	3.68	260	48	10	53
100	150	325	0.25	0.30	0.01	5.25	190	55	13	65
150	150	375	0.19	0.29	0.01	3.30	213	55	10	54
100	200	375	0.20	0.26	0.05	3.70	216	48	10	66
150	200	350	0.23	0.22	0.08	3.07	197	59	12	62
100	250	537	0.40	0.34	0.04	6.20	178	43	10	88
150	250	350	0.19	0.23	0.01	3.97	202	52	12	65
100	300	425	0.01	0.01	0.01	0.01	173	35	10	50
150	300	350	0.21	0.21	0.02	3.35	189	44	10	60
100	350	325	0.23	0.27	0.01	3.40	190	51	11	55
150	350	400	0.24	0.29	0.01	3.91	170	50	9	85

=====

Todos los elementos en ppm.

Cuadro No 4 Resultados de relaciones entre variables.

Variable	Mínimo	Máximo	Media	Des. Est
F	0.25	0.57	0.36	0.09
N	0.35	2.87	1.78	0.45
CA	0.01	2.72	0.97	0.90
MG	0.01	0.62	0.33	0.12
NA	0.01	0.30	0.09	0.08
K	0.01	6.20	3.13	1.16
FE	0.17	1.92	0.58	0.55
MN	0.04	0.13	0.06	0.02
CU	0.01	0.02	0.01	0.00
ZN	0.28	0.88	0.53	0.13
N/F	0.87	7.63	5.11	1.41
N/K	0.10	200.00	6.85	35.25
N/Ca	0.50	200.00	10.48	34.76
N/Zn	0.66	8.44	3.61	1.50
N/Cu	35.00	245.71	154.46	49.14
P/K	0.06	42.50	1.45	7.49
P/Ca	0.11	42.50	2.19	7.39
Mg/N	0.01	0.71	0.21	0.13
Mg/P	0.02	1.68	0.96	0.37
Zn/P	0.68	2.63	1.53	0.46
Cu/P	0.02	0.06	0.04	0.01
K/Ca	0.64	21.00	9.03	7.64
Mg/K	0.05	1.00	0.15	0.17
K/Zn	0.02	10.20	5.99	1.92
Cu/K	0.00	1.00	0.04	0.18
Mg/Ca	0.15	1.53	0.72	0.46
Zn/Ca	0.13	50.00	3.01	8.66
Cu/Ca	0.01	1.00	0.06	0.17
Zn/Mg	0.68	50.00	3.24	8.56
Cu/Zn	0.01	0.05	0.02	0.01

Cuadro No 5. Funciones para cada relacion de los elementos analizados en el cultivo de alfalfa.

VARIABLE	MEDIA	NORMA	CV	FUNCION
N/P	5.11	12.4500	19.1	-75.20
N/K	6.85	1.4990	18.2	30.44
N/Ca	10.48	2.5340	11.6	116.70
N/Zn	3.61	0.1504	24.5	-9.38
N/Cu	154.46	0.4583	26.1	-12.74
P/K	1.45	0.1240	23.8	- 449.30
P/Ca	2.19	0.2163	23.8	38.33
Mg/N	0.21	0.0550	22.6	124.69
Mg/P	0.96	0.6722	21.3	20.10
Zn/P	1.53	90.4500	55.6	-104.52
Cu/P	0.04	28.6800	27.8	-38.42
K/Ca	9.03	1.9380	19.3	189.60
Mg/K	0.15	0.0831	31.9	25.23
K/Zn	5.99	0.1026	27.0	21.25
Cu/K	0.04	3.4310	15.5	-30.17
Mg/Ca	0.72	0.1365	23.1	18.50
Zn/Ca	3.01	18.2700	24.7	-20.52
Cu/Ca	0.06	7.0970	19.3	-60.76
Zn/Mg	3.24	132.6000	31.5	-126.74
Cu/Mg	0.03	43.9600	28.0	-58.42
Cu/Zn	0.02	0.3462	29.0	-56.20

Cuadro No 6 Indices DRIS para los elementos N, P, K, Ca, Mg, Cu, Zn.

ELEMENTO	INDICE DRIS	ORDEN
Ca	- 47	deficiente
Cu	- 39	"
P	- 36	"
Zn	- 35	"
N	- 13	"
Mg	62	balanceado
k	107	"

Cuadro No 7. Valores de coeficiente de correlación (r) y coeficiente de determinación (R^2), de las variables agronómicas.

Variables	modelo lineal		modelo cuadrático	
	r	R^2	r	R^2
Ca(s) - pH	0.73	0.53	0.77	0.59
Na(p) - pH	0.73	0.53	0.78	0.61
Mg(s) - CE	0.36	0.13	0.89	0.77
Na(s) - CE	0.94	0.88	0.94	0.88
K(s) - CE	0.73	0.53	0.76	0.59
Mg(s) - Ca(s)	0.68	0.46	0.72	0.52
Na(s) - Mg(s)	0.92	0.85	0.92	0.86
K(s) - Mg(s)	0.76	0.58	0.81	0.65
K(s) - Na(s)	0.76	0.58	0.79	0.63
Mg(p) - Ca(p)	0.80	0.64	0.81	0.65
Na(p) - Ca(p)	0.61	0.37	0.80	0.63
Fe(p) - Ca(p)	0.66	0.43	0.77	0.59

* todos significativos al nivel de 0.01

Los resultados que se presentan de la Metodología de Kriging se obtuvieron del uso de dos programas computacionales de Kriging puntual de vecindad para cada uno de los elementos, y el programa de Krigado para dos dimensiones.

Solo se presentan los resultados de aquellos elementos, tanto del suelo como de la planta que obtuvieron significancia estadística en la elaboración computacional del semivariograma experimental. De igual manera, para cada variable, se presenta el mejor modelo que se ajusta al semivariograma experimental con los parámetros correspondientes al rango del semivariograma y el efecto nugget o pepita.

Con los valores del número de vecinos y los parámetros del semivariograma experimental, se "corrió" el programa computacional de Kriging puntual, dando valores estimados de Z para cada punto con varianza reducida. Los resultados se presentan en los cuadros 8 - 31. del apéndice A.

Con los resultados obtenidos en el Krigado de las variables en estudio, se procedió a obtener las isolíneas y la representación espacial de dichas variables; mediante el uso del programa computacional SURFER. Los resultados se muestran en las figuras A5- A18 del apéndice A.

V DISCUSION DE LOS RESULTADOS

Los resultados indican que dicho cultivo tiene deficiencias marcadas de Ca, Cu, P, Zn, y N, mientras que el Mg y K se encuentran balanceados, es posible atribuir la deficiencia de Ca a que el sitio tiene zonas de alta salinidad (> 4.0 Siemens), y el desbalance entre los cationes alcalinotérreos, se reflejan en un elevado porcentaje de sodio intercambiable, lo que hace que no se satisfagan las necesidades nutricionales del cultivo; de la misma manera los elementos menores, el caso del Cu y el Zn tienen una baja disponibilidad en este tipo de suelos. por lo que era de esperarse un resultado como el obtenido.

En cuanto a la deficiencia de fósforo y nitrógeno, Melton et al (1983), encontraron en suelos del sur de los Estados Unidos, con el cultivo de alfalfa, marcadas respuestas a la fertilización nitrogenada y fosfórica, más aún, los mismos autores manifiestan que de acuerdo a una exhaustiva revisión bibliográfica, la mayor parte de las áreas donde se cultiva alfalfa uno de los elementos más limitante es el fósforo y solo aquéllos suelos donde no existe una simbiosis entre *Rhizobium* y alfalfa, responden a la fertilización nitrogenada.

Melton et al (1983), mencionan que la mayor parte de los cultivos no responden a la fertilización potásica, sobre todo aquellos que se encuentran en suelos que no son de origen marino, esto corrobora que el predio la galleguita tiene un buen abastecimiento de magnesio y potasio. Por lo que es de esperarse que el cultivo tenga una marcada respuesta a la fertilización nitrogenada y

fosfórica , mientras que los elementos menores, cobre y zinc , es posible que puedan ser puestos a disposición del cultivo mediante prácticas de incorporación de yeso agrícola o alguna otra forma de enmienda química.

De los valores obtenidos para cada sitio de muestreo, se procedió a encontrar la matriz de correlación entre las variables en estudio, obteniéndose los valores que se presentan en el cuadro No 7. En dicho cuadro se aprecia que la variable que más correlacionó con otras variables de estudio, fué el calcio, dicho elemento también corresponde al elemento más limitante según los resultados del DRIS, al mismo tiempo, muestra una clara tendencia a correlacionar con los metales alcalinoterreos tanto en suelo como en la planta, lo cual da una evidencia estadística significativa para las condiciones de sitio del cultivo de alfalfa en suelos de moderadamente a altamente salinos. Al respecto Walworth y Sumner (1986), encontraron una relación de índices DRIS en alfalfa de :

N	Ca	MS	S	K	Mg	P
-20	-7	-2	-1	3	13	14

Estos resultados concuerdan parcialmente con los obtenidos en el predio en estudio ya que son limitantes el Ca y el N, sin embargo con respecto a P este, es un elemento con muchas formas y de comportamiento hasta cierto punto impredecible (Sumner y Farina 1986), más aún tratándose de suelos salinos. Otros investigadores como Elwali et al (1985), Escano et al (1981) y Sumner (1977a), mencionan que es posible que las diferencias de sitio podrían ser superadas con la calibración de las normas a nivel regional.

En las figuras A5-A15, se muestra una clara tendencia de similitud en la distribución espacial de los elementos sobre todo aquellos que mostraron alta correlación como el caso de Mg(s) y Ca(s) ($r=0.72$), Na(s) y Mg(s) ($r=0.92$), K(s) y Mg(s) ($r=0.81$), K(s) y Na(s) ($r=0.79$), Mg(p) y Ca(p) ($r=0.81$), Na(p) y Ca(p) ($r=0.80$) y finalmente Fe(p) y Ca(p). Se observa que es el elemento Ca el de mayor participación en la estructura espacial así como el elemento limitante obtenido mediante la metodología DRIS. El Ca con un modelo de Semivariograma Gaussiano y un radio máximo de 95.2 m para plantas y suelos; el K con un modelo de semivariograma Lineal y con un radio máximo 381 m para suelo mientras que en planta no mostró una estructura espacial; en cuanto a Na en planta con un modelo de semivariograma Exponencial y un radio máximo de 381 m mientras que para suelo el modelo de semivariograma fue Lineal y también con un radio máximo de 381 m. El modelo de semivariograma de Mg de suelos y plantas fue Lineal con un radio máximo de 381 m. Para Fe en plantas con un modelo de semivariograma Exponencial y con un radio máximo de 381 m y finalmente para conductividad Eléctrica del suelo el modelo de semivariograma Lineal con un radio máximo de 381 m. Todas las variables en estudio mostraron isotropía y con un efecto nugget cercano a cero lo que indica una pequeña discontinuidad del semivariograma al origen lo que muestra que posiblemente las distancias de separación de la toma de muestras del orden establecido para gamma en ese predio fue apropiado. En general las semivarianza tuvo un comportamiento similar en las variables de estudio con valores cercanos a cero esto sugiere una uniformidad de comportamiento espacial y de relaciones entre las mismas variables muy íntima.

Los resultados muestran que los semivariogramas experimentales son una herramienta promisorio para describir la variabilidad en los suelos y las plantas del cultivo de alfalfa (*Medicago sativa*) y de esta manera obtener esquemas de muestreo simple y múltiple, a diferentes estados fenológicos y medidas adicionales de las propiedades de los suelos en relación con el cultivo que sustentan.

VI. CONCLUSIONES

El cultivo de alfalfa (*Medicago sativa*) en la región lagunera esta basada en buenas propiedades de suelo con explotación de acuíferos subterráneos. Sin embargo la producción de dicho cultivo esta limitada por una serie de factores nutricionales y de manejo, principalmente, que reducen en gran medida su rendimiento potencial. Con respecto, se posea la información básica que señale cuales son los factores más importantes que afectan el rendimiento del cultivo. Ahora bien, de los resultados experimentales y discusión de los mismos se concluye para el área en estudio lo siguiente:

1. Los factores limitantes que influyen en el estado nutricional del cultivo de alfalfa del sitio en estudio son: Ca , Mg , K , Na y NO_3^- , relaciones que no se encuentran balanceadas. Esto valida que el uso del análisis como método de interpretación de análisis foliar permite determinar con mayor precisión el grado de abastecimiento nutricional. Además de los conceptos las interacciones nutricionales por lo que la hipótesis planteada no se rechaza ya que las relaciones que guardan entre sí los nutrientes influyeron marcadamente sobre el orden de requerimiento.

2. Es posible que la alta conductividad eléctrica del suelo (14.4 dsm/cm), y su relación con las variables NO_3^- , Ca y Na con valores de coeficientes de correlación, $r = 0.72$ influya directamente sobre el desbalance de Ca y NO_3^- permitiendo disponibilidad apropiada para dicho cultivo. Esto valida el cultivo planteado y al mismo tiempo no rechaza la hipótesis que se plantea.

2. Con respecto al objetivo sobre la variabilidad espacial de las variables en estudio, el estudio tuvo como finalidad evaluar los niveles de nutrientes por distribuciones como todas las relaciones de r del área de interés y su caracterización como variables geoestadísticas muestran ser significativas e isotrópicas y en la mayoría de los casos el rango máximo es de 0,61 m.

4. La relación entre el método de diagnóstico DRIS y la herramienta que representa el semivariograma es altamente promisorio, el cual podrá permitir por una parte evaluar el estado nutricional del cultivo de alfalfa (Medicago sativo) y por otra su distribución en grandes áreas aun cuando se haga con susidos contrastantes y diferentes manejos del cultivo. De tal manera que permitan ambas metodologías diagnosticar deficiencias nutrimentales y las posibles enmiendas químicas, biológicas, o mecánicas a sus naya lugar.

VII. RESUMEN

En este trabajo se pretende demostrar que con la utilización de las geotecnologías de origen, que nos permiten conocer la distribución espacial de los factores de sitio y el DRIS que nos muestra el estado nutricional de un cultivo, es posible diagnosticar con mayor precisión el estado fisiológico del cultivo de alfalfa.

Este estudio se estableció en el municipio de Gómez Farfán, Dgo., en el predio agrícola "La Galleguita" con cultivo de alfalfa (*Medicago sativa*). El muestreo se realizó en una malla cuadrada de 50 x 50 m. en una área de 150 x 300 m.

A los resultados obtenidos de los análisis foliares, se le formularon las funciones y los índices DRIS, dando un orden de requerimientos como sigue:

Ca	>	Su	>	P	>	Zn	>	M	>	Mg	>	K
-47		-37		-35		-33		-13		+52		+107

Se realizó una prueba de modelos de semivariograma para cada variable, obteniendo el mejor, se realizó el krigado, y con los resultados se obtuvieron las isocurvas y la representación tridimensional.

Los resultados del método de kriging muestran que el elemento calcio, es el de mayor participación en la estructura espacial. Todas las variables mostraron isotropía, y con un efecto nugget cercano a cero, lo que indica que el muestreo fue apropiado. En general la semivarianza tuvo un comportamiento similar.

De los resultados se concluye que la relación entre el método de kriging y el de DRIS es altamente promisorio para la diagnosis nutricional de los cultivos.

LITERATURA CITADA

- Beverly, R. B., J.C. Stark, J.C. Ojala and T. W. Embleton. 1984. Nutrient diagnosis of Valencia oranges by DRIS. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 109: 649-54.
- Bouyoucos, G. T. 1951. A calibration of the hydrometer method for making mechanical analysis of soil. Agron. J. 43:434-38.
- Bremner, J. M. 1965. Inorganic forms of nitrogen. In: C. A. Black (ed). Methods of soil analysis. (Part 2). Amer. Soc. Agron. Madison, Wisconsin, USA.
- Burguess, T.M. and R. Webster. 1980. Optimal interpolation and isarithmic mapping of Soil properties. I. The semi-variogram and punctual kriging. J. Soil Sci. 31:315-331.
- 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.
- Cooke, G.W. 1983. Fertilización para rendimientos máximos. CECSA. México.

- Chan, J. L., R. D. Valdez y M. H. Perez. 1985. Normas de diagnóstico foliar para duraznero en condiciones de riego. XVIII. Congr. Nal. SMCS, A.C.
- Davee, D.E., T. L. Righetti, E. Fallani and S. Robbins. 1986. An evaluation of the DRIS approach for identifying mineral limitations on yield in Neapolitan sweet cherry. J. Amer. soc. Hort. Sci. 111 : 988 - 93
- Delhomme, J. P. 1978. Kriging in the Hydrosiences. Advances in Water Resources. 1(5)251-266.
- Donahue, R.L., R.W. Miller y J. C. Shickluna. 1981. Introducción a los suelos y al crecimiento de las plantas. pag. 327. Ed. Dossat. Madrid.
- Dow, A.I. and S. Roberts. 1982. Proposal: critical nutrient ranges for crop diagnosis. Agron. J. 74: 401-3.
- Drosdov, O. y Sephelevskii, A. A. 1946. The theory of interpolation in a stochastic field of meteorological elements and its application to meteorological maps and network rationalizations problems. (en ruso), trudy NIUHUGMS 1(18).
- Elwali, A.M.O., G.J. Gascho and M.E. Sumner. 1985. Sufficiency levels and DRIS norms for 11 nutrients in corn. Agron. J. 77: 506-8

- Embleton, T.W. and W.W. Jones. 1966. Avocado and mango nutrition. In: Childer. M.F. (ed). Fruit nutrition. Horticultural Publications. Rutgers - The State University. New Brunswick, N.J. pag. 117-132.
- Erickson, T., K.A. Kelling and E. E. Schulte. 1982. Predicting alfalfa nutrients needs through DRIS. Proc. Wisconsin Fertil. Agrime. and Pest. Manage. Conference. 21: 233-46.
- Escano, C. R., C. A. Jones, G. Uehara. 1981. Nutrient Diagnosis in is corn grown on Hydric Dystrandeps: I. Optimum tissue nutrient concentrations. Soil Sci. Soc. Amer. J. 45:1135-39.
- Foth, H.D. y L. M. Turk. 1975. Fundamentos de la ciencia del suelo. CECSA. México. pag. 460.
- Gandin, L. S. 1965. Objective analysis of meteorological Fields. Jerusalem, Israel. Israel Program for Scientific Translation. 242 pp
- Jones, M. B., D. M. Center, Ch. E. Vaughn and F. L. Bell. 1986. Using DRIS to assay nutrients in subclover. California Agriculture . 40 (9,10) : 19 -21.
- Kenworthy, A.L. 1961. Interpreting the balance of nutrient elements in leaves of fruit trees.. In: W. Reuther (ed). Plant analysis and fertilizer problems. A.I.B.S. publ. 8 Washington, D.C. pag. 80-86.

- 1973. Leaf analysis as an aid in fertilizing orchards. In: Walsh, L. M. and J. D. Beaton (eds.). Soil testing and plant analysis. Soil Sci. Soc. Amer. Madison, Wisconsin. pag. 240.
- Lee, P.F.W. 1980. Initial observations on application of the DRIS approach to tea (*Camellia sinensis* L.) foliar analysis results in South Africa. *Crop Production* 9: 207 -9.
- Letzch, W.S. and M. E. Sumner 1984. Effect of population size and yield level in selection of diagnosis and recommendation integrated system (DRIS) norms. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 15: 997-1006.
- Matheron, G. 1971. The theory of regionalized variables and its applications. Fountainbleu, Francia. Cahiers du Centre de Morphologie Mathematique, Ecole des Mines. 211 pp.
- Mcbratney, A.B. and R. Webster. 1983. How many observations are needed for regional estimation of soil properties? *Soil. Sci.* 135: 177-183.
- Meldal-Johnsen, A. And M.E. Sumner. 1980. Foliar diagnostic norms for potatoes. *J. Plant Nutr.* 2: 569-76.

Melton B., L. Satterlee, F. Smith, A. Marong and D. Miller. 1983. "Estimated nitrogen fixation alfalfa and effects on a succeeding crop in Southern New Mexico". Agricultural Experiment Station. Bulletin 697. New Mexico State University.

Mitchell, R. L. 1970. Crop growth and culture. The Iowa State University Press. Ames, IA. USA 349 p.

Munson, R.D. and W.L. Nelson. 1973. Principles and practices in plant analysis. In: Walsh, L.M. and J. D. Beaton (eds.). Soil testing and plant analysis. Soil. Sci. Soc. Amer. Madison, Wisconsin. USA.pag. 436.

Oliver, M.A. 1987. Geostatics and its application to soil science. Soil use and management. 3(1): 8-19.

Smith, R. F. 1962. Mineral analysis of plant tissues. Annual Rev. of Plant Physiol. 13:81-108.

Sumner, M. E. 1977a. Preliminary N,P,K, foliar diagnostic norms for wheat. Comm. Soil. Sci. Plant Anal. 8:149-67

----- . 1977b. Use of the DRIS system in foliar diagnosis of crops at high yield levels. C.S.S.P.A. 8: 251-68.

----- . 1982 The diagnosis and recommendation integrated system (DRIS) Seminar of Soil-Plant analyst. Council on soil testing and plant analysis. Anaheim CA. USA. 28 pp.

----- . 1985. The diagnosis and recommendation integrated system (DRIS) as a guide to orchard fertilization. Food & Fert. Tech Center Ext. Bull No 231.R.O.C.

Sumner, M. E., and E. R. Beaufils 1975 Diagnosis of the NPK requirements of sugarcane irrespective of plant age and season using Beaufils system (DRIS) Preliminary observations. Proc. S. A. Sug. Tech. Assoc. 49: 137-41.

Sumner, M. E. and F.C. Boswell. 1981. Alleviating nutrient stress ,In Arkin, G.F. and H.M. Taylor (editors) inc. Madison W. USA. pp 99 - 137.

Sumner, M. E. and M. P W. Farina. 1986. Phosphorus interactions with other nutrients and lime in field cropping system Adv. Soil Sci. 5: 201- 36.

Sumner, M. A., H.C. Boerzma and R. Isac. 1982. Differential genotypic sensitivity of soybeans to P-Zn-Cu imbalances. Proc 9th Int. Plant Nut. Coll. Warwick Univ. England. pag. 17-32.

Tisdale, S.L. y W.L. Nelson. 1982. Fertilidad de los suelos y fertilizantes. UTHEA, S.A. México. pag. 312-342.

Valdez, R. D. J.L. Chan y M. H. Pérez 1986.
 Diagnóstico foliar de N, K, Mg, Fe y Zn por
 DRIS para duraznero criollo de riego en
 Zacatecas. XI Congr. Nal. SOMEFI, A.C..
 pag 49-57.

----- 1989.

El sistema integrado de diagnóstico y
 recomendación. Tema didáctico en edición.
 Universidad Autónoma Chapingo. Unidad
 Regional de Zonas Aridas, México. pag 25.

Walworth, J. L. and M. E. Sumner. 1977a. Foliar
 diagnosis- A review. In: Tinker, B.
 P. (ed.). Advances in plant nutrition.
 Vol. III .Elsevier Pub. New York.

----- . 1977b. The

diagnosis and Recommendation Integrated
 System (DRIS). Advances in soil Science
 6:149-88

----- . 1986. The

use of DRIS in the generation norms of alfalfa crop.
 S.S.S.A.F. 8:123-29.

----- . 1987.

Generation of norms DRIS for alfalfa crop in two soils
 the northwest of USA. S.S.S.A.F. 11: 246-52.

Webster, R. and T. M. Burgess. 1984. Sampling
 and Bulking strategies for estimating soil
 properties in small regions. J. Soil Sci.
 35:127-140.

Zasoski, R. J., and R. G. Burau. 1977. A rapid
 nitric-perchloric acid digestion method for
 multi-elements tissue analysis. Comm.
 Soil Sci. Plant Anal 8(5):425-36.

APENDICE A

Cuadro No. A1. Estadística General para puntos cercanos de vecindad de Kriging Funcional de conductividad Eléctrica del Suelo.

```

=====
Sin transformar   Transformados Retrotransformación   D.S.
-----
Media            5.134                1.790                4.991
Varianza         1.870                .4878E-01           1.050
Dev Stand       1.367                .2209                1.025
Modelo del Semivariograma: Lineal
Para H(i) < A, Gamma(i)= C0+[(C-C0)/A]*H(i)
                > A, Gamma(i)= C
Donde C0 =      2.970700E-01
           C =      2.506860
           A =     201.642000
Radio Máximo =    381
Número de Vecinos =    11
-----

```

Cuadro No. A2. Estadística General Para puntos cercanos de vecindad de Kriging Funcional de Calcio del Suelo.

```

=====
Sin transformar   Transformados Retrotransformación   D.S.
-----
Media            482.9                6.176                483.0
Varianza         2862.                .1214E-01           2848.
Dev. Est..       53.50                .1102                53.37
Modelo del Semivariograma: Gaussiano
Gamma(i) = C0-(C-C0)*[1-EXP(-H(i)**2/(A/3**.5)**2)]
Donde C0 =      1.056900E-01
           C =      1.731300E-01
           Ao =     3450.780000
Radio Máximo=    95.2
Número de Vecinos=    20
-----

```

Cuadro No. A3 Estadística General Para puntos cercanos de vecindad de Kriging Puntual de Potasio del suelo.

```

=====
Sin transformar   Transformados   Retrotransformación
-----
Media:           35.47           3.476           36.25
Varianza:       268.6           .2824           410.4
Dev Est:        16.39           .5314           20.26
Modelo del Semivariograma: Lineal
Para H(i) < A, Gamma(i) = C0 + [(C-C0)/A]*H(i)
                > A, Gamma(i) = C
                Donde C0 = 1.373500E-02
                   C = 4.822900E-01
                   A = 273.535000
                Radio Máximo = 381
                Número de Vecinos = 11
-----

```

Cuadro No. A4. Estadística General Para puntos cercanos de vecindad de Kriging Puntual de Fósforo del Suelo.

```

=====
Sin transformar   Transformados   Retrotransformación   D.S.
-----
Media:           5.916           1.874           5.966
Varianza:       5.279           .1345           5.039
Dev estd:       2.298           .3667           2.245
Modelo del Semivariograma: Lineal
Para H(i) < A, Gamma(i) = C0 + [(C-C0)/A]*H(i)
                > A, Gamma(i) = C
                Donde C0 = 8.175000E-02
                   C = 1.976900E-01
                   A = 373.980000
                Radio Máximo = 381
                No de vecinos = 11
-----

```


Cuadro No. A7. Estadística General Para puntos cercanos de vecindad de Kriging Puntual de Sodio de Plantas.

	Sin transformar	Transformados	Retrotransformación
Media:	.8625E-01	.8049E-01	.8629E-01
Varianza	.5663E-02	.4550E-02	.3392E-04
Des.Est	.7525E-01	.6745E-01	.5824E-02
Modelo de Semivariograma: Exponencial			
$\text{Gamma}(i) = C0 + (C - C0) * [1 - \text{EXP}(-H(i)/A0)]$			
Donde C0 =	1.764300E-03		
C =	7.671700E-03		
A0 =	241.509000		
Radio máximo =	381		
No. de vecinos =	2		

Cuadro No. A8. Estadística General Para puntos cercanos de vecindad de Kriging Puntual de Magnesio de Plantas.

	Sin transformar	Transformados	Retrotransformación
Media:	.3319	.2827	.3321
Varianza:	.1397E-01	.7986E-02	.8831E-03
Des.Est:	.1182	.8936E-01	.2972E-01
Modelo de semivariograma: Lineal			
for $H(i) < A$, $\text{Gamma}(i) = C0 + [(C - C0)/A] * H(i)$			
> A , $\text{Gamma}(i) = C$			
Donde C0 =	6.023100E-03		
C =	9.775000E-03		
Radio máximo =	381		
No. de vecinos =	2		

Cuadro No. A9. Estadística General Para puntos cercanos de vecindad de Kriging Funcional de Manganeso en Plantas.

```

=====
Sin transformar   Transformados   Retrotransformación
Media:           57.69           4.030           57.47
Varianza         396.8           .7657E-01       264.8
Des.Est         19.92           .2767           16.27
Modelo de Semivariograma: Lineal
for H(i) < A, Gamma(i)= C0+[(C-C0)/A]*H(i)
  > A, Gamma(i)= C
      Donde C0 =      6.599400E-02
            C =      1.012500E-01
            A =      502.634000
      Radio máximo =      381
      No. de Vecinos =      2
-----

```

Cuadro No. A10. Estadística General Para puntos cercanos de vecindad de Kriging Funcional de Calcio en Plantas.

```

=====
Sin transformar   Transformados   Retrotransformación
Media:           .9716           .5802           .9726
Varianza         .8170           .1984           .2071
Des.Est         .9039           .4454           .4551
Modelo de Semivariograma: Gausiano
Gamma(i) = C0-(C-C0)*[1-EXP(-H(i)**2/(A/3**.5)**2)]
      Donde C0 =      1.056900E-02
            C =      1.731300E-01
            Ao =      3450.780000
      Radio máximo =      95.2
      No. de vecinos =      15
-----

```

Cuadro No. A11. Estadística General Para puntos cercanos de vecindad de Kriging Punctual de Zinc de Plantas.

```

=====
Sin transformar   Transformados   Retrotransformación
-----
Media:           53.03,         3.960           53.12
Varianza:        178.5          .6283E-01       182.4
Des.Est :        13.36          .2507           13.50
Modelo de Semivariograma: Lineal
Para  $H(i) < A$ ,  $\Gamma(i) = C0 + [(C-C0)/A]*H(i)$ 
  >  $A$ ,  $\Gamma(i) = C$ 
      Donde  $C0 = 5.209100E-02$ 
             $C = 6.755000E-02$ 
             $A = 224.003000$ 
      Radio máximo = 381
      No. de vecinos = 2
-----

```

Cuadro No. A12 Estadística General Para puntos cercanos de vecindad de Kriging Punctual de Hierro en Plantas.

```

=====
Sin transformar   Transformados   Retrotransformación
-----
Media:           579.7          5.989           568.2
Varianza         .3076E+06       .7113           .3483E+06
Des.Est:         554.6          .8434           590.2
Modelo de Semivariograma: Exponencial
 $\Gamma(i) = C0 + (C-C0)*[1-EXP(-H(i)/Ao)]$ 
      Donde  $C0 = 5.393700E-02$ 
             $C = 9.090300E-01$ 
             $Ao = 90.323500$ 
      Radio máximo = 381
      No. de vecinos = 2
-----

```

Cuadro No. A13. Interpolación de Kriging de la Conductividad Eléctrica del Suelo.

X	Y	Z (E)	X	Y	Z (E)
.0000	.0000	6.2856	50.00	.0000	6.2856
.0000	50.00	9.1512	50.00	50.00	7.5154
.0000	100.0	7.1093	50.00	100.0	7.5154
.0000	150.0	6.2856	50.00	150.0	7.1093
.0000	200.0	7.1093	50.00	200.0	5.4735
.0000	250.0	5.0675	50.00	250.0	4.0814
.0000	300.0	4.8935	50.00	300.0	4.2438
.0000	350.0	4.6498	50.00	350.0	3.8378
100.0	.0000	7.5154	150.0	.0000	5.3923
100.0	50.00	6.7033	150.0	50.00	5.8796
100.0	100.0	7.1093	150.0	100.0	6.3668
100.0	150.0	6.2856	150.0	150.0	8.3391
100.0	200.0	9.1512	150.0	200.0	9.2904
100.0	250.0	4.4874	150.0	250.0	4.4874
100.0	300.0	4.6498	150.0	300.0	4.7311
100.0	350.0	4.6498	150.0	350.0	4.0230

=====

Cuadro No. A14. Interpolación Kriging de Calcio del Suelo

X	Y	Z (E)	X	Y	Z (E)
.0000	.0000	605.00	50.00	.0000	6.3026
.0000	50.00	6.2166	50.00	50.00	6.2653
.0000	100.0	6.2265	50.00	100.0	6.1862
.0000	150.0	6.1549	50.00	150.0	6.1442
.0000	200.0	5.9940	50.00	200.0	6.0186
.0000	250.0	6.0776	50.00	250.0	6.1675
.0000	300.0	6.1549	50.00	300.0	6.2480
.0000	350.0	467.00	50.00	350.0	5.9349
100.0	.0000	6.3818	150.0	.0000	410.00
100.0	50.00	6.2166	150.0	50.00	6.1115
100.0	100.0	6.1549	150.0	100.0	6.0661
100.0	150.0	6.2653	150.0	150.0	6.3297
100.0	200.0	6.3297	150.0	200.0	6.1738
100.0	250.0	6.1759	150.0	250.0	6.0958
100.0	300.0	6.1738	150.0	300.0	6.1654
100.0	350.0	6.2442	150.0	350.0	436.00

=====

Cuadro No. A15. Interpolación de Kriging para Potasio del Suelo.

X	Y	Z (E)	X	Y	Z (E)
.0000	.0000	68.475	50.00	.0000	44.310
.0000	50.00	49.345	50.00	50.00	42.296
.0000	100.0	54.379	50.00	100.0	46.324
.0000	150.0	38.269	50.00	150.0	49.345
.0000	200.0	46.324	50.00	200.0	30.214
.0000	250.0	22.158	50.00	250.0	11.083
.0000	300.0	16.117	50.00	300.0	9.0689
.0000	350.0	10.076	50.00	350.0	13.096
100.0	.0000	40.283	150.0	.0000	31.221
100.0	50.00	31.221	150.0	50.00	35.248
100.0	100.0	60.420	150.0	100.0	37.262
100.0	150.0	46.324	150.0	150.0	63.441
100.0	200.0	47.331	150.0	200.0	25.179
100.0	250.0	23.165	150.0	250.0	22.158
100.0	300.0	26.186	150.0	300.0	59.413
100.0	350.0	25.179	150.0	350.0	25.944

Cuadro No. A16. Interpolación Kriging de Fósforo en el suelo.

X	Y	Z (E)	X	Y	Z (E)
.0000	.0000	11.459	50.00	.0000	3.6148
.0000	50.00	2.9898	50.00	50.00	5.3337
.0000	100.0	5.6150	50.00	100.0	3.1461
.0000	150.0	7.3755	50.00	150.0	6.4379
.0000	200.0	3.9274	50.00	200.0	6.2817
.0000	250.0	5.0212	50.00	250.0	3.6148
.0000	300.0	5.6462	50.00	300.0	4.5524
.0000	350.0	2.3648	50.00	350.0	1.5626
100.0	.0000	5.3337	150.0	.0000	4.7087
100.0	50.00	4.5524	150.0	50.00	6.5942
100.0	100.0	7.0630	150.0	100.0	7.5317
100.0	150.0	6.7504	150.0	150.0	6.9067
100.0	200.0	7.8442	150.0	200.0	8.3130
100.0	250.0	9.7402	150.0	250.0	9.8964
100.0	300.0	8.9381	150.0	300.0	7.8442
100.0	350.0	9.8964	150.0	350.0	2.1211

Cuadro No. A17. Interpolación Kriging de Magnesio del suelo.

X	Y	Z (E)	X	Y	Z (E)
.0000	.0000	174.88	50.00	.0000	162.82
.0000	50.00	181.92	50.00	50.00	171.87
.0000	100.0	168.85	50.00	100.0	175.89
.0000	150.0	153.78	50.00	150.0	159.81
.0000	200.0	141.72	50.00	200.0	127.65
.0000	250.0	99.505	50.00	250.0	84.429
.0000	300.0	94.480	50.00	300.0	105.54
.0000	350.0	118.60	50.00	350.0	81.414
100.0	.0000	188.95	150.0	.0000	124.63
100.0	50.00	168.85	150.0	50.00	127.65
100.0	100.0	144.73	150.0	100.0	145.74
100.0	150.0	167.85	150.0	150.0	186.94
100.0	200.0	205.04	150.0	200.0	139.71
100.0	250.0	123.63	150.0	250.0	129.66
100.0	300.0	132.67	150.0	300.0	131.67
100.0	350.0	144.73	150.0	350.0	112.57

Cuadro No. A18. Interpolación Kriging de Sodio del suelo.

X	Y	Z (E)	X	Y	Z (E)
.0000	.0000	515.06	50.00	.0000	510.01
.0000	50.00	641.30	50.00	50.00	570.60
.0000	100.0	520.11	50.00	100.0	565.55
.0000	150.0	459.51	50.00	150.0	565.55
.0000	200.0	454.47	50.00	200.0	358.52
.0000	250.0	257.53	50.00	250.0	211.08
.0000	300.0	308.03	50.00	300.0	272.68
.0000	350.0	334.29	50.00	350.0	237.34
100.0	.0000	590.80	150.0	.0000	318.13
100.0	50.00	504.96	150.0	50.00	353.48
100.0	100.0	499.91	150.0	100.0	388.82
100.0	150.0	515.06	150.0	150.0	510.01
100.0	200.0	701.89	150.0	200.0	274.70
100.0	250.0	297.93	150.0	250.0	300.96
100.0	300.0	320.15	150.0	300.0	388.82
100.0	350.0	324.19	150.0	350.0	345.85

Cuadro No. A19. Interpolación de Kriging de Sodio en plantas.

X	Y	Z (E)	X	Y	Z (E)
.0000	.0000	.16102	50.00	.0000	.24109
.0000	50.00	.30115	50.00	50.00	.14842
.0000	100.0	.08095	50.00	100.0	.18104
.0000	150.0	.12099	50.00	150.0	.08095
.0000	200.0	.12099	50.00	200.0	.09096
.0000	250.0	.14101	50.00	250.0	.09531
.0000	300.0	.06093	50.00	300.0	.14101
.0000	350.0	.16102	50.00	350.0	.18104
100.0	.0000	.01089	150.0	.0000	.03090
100.0	50.00	.02090	150.0	50.00	.01089
100.0	100.0	.08095	150.0	100.0	.05092
100.0	150.0	.01089	150.0	150.0	.01089
100.0	200.0	.05092	150.0	200.0	.08095
100.0	250.0	.04091	150.0	250.0	.01089
100.0	300.0	.01089	150.0	300.0	.02090
100.0	350.0	.01089	150.0	350.0	.01089

Cuadro No. A20 Interpolación de Kriging de Magnesio en plantas.

X	Y	Z (E)	X	Y	Z (E)
.0000	.0000	.62489	50.00	.0000	.36410
.0000	50.00	.46440	50.00	50.00	.39204
.0000	100.0	.42428	50.00	100.0	.58477
.0000	150.0	.36410	50.00	150.0	.36410
.0000	200.0	.38416	50.00	200.0	.32398
.0000	250.0	.36410	50.00	250.0	.29267
.0000	300.0	.23371	50.00	300.0	.44434
.0000	350.0	.44434	50.00	350.0	.46440
100.0	.0000	.25377	150.0	.0000	.27383
100.0	50.00	.32398	150.0	50.00	.27383
100.0	100.0	.23371	150.0	100.0	.25377
100.0	150.0	.30392	150.0	150.0	.29389
100.0	200.0	.26380	150.0	200.0	.22368
100.0	250.0	.34404	150.0	250.0	.23371
100.0	300.0	.23046	150.0	300.0	.21365
100.0	350.0	.27383	150.0	350.0	.29389

Cuadro No. A21 Interpolación de Kriging de Manganeso en plantas.

X	Y	Z (E)	X	Y	Z (E)
.0000	.0000	136.46	50.00	.0000	39.308
.0000	50.00	104.42	50.00	50.00	4.0775
.0000	100.0	70.315	50.00	100.0	105.46
.0000	150.0	39.308	50.00	150.0	66.181
.0000	200.0	68.248	50.00	200.0	46.543
.0000	250.0	51.711	50.00	250.0	38.067
.0000	300.0	54.812	50.00	300.0	66.181
.0000	350.0	62.046	50.00	350.0	62.046
100.0	.0000	51.711	150.0	.0000	47.577
100.0	50.00	56.879	150.0	50.00	58.946
100.0	100.0	56.879	150.0	100.0	49.644
100.0	150.0	56.879	150.0	150.0	56.879
100.0	200.0	49.644	150.0	200.0	61.013
100.0	250.0	44.476	150.0	250.0	53.778
100.0	300.0	36.208	150.0	300.0	45.510
100.0	350.0	52.744	150.0	350.0	51.711

Cuadro No. A22. Interpolación de Kriging de Calcio en plantas.

X	Y	Z (E)	X	Y	Z (E)
.0000	.0000	2.7397	50.00	.0000	1.6339
.0000	50.00	.45768	50.00	50.00	1.1184
.0000	100.0	2.1365	50.00	100.0	2.3778
.0000	150.0	1.7947	50.00	150.0	2.0762
.0000	200.0	1.6138	50.00	200.0	.46774
.0000	250.0	1.6540	50.00	250.0	1.1756
.0000	300.0	.35715	50.00	300.0	2.0762
.0000	350.0	1.9958	50.00	350.0	1.9958
100.0	.0000	.23652	150.0	.0000	.24657
100.0	50.00	.26668	150.0	50.00	.29684
100.0	100.0	.22646	150.0	100.0	.22646
100.0	150.0	.25662	150.0	150.0	.19631
100.0	200.0	.20636	150.0	200.0	.23652
100.0	250.0	.40742	150.0	250.0	.19631
100.0	300.0	.15351	150.0	300.0	.21641
100.0	350.0	.23652	150.0	350.0	.24657

Cuadro No. A23 Interpolación de Kriging de Zinc en plantas.

X	Y	Z (E)	X	Y	Z (E)
.0000	.0000	43.135	50.00	.0000	34.924
.0000	50.00	55.451	50.00	50.00	36.000
.0000	100.0	39.029	50.00	100.0	45.187
.0000	150.0	43.135	50.00	150.0	30.818
.0000	200.0	57.504	50.00	200.0	53.399
.0000	250.0	43.135	50.00	250.0	53.535
.0000	300.0	70.847	50.00	300.0	45.187
.0000	350.0	55.451	50.00	350.0	51.346
100.0	.0000	53.399	150.0	.0000	54.425
100.0	50.00	60.583	150.0	50.00	51.346
100.0	100.0	58.530	150.0	100.0	54.425
100.0	150.0	66.742	150.0	150.0	55.451
100.0	200.0	67.768	150.0	200.0	63.662
100.0	250.0	90.349	150.0	250.0	66.742
100.0	300.0	51.346	150.0	300.0	61.610
100.0	350.0	56.478	150.0	350.0	87.269

Cuadro No. A24. Interpolación de Kriging de Hierro en plantas

X	Y	Z (E)	X	Y	Z (E)
.0000	.0000	1894.4	50.00	.0000	513.70
.0000	50.00	1941.7	50.00	50.00	531.60
.0000	100.0	690.40	50.00	100.0	1974.6
.0000	150.0	312.34	50.00	150.0	273.30
.0000	200.0	971.89	50.00	200.0	481.85
.0000	250.0	934.90	50.00	250.0	450.36
.0000	300.0	561.98	50.00	300.0	1109.5
.0000	350.0	1440.4	50.00	350.0	1417.8
100.0	.0000	190.08	150.0	.0000	222.96
100.0	50.00	212.69	150.0	50.00	189.06
100.0	100.0	195.22	150.0	100.0	267.13
100.0	150.0	195.22	150.0	150.0	218.85
100.0	200.0	221.93	150.0	200.0	202.41
100.0	250.0	182.89	150.0	250.0	207.55
100.0	300.0	177.76	150.0	300.0	194.19
100.0	350.0	195.22	150.0	350.0	174.67

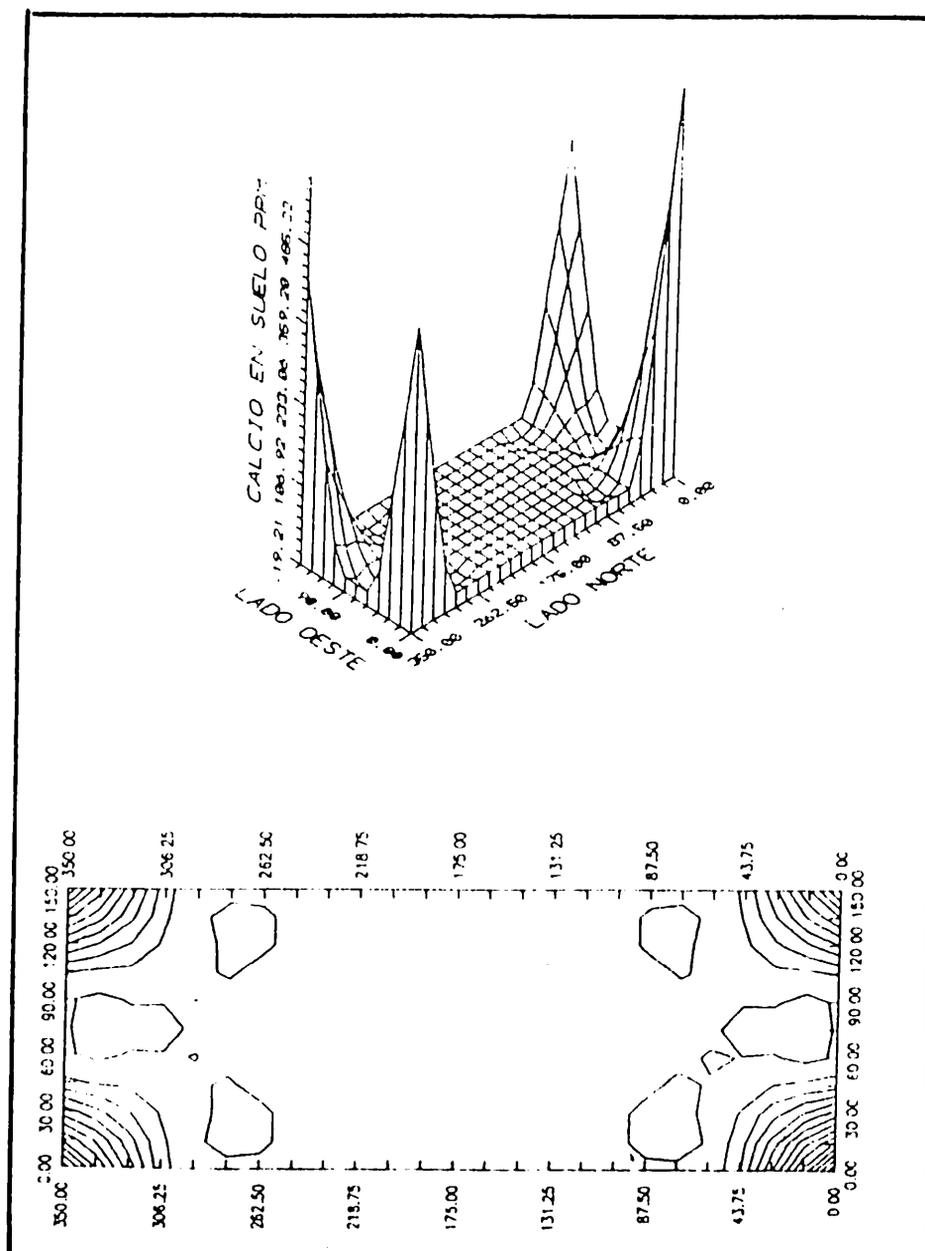


Fig. No. 1 A. Variación espacial en tres y dos planos - de Calcio en el suelo.

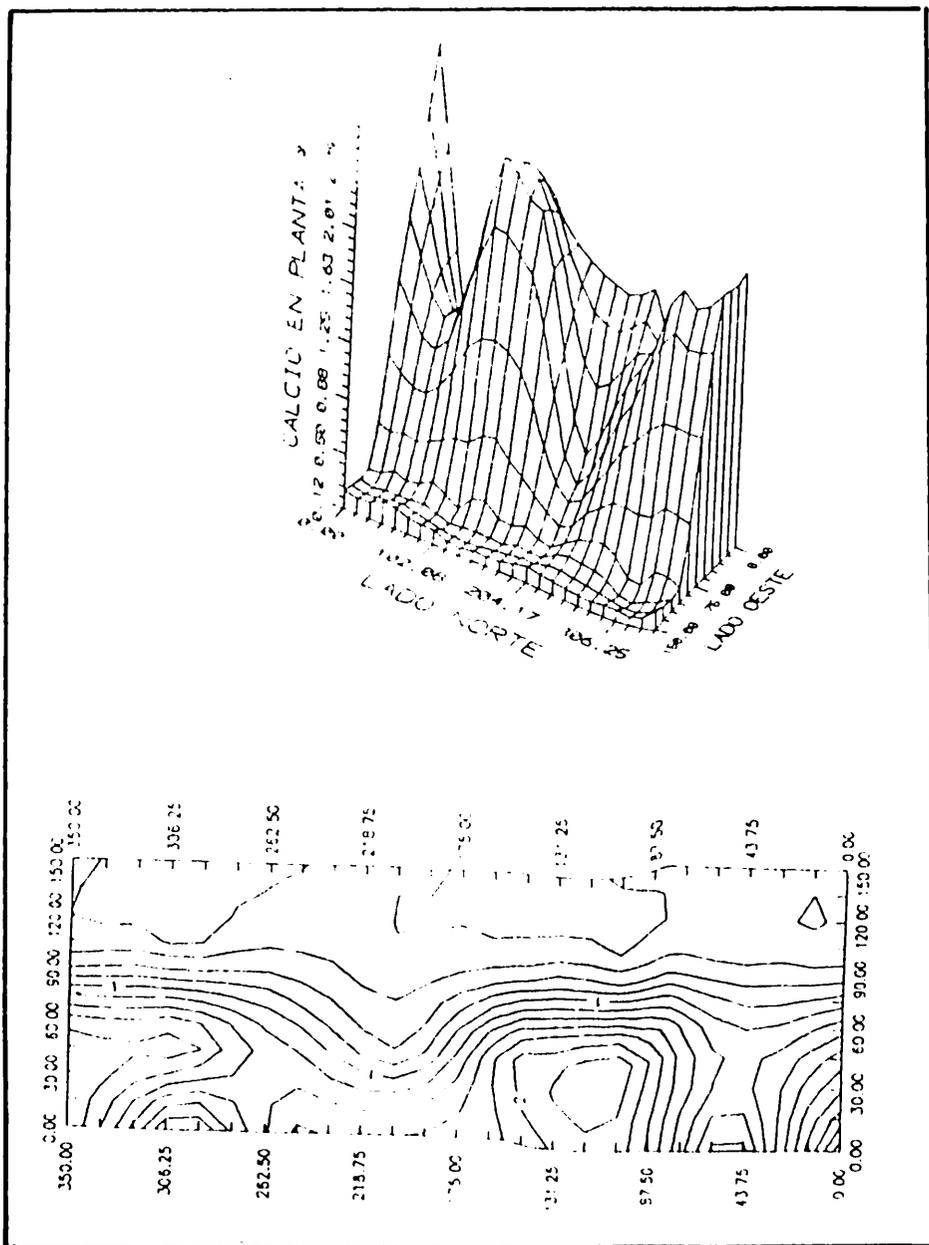


Fig. No. 2 A. Variación espacial en tres y dos planos - de Calcio en la planta.

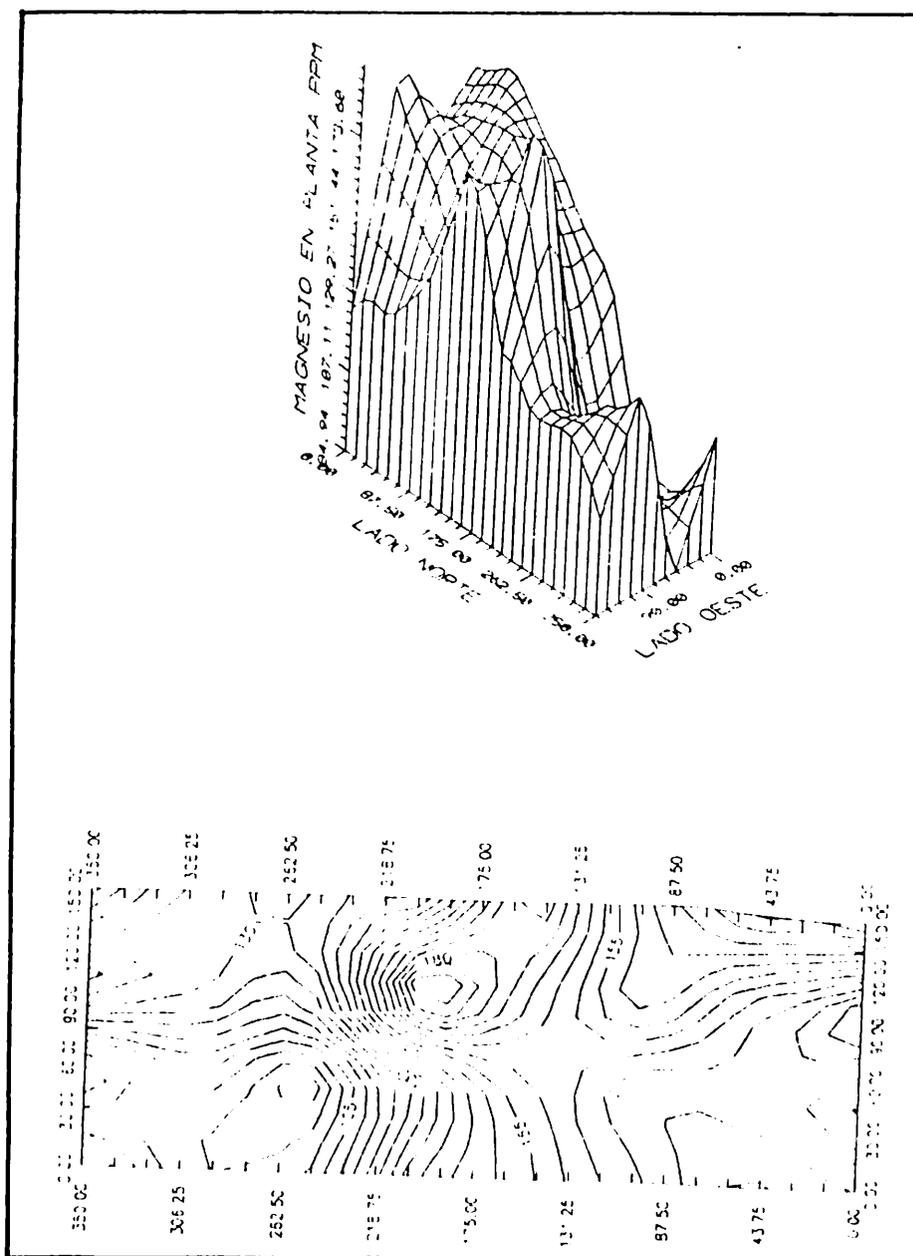


Fig. No. 3 A. Variación espacial en tres y dos planos de Magnesio en planta.

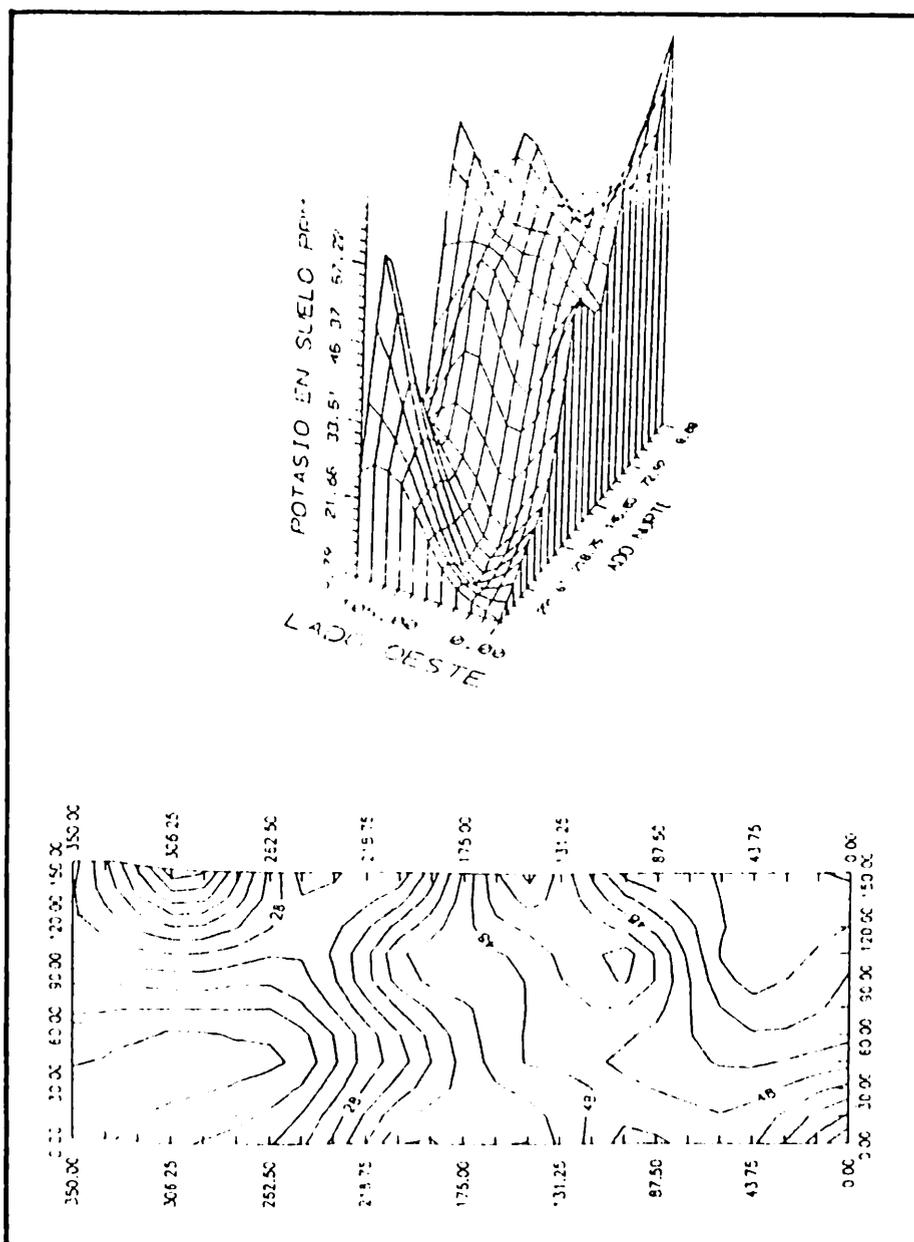


Fig. No. 4 A Variación espacial en tres y dos planos de Potasio en el suelo.

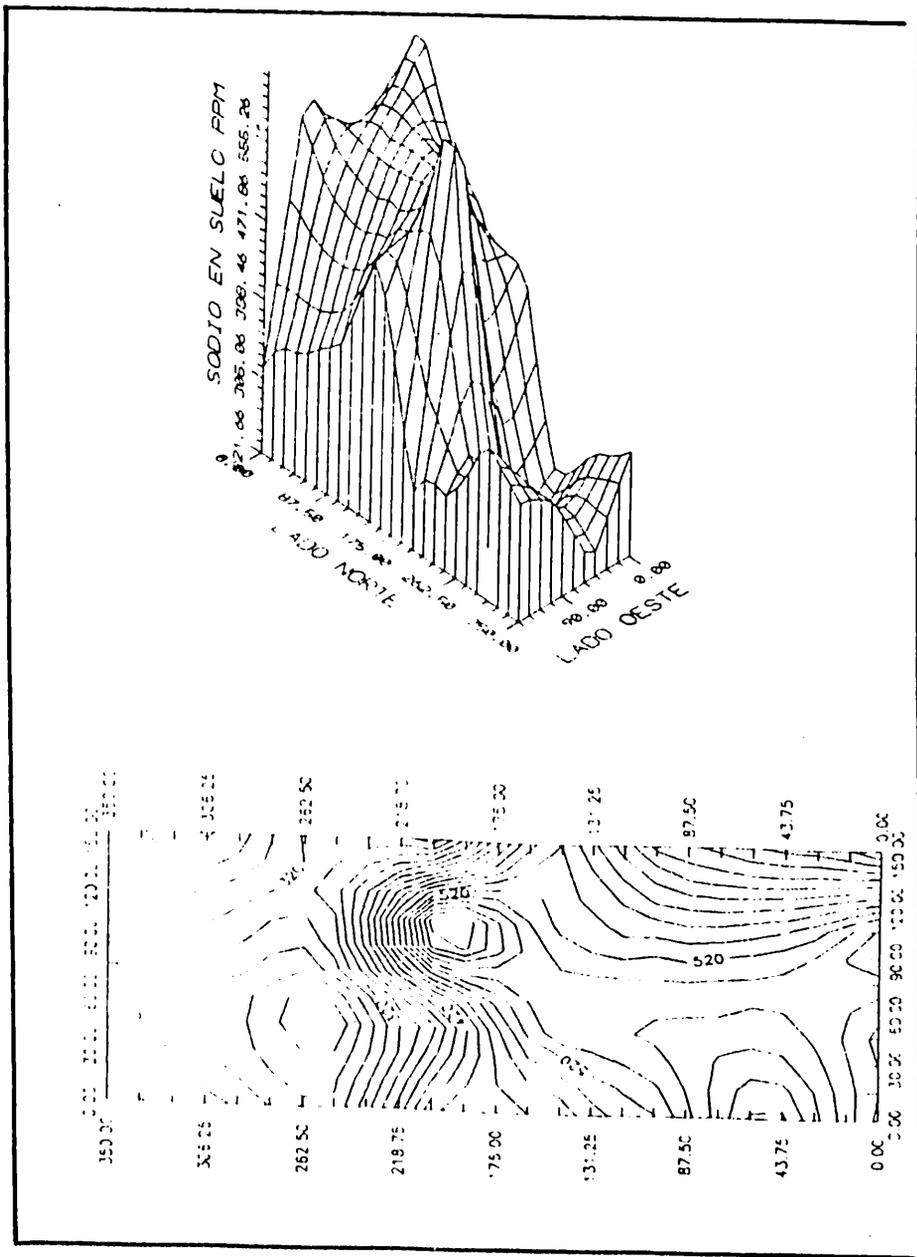


Fig. No. 5. A. Variación espacial en tres y dos planos de Sodio en el suelo.

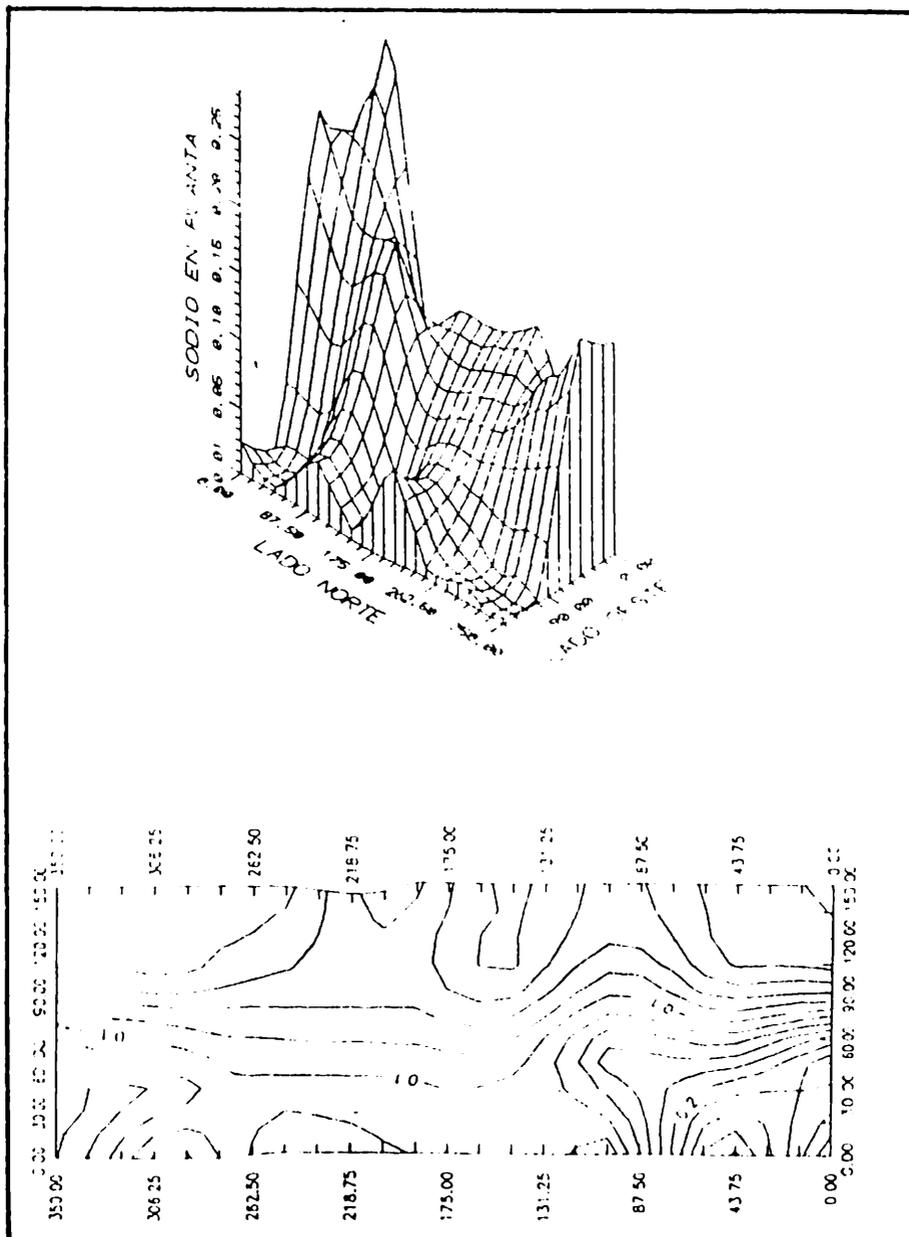


Fig. No. 6 A. Variación espacial en tres y dos planos de Sodio en planta.

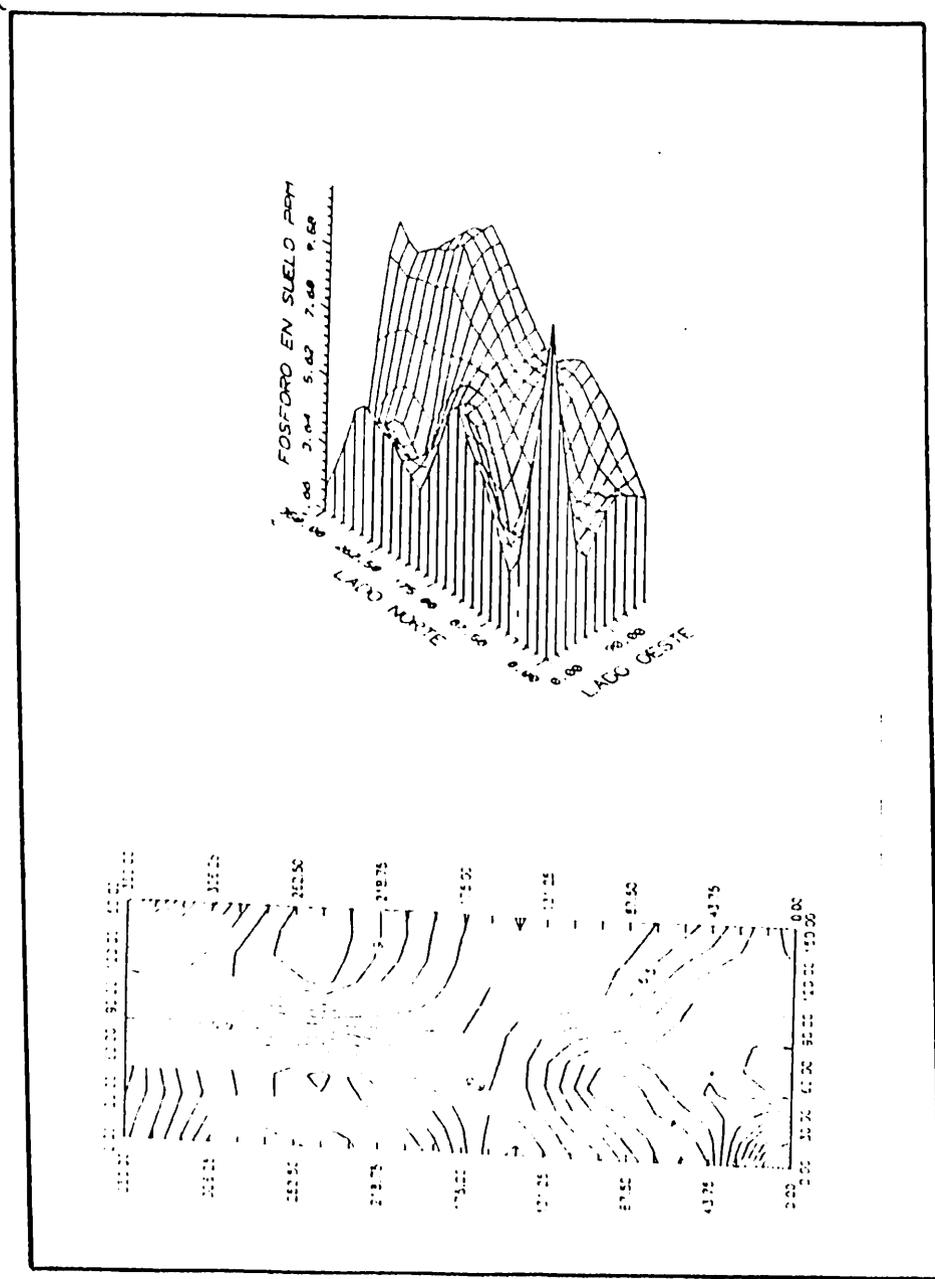


Fig. No. 7 A. Variación espacial en tres y dos planos de Potasio en el suelo.

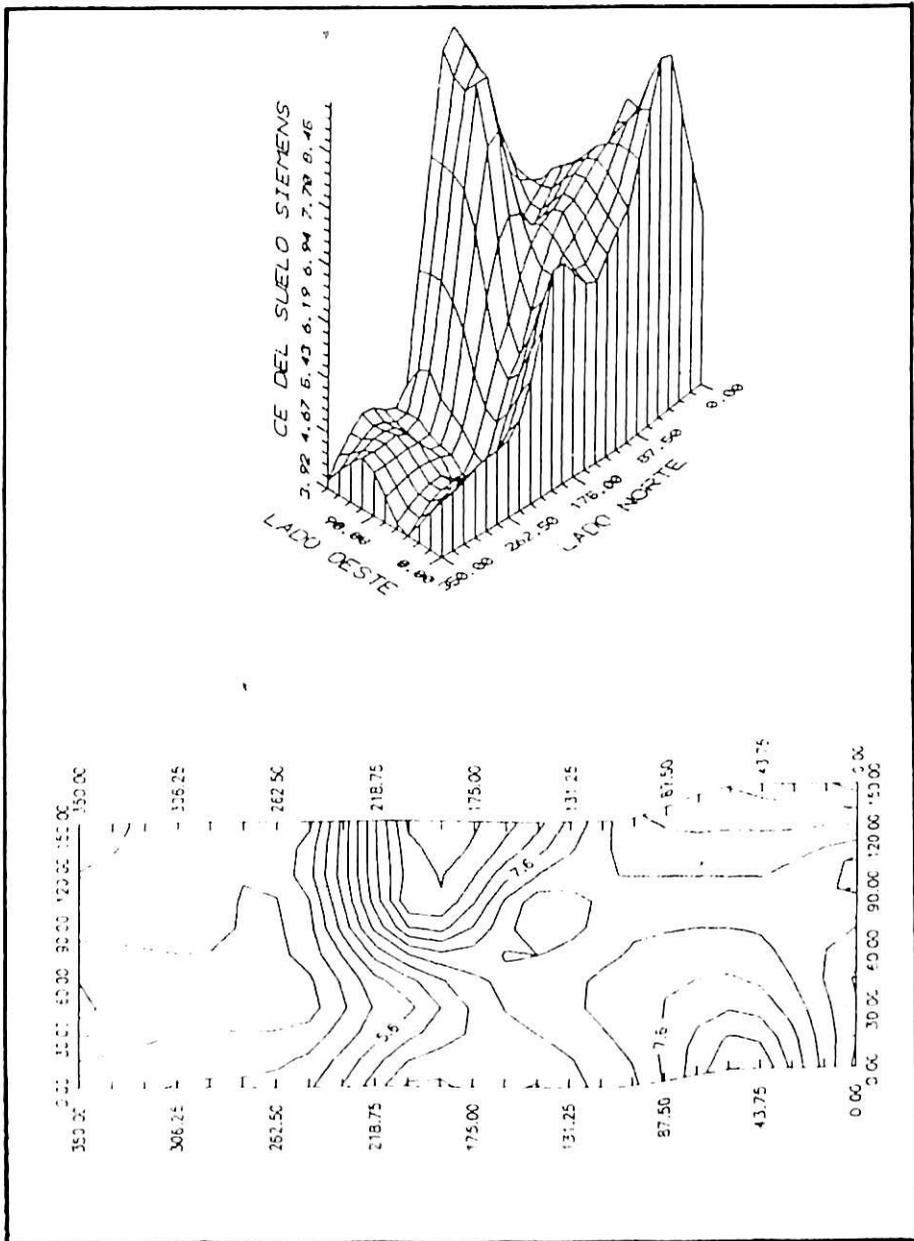


Fig. No. 8 A. Variación espacial en tres y dos planos de Conductividad Eléctrica del suelo.

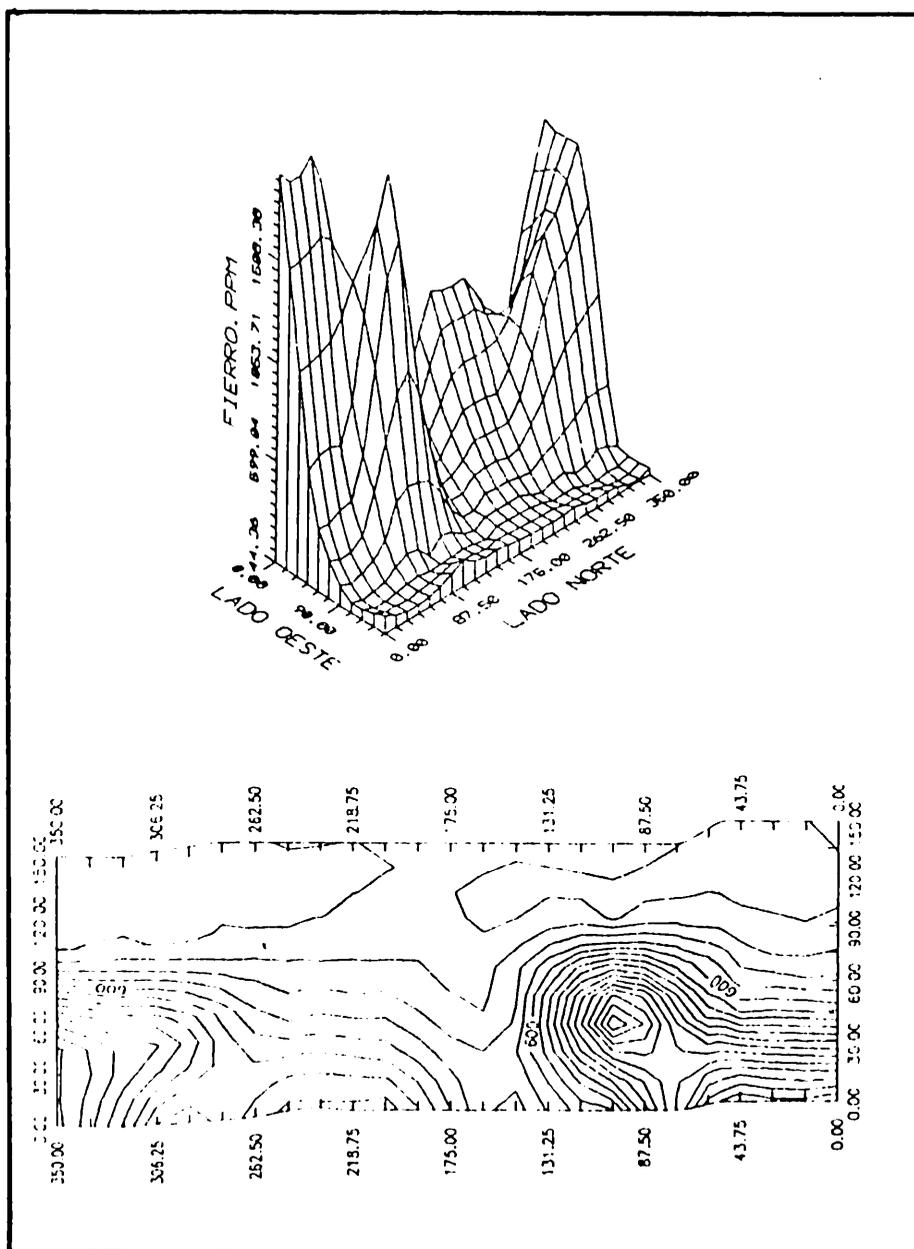


Fig. No. 9 A.. Variación espacial en tres y dos planos de Hierro en planta.

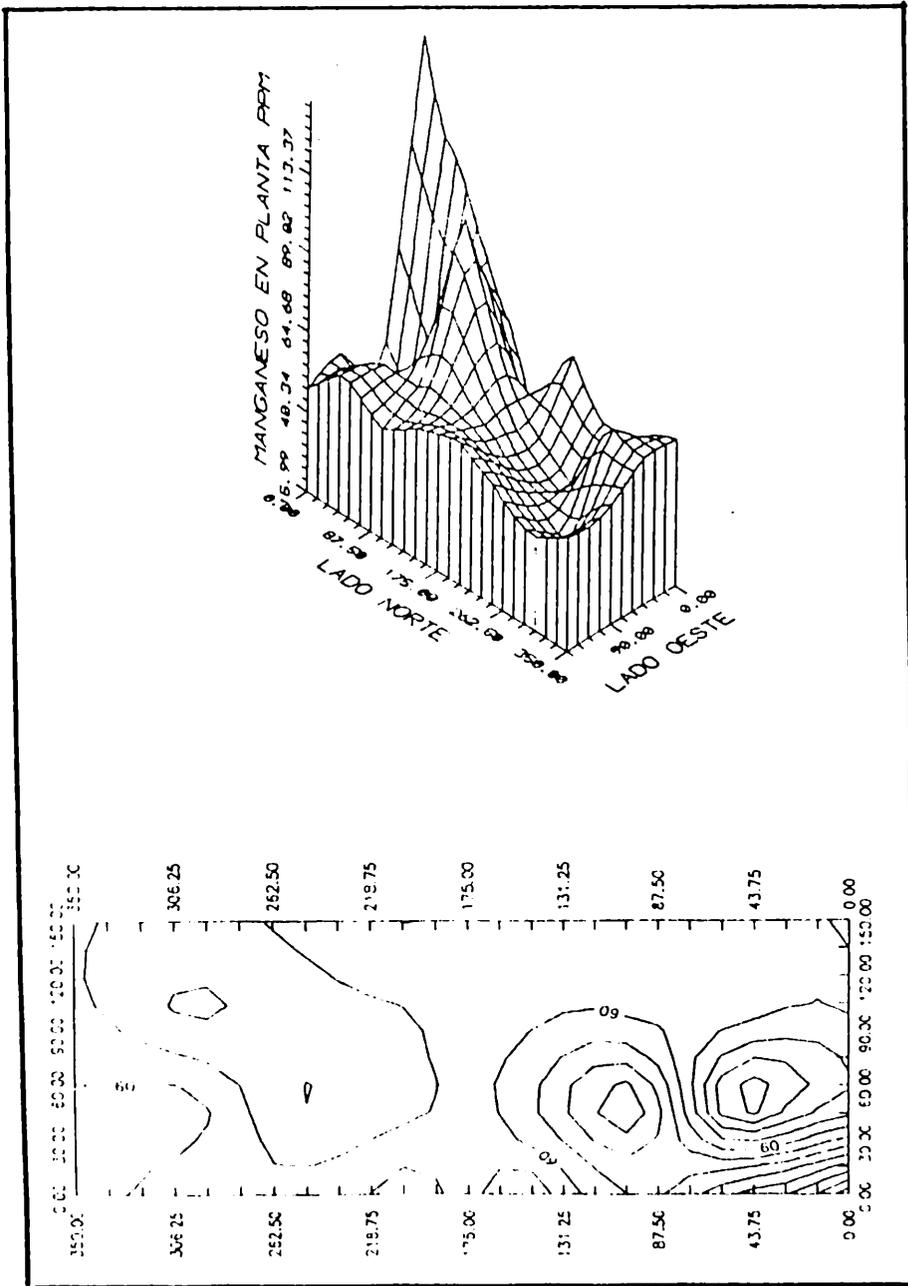


Fig. No. 10 A. Variación espacial en tres y dos planos de Manganeso en Planta.

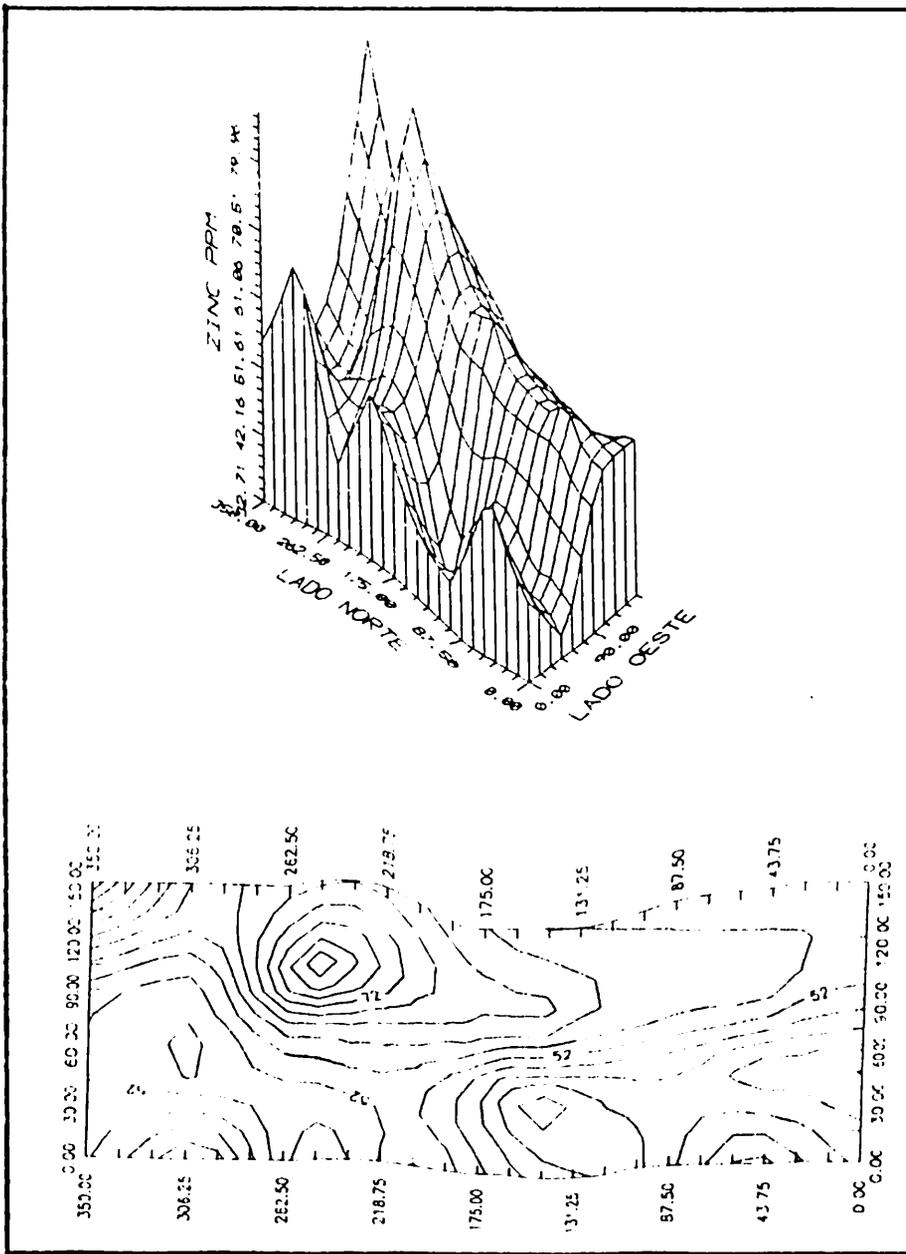


Fig. No. 11 A. Variación espacial en tres y dos planos de Zinc en planta.