

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE AGRONOMIA
SUBDIRECCION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



ANALISIS ESTOCASTICO ESPACIAL DE PROCESOS
EDAFICOS Y DE PLANTAS EN Zea mays L.

POR

RICARDO DAVID VALDEZ CEPEDA

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS AGRICOLAS
CON ESPECIALIDAD EN AGUA-SUELO

MARIN, N. L., MEXICO

FEBRERO DE 1997.

TD
SB191
.M2
V3
c.1



1080071710

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE AGRONOMIA

SUBDIRECCION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



ANALISIS ESTOCASTICO ESPACIAL DE PROCESOS
EDAFICOS Y DE PLANTAS EN Zea mays L.

POR

RICARDO DAVID VALDEZ CEPEDA

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS AGRICOLAS
CON ESPECIALIDAD EN AGUA-SUELO

MARIN, N. L., MEXICO

FEBRERO DE 1997

BIBLIOTECA Agronomía U.A.N.L.

12771

70
SB191
• 42
V3



60
57

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE AGRONOMIA

SUBDIRECCION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

**Análisis Estocástico Espacial de Procesos Edáficos
y de Plantas en *Zea mays* L.**

Por

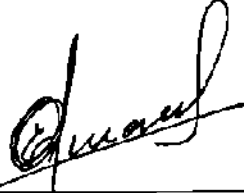
Ricardo David Valdez Cepeda

**Como requisito para obtener el grado de
DOCTOR EN CIENCIAS AGRICOLAS
con Especialidad en Agua-Suelo**

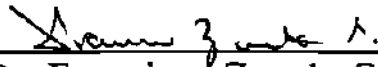
Marín, N. L., México. Febrero de 1997

Análisis Estocástico Espacial de Procesos Edáficos
y de Plantas en *Zea mays* L.

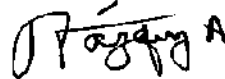
Aprobación de la Tesis



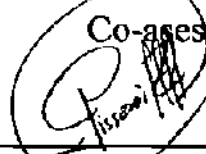
Dr. Emilio Olivares Sáenz
Asesor Principal



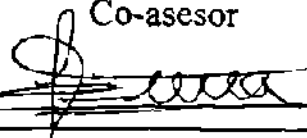
Dr. Francisco Zavala García
Co-asesor



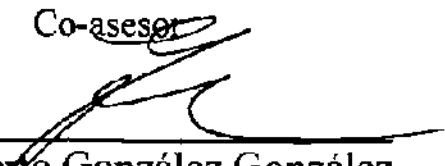
Dr. Rigoberto E. Vázquez Alvarado
Co-asesor



Dr. Juan E. Pissani Zuñiga
Co-asesor



Dr. Maximino Luna Flores
Co-asesor



Dr. Rigoberto González González
Subdirector de Estudios de Postgrado de la Facultad de Agronomía

Voir, savoir faire et faire savoir

Ver, saber hacerlo y hacerlo saber

DEDICATORIA

- A mi esposa, Claudia Gabriela, con amor inconmensurable.
- A mis hijos, Claudia Deirdré, David Ricardo y Gabriela, con amor eterno.
- A mis padres, Rosa María y Crispín, con amor inmarcesible.
- A mis suegros, María Luisa y Baltazar, con cariño y respeto. Por su apoyo incondicional, y el amor y la protección que siempre le han brindado a mis hijos.
- A mis Abuelitos, Otilia y Cirilo, con el amor de siempre. Por su nobleza inmanente.
- A mi hermana, María de Lourdes, con admiración por su loable atención hacia nuestros padres.
- A mis hermanas(os), cuñadas(os) y sobrinas(os).

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Emilio Olivares Sáenz, por la dirección de este trabajo de tesis y haberme permitido hacer otros trabajos de investigación a su lado.

Al Dr. Francisco Zavala García, por su entusiasta participación y el interés mostrado en el trabajo de tesis.

Al Dr. Rigoberto E. Vázquez Alvarado, por su colaboración en la asesoría durante el desarrollo de la investigación y sus invaluable consejos.

Al Dr. Juan F. Pissani Zuñiga, por sus oportunos comentarios y sugerencias para afinar el trabajo de tesis.

Al Dr. Maximino Luna Flores, por la asesoría brindada y el siempre incondicional apoyo en mi formación como investigador.

A la familia Olivares, en especial al Ing. José Olivares Sáenz, y al personal del rancho, por su participación en el establecimiento de los experimentos y el manejo del cultivo.

A los amigos y compañeros estudiantes de postgrado: Ricardo Sánchez, Ramón Rodríguez, Francisco Zamora, Luis Carlos Alvarado, Trinidad Moncada, Wilder Camacho, Clemente Gallegos, Neftalí Gómez y Carlos Longoria. Por su participación durante la fase de trabajo de campo.

Al Dr. Enrique Salazar Sosa y al personal del Laboratorio de Uso y Manejo del Agua de la Facultad de Agricultura y Zootecnia de la Universidad Juárez del Estado de Durango, por su colaboración en cuanto a los análisis de suelo y planta.

A José Dimas López Martínez y Enrique Martínez Rubín de Celis, por brindarme incondicionalmente su amistad durante la etapa de mi vida dedicada a superación académica.

A la Universidad Autónoma Chapingo, por permitirme hacer estudios de postgrado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por apoyarme con la Beca-Crédito para obtener el grado de Doctor en Ciencias.

Al personal de la Subdirección de Estudios de Postgrado y del Laboratorio de Suelos de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León, por el apoyo otorgado.

Al Fondo de Aseguramiento Agrícola (PROAGRO) de Díaz Ordaz, Tamps., por el apoyo y el interés mostrado en la investigación.

A los Drs. José Luis Chan Castañeda, Ricardo H. Lira Saldívar y Arturo Gallegos del Tejo, por haberme brindado su confianza y la fortuna de ser su discípulo durante mi formación como investigador.

A la Familia González Martínez, por facilitarme su casa en Marín, N. L.

A Víctor H. Álvarez García, Rafael Álvarez García, Leonel García Compeán, Miguel A. Barrera Ramírez y sus respectivas familias, por la amistad sincera e infatigable de que gozamos.

A mis compañeros de trabajo en el Centro Regional Universitario Centro Norte de la Universidad Autónoma Chapingo; especialmente a Clemente Gallegos, Fidel Blanco, R. René Ruiz y Olga Aboytes, por su sincera confianza.

Al maestro y amigo Javier de Jesús Cortés Bracho, a José Luis Carlos Rimoldi, Wilder Camacho y Nydia del Rivero, por la envidiable amistad que hemos cultivado.

RESUMEN AUTOBIOGRAFICO

Ricardo David Valdez Cepeda

Candidato para el grado de Doctor en Ciencias Agrícolas con Especialidad en Agua-Suelo.

Tesis:

Análisis Estocástico Espacial de Procesos Edáficos y de Plantas en *Zea mays* L.

Áreas de Estudio:

Agronomía (Fertilidad de Suelos y Nutrición Vegetal). Estadística Espacial.

Biografía

Datos Personales:

Nacido el 30 de agosto de 1960 en Durango, Dgo. Hijo de Rosa María Cepeda Cepeda y Crispín Valdez Cháirez.

Educación:

- i). Egresado de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro como Ingeniero Agrónomo en Suelos, en diciembre de 1982.
- ii). Egresado del Instituto Tecnológico Agropecuario No. 10 como Maestro en Ciencias en Administración de los Recursos Agua-Suelo, Recuperación de Suelos; en junio de 1989.
- iii). Diplomado en Meteorología Agrícola por la Ben Gurion University, Israel; en diciembre de 1989.

Experiencia Profesional:

- i). Interventor Comercial del BANRURAL. Torreón, Coah. 1985.
- ii). Investigador del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Agrícola Experimental de Zacatecas. Calera de V. R., Zac. 1985-1987.
- iii). Profesor Investigador de la Universidad Autónoma Chapingo. Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas. Bermejillo, Dgo. 1987-1991.
- iv). Subdirector de Investigación en la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas de la Universidad Autónoma Chapingo. 1989-1991.
- v). Profesor Investigador de la Universidad Autónoma Chapingo. Centro Regional Universitario del Centro Norte. El Orito, Zac. 1991-a la fecha.

Otros:

- i). Miembro del Sistema Nacional de Investigadores como Candidato a Investigador Nacional. 1990-1993 y 1993-1994.
- ii). Publicaciones Científicas en *Terra*; *Agronomía*; *Agricultural and Forest Meteorology*, *an International Journal*; *Water Resources Publications*; y *Memorias de Congresos Nacionales e Internacionales*.

INDICE

	Página
LISTA DE CUADROS.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	xi
RESUMEN.....	xii
SUMMARY.....	xiii
1. INTRODUCCION.....	1
1.1. Hipotesis.....	2
1.2. Objetivos	2
2. LITERATURA REVISADA.....	3
2.1. Conceptos y Supuestos Básicos.....	3
2.1.1. Aleatoriedad.....	3
2.1.2. Estocasticidad.....	3
2.1.3. Bidimensionalidad Horizontal del Suelo Superficial.....	3
2.2. Limitantes de las Técnicas Estadísticas Convencionales.....	3
2.3. Teoría de las Técnicas Estadísticas Espaciales.....	4
2.3.1. Estacionariedad, Uniformidad u Homogeneidad.....	5
2.3.2. Funciones de Autocorrelación.....	7
2.3.3. Variogramas Geoestadísticos.....	7
2.3.4. Análisis Fractal.....	9
2.3.5. Kriging.....	9
2.3.5.1. Definición de Vecindad.....	10
2.4. Estructura Espacial de la Heterogeneidad de Procesos Estocásticos.....	11
2.4.1. Procesos Edáficos.....	11
2.4.1.1. Físicos.....	11
2.4.1.2. Químicos.....	12
2.4.2. Procesos de Planta.....	13
2.4.2.1. Físicos y Eco-fisiológicos.....	13
2.4.2.2. Químicos.....	15
2.5. Interpretación del Análisis Foliar.....	15
2.5.1. Interacciones Entre Nutrientes.....	18
2.6. Dimensión Fractal de Procesos Naturales.....	19
2.6.1. Procesos Edáficos Físicos.....	19
2.6.2. Procesos Edáficos Químicos.....	20
2.6.3. Procesos Físicos de Planta.....	20
3. MATERIALES Y METODOS.....	21
3.1. Sitio Experimental y Material Vegetal.....	21
3.1.1. Localización y Aspectos Generales.....	21
3.1.2. Especie y Normas de Diagnóstico Nutricional.....	24
3.2. Estrategia Experimental y Variables Cuantificadas.....	25
3.2.1. Variables Edáficas.....	27
3.2.2. Variables de Planta.....	27
3.2.2.1. Muestreo no Destructivo.....	27
3.2.2.2. Muestreo Destructivo.....	28
3.2.2.3. Precauciones.....	28
3.3. Análisis Estadístico e Interpretación.....	29
3.3.1. Descripción Estadística de las Variables.....	29
3.3.2. Identificación de los Factores Dominantes.....	29

	Página
3.3.3. Identificación y Remoción de Tendencias en el Espacio.....	31
3.3.4. Análisis Estocástico Espacial de la Heterogeneidad.....	31
3.3.5. Análisis Fractal.....	32
3.3.6. Interpolación o Predicción del Rendimiento.....	32
4. RESULTADOS Y DISCUSION.....	33
4.1. Descripción Estadística de las Variables.....	33
4.1.1. Ciclo OI 1993-94.....	33
4.1.2. Ciclo OI 1994-95.....	36
4.2. Transformación de Variables con Distribución no Normal.....	38
4.3. Identificación de los Factores Dominantes.....	38
4.3.1. Correlación Entre Variables Estandarizadas.....	39
4.3.2. Ciclo OI 1993-94.....	39
4.3.3. Ciclo OI 1994-95.....	43
4.4. Identificación de Tendencias.....	48
4.4.1. Ciclo OI 1993-94.....	48
4.4.1.1. Autocorrelación Serial Espacial.....	50
4.4.2. Ciclo OI 1994-95.....	50
4.4.2.1. Autocorrelación Serial Espacial.....	51
4.5. Estructura Espacial de la Heterogeneidad de los Procesos Dominantes.....	52
4.5.1. Ciclo OI 1993-94.....	54
4.5.2. Ciclo OI 1994-95.....	56
4.6. Análisis Fractal de los Procesos Dominantes.....	67
4.6.1. Ciclo OI 1993-94.....	67
4.6.2. Ciclo OI 1994-95.....	68
4.6.3. Análisis Anisotrópico de los Procesos Dominantes.....	68
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	71
6. LITERATURA CITADA.....	73
7. APENDICE.....	78

LISTA DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Labores culturales realizadas en las parcelas experimentales en los dos ciclos de cultivo.....	24
Cuadro 2. Normas de diagnóstico nutricional para maíz (<i>Zea mays</i> L.) (Sumner, 1979; Elwali <i>et al.</i> , 1985; Dara <i>et al.</i> , 1992).....	25
Cuadro 3. Variables registradas y generadas en el proyecto "Análisis estocástico espacial de procesos edáficos y de plantas en <i>Zea mays</i> L.".....	25
Cuadro 4. Descripción estadística de las variables de procesos edáficos y de plantas en <i>Zea mays</i> L. Ciclo OI 1993-94.....	34
Cuadro 5. Descripción estadística de las variables de procesos edáficos y de plantas en <i>Zea mays</i> L. Ciclo OI 1994-95.....	35
Cuadro 6. Correlaciones entre los tres primeros componentes principales (CP) y las variables edáficas y de plantas en <i>Zea mays</i> L. después de una rotación (maximización de la varianza de las combinaciones lineales). Ciclo OI 1993-94.....	42
Cuadro 7. Correlaciones entre los siete primeros componentes principales (CP) y las variables edáficas y de plantas en <i>Zea mays</i> L. después de una rotación (maximización de la varianza de las combinaciones lineales). Ciclo OI 1994-95.....	46
Cuadro 8. Coeficientes de regresión, R^2 , la probabilidad de una F mayor ($p > F$), el estadístico de Durbin-Watson (D) y los coeficientes de correlación serial r_x y r_y para las variables dominantes. Ciclo OI 1993-94.....	49
Cuadro 9. Coeficientes de regresión, R^2 , la probabilidad de una F mayor ($p > F$), el estadístico de Durbin-Watson (D) y los coeficientes de correlación serial r_x y r_y para las variables dominantes. Ciclo OI 1994-95.....	51
Cuadro 10. Valores aproximados de los componentes de la heterogeneidad de las variables dominantes. Ciclo OI 1993-94.....	55
Cuadro 11. Valores aproximados de los componentes de la heterogeneidad de las variables dominantes. Ciclo OI 1994-95.....	59
Cuadro 12. Dimensión fractal (DF) estimada para las variables dominantes por componente principal (CP) y rendimiento (REN). Ciclo OI 1993-94.....	68
Cuadro 13. Dimensión fractal (DF) estimada para las variables dominantes por componente principal (CP) y rendimiento (REN). Ciclo OI 1994-95.....	69

APENDICE

	Página
Cuadro A1. Matriz de correlación (r de Pearson) entre variables estandarizadas. Ciclo OI 1993-94.....	78
Cuadro A2. Valores propios o eigen valores de los tres primeros componentes principales (CP) extraídos de 34 variables. Ciclo OI 1993-94.....	80
Cuadro A3. Coeficientes de los tres primeros componentes principales (CP) o vectores propios extraídos de 34 variables. Ciclo OI 1993-94.....	80
Cuadro A4. Correlaciones entre los tres primeros componentes principales (CP) y las variables. Ciclo OI 1993-94.....	81
Cuadro A5. Coeficientes de los tres primeros componentes principales (CP) o vectores propios extraídos de 34 variables después de una rotación (maximización de la varianza de las combinaciones lineales). Ciclo OI 1993-94.....	82
Cuadro A6. Proporción de la varianza de cada variable explicada por diferente número de componentes principales (CP). Ciclo OI 1993-94.....	83
Cuadro A7. Matriz de correlación (r de Pearson) entre variables estandarizadas. Ciclo OI 1994-95.....	84
Cuadro A8. Valores propios o eigen valores de los siete primeros componentes principales (CP) extraídos de 53 variables. Ciclo 1994-95.....	87
Cuadro A9. Coeficientes de los siete primeros componentes principales (CP) o vectores propios extraídos de 53 variables. Ciclo OI 1994-95.....	88
Cuadro A10. Correlaciones entre los siete primeros componentes principales (CP) y las variables. Ciclo OI 1994-95.....	89
Cuadro A11. Coeficientes de los siete primeros componentes principales (CP) o vectores propios extraídos de 53 variables después de una rotación (maximización de la varianza de las combinaciones lineales). Ciclo OI 1994-95.....	90
Cuadro A12. Proporción de la varianza de cada variable explicada por diferente número de componentes principales (CP). Ciclo OI 1994-95.....	91

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Diagrama representativo de la respuesta de las plantas a cantidades diversas de factores limitantes (Sumner y Farina, 1986).....	17
Figura 2. Parcela experimental y estrategia de muestreo. Ciclo OI 1993-94.....	22
Figura 3. Parcela experimental y estrategia de muestreo. Ciclo OI 1994-95.....	23
Figura 4. Semivariogramas isotrópicos experimentales (□) y teóricos esféricos (-) de las variables dominantes del CP 1. Ciclo OI 1993-94.....	53
Figura 5. Semivariogramas isotrópicos experimentales (□) y teóricos esféricos (-) de las variables dominantes del CP 2. Ciclo OI 1993-94.....	57
Figura 6. Semivariogramas isotrópicos experimentales (□) y teóricos esféricos (-) de las variables dominantes del CP 3. Ciclo OI 1993-94.....	58
Figura 7. Semivariogramas isotrópicos experimental (□) y teórico esférico (-) del rendimiento por planta. Ciclo OI 1993-94.....	59
Figura 8. Semivariogramas isotrópicos experimentales (□) y teóricos esféricos (-) de las variables dominantes del CP 1. Ciclo OI 1994-95.....	61
Figura 9. Semivariogramas isotrópicos experimentales (□) y teóricos esféricos (-) de las variables dominantes del CP 3. Ciclo OI 1993-94.....	62
Figura 10. Semivariogramas isotrópicos experimentales (□) y teóricos esféricos (-) de las variables dominantes del CP 4. Ciclo OI 1994-95.....	63
Figura 11. Semivariogramas isotrópicos experimentales (□) y teóricos esféricos (-) de las variables dominantes del CP 5. Ciclo OI 1994-95.....	64
Figura 12. Semivariogramas isotrópicos experimentales (□) y teóricos esféricos (-) de las variables dominantes del CP 6. Ciclo OI 1994-95.....	65
Figura 13. Semivariogramas isotrópicos experimentales (□) y teóricos esféricos (-) de las variables dominantes del CP 2. Ciclo OI 1994-95.....	66
Figura 14. Semivariogramas isotrópicos experimental (□) y teórico esférico (-) del rendimiento por planta. Ciclo OI 1994-95.....	67
Figura 15. Validación de la interpolación de Mgf mediante kriging puntual en base a la función semivariograma isotrópico esférico.....	69
Figura 16. Validación de la interpolación de Mgf mediante kriging puntual en base a la función semivariograma anisotrópico esférico.....	70

RESUMEN

Ricardo David Valdez Cepeda

Fecha de Graduación: Febrero de 1997

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Agronomía

Título del Estudio: Análisis Estocástico Espacial de Procesos Edáficos y de Plantas en *Zea mays* L.

Número de Páginas: 91

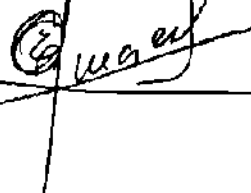
Candidato para el grado de Doctor en Ciencias Agrícolas con Especialidad en Agua-Suelo

Áreas de Estudio: Agronomía (Fertilidad del Suelo y Nutrición Vegetal). Estadística Espacial.

Propósitos y Métodos de Estudio: Los rendimientos de maíz (*Zea mays* L.) varían entre y dentro de las regiones agrícolas, debido a que las plantas responden a la heterogeneidad de los factores que influyen sobre el proceso de producción de biomasa. Los propósitos de la investigación fueron: identificar los factores dominantes de la producción de biomasa en maíz y demostrar que tienen heterogeneidad estocástica espacial estructurada; y predecir el rendimiento en función de los factores nutricionales determinantes mediante modelos estocásticos. Para ello, se tomaron y analizaron muestras de suelo superficial y de plantas en maíz Pioneer H-3044, durante los Ciclos OI 1993-94 y OI 1994-95 en el Norte de Tamaulipas: los factores dominantes fueron identificados mediante el análisis de componentes principales; la heterogeneidad espacial estructurada de los factores dominantes se identificó en base a un análisis geoestadístico; y la precisión de las predicciones del rendimiento se evaluó a través de la validación isotrópica y anisotrópica de las interpolaciones krigadas, del análisis fractal de las funciones semivariograma y del análisis de los residuales de los modelos generados por mínimos cuadrados.

Contribuciones y Conclusiones: Los factores dominantes en el proceso de producción de biomasa identificados en el estudio fueron: las concentraciones foliares de N, P, K, Ca y Mg, las relaciones N/P, N/K, P/Ca, Ca/N, Mg/N, Ca/P, Mg/P, Ca/K, Mg/K y Mg/Ca, así como la fotosíntesis, conductancia estomatal y transpiración de las plantas, y la conductividad eléctrica y las cantidades de Mg y Ca solubles en el suelo superficial. El análisis estocástico espacial de esas variables permite hacer inferencias sobre el rendimiento. La heterogeneidad de la mayoría de esas variables tiene estructura espacial, lo cual indica que las observaciones están autocorrelacionadas. La autocorrelación es independiente de la dirección y la escala y el comportamiento de las variables es errático en el espacio.

FIRMA DEL ASESOR PRINCIPAL:



SUMMARY

Ricardo David Valdez Cepeda

Graduation: February, 1997

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Agronomía

Title of the Research Work: **Spatial Stochastic Analysis of Edaphic and Plant Processes in *Zea mays* L.**

Number of Pages: 91

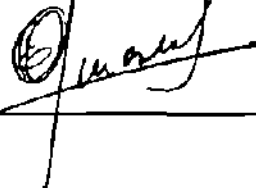
Candidate to obtain the Doctor in Agricultural Sciences degree. Water and Soil Sciences

Subjects of the Research Work: Agronomy (Soil Fertility and Plant Nutrition). Spatial Statistics.

Aims and Methods of the Research Work: Corn yields are different among and within agricultural regions because plant response is a function of heterogeneity of factors affecting biomass production processes. The aims of this research were: To identify the dominant factors of biomass production processes and their structured spatial stochastic heterogeneity; and to predict the yield as a function of the deterministic dominant factors through stochastic models. Thence, surface soil and maize plant (Pioneer H-3044) samples were taken (from plots located at North of the Tamaulipas state) and analyzed during both, autumn-winter 1993-94 and 1994-95; dominant factors were identified by means of principal component analysis; the structured spatial heterogeneity of the dominant factors was performed by a geostatistical analysis; and the preciseness of the yield predictions was evaluated by means of three techniques: isotropic and anisotropic jackknifed validations of the kriged interpolations, fractal analysis of the semivariogram functions, and residual analysis for the models obtained through the minimum square procedure.

Contributions and Conclusions: Dominant factors in the biomass production process identified in this research work were: foliar concentration of N, P, K, Ca and Mg; N/P, N/K, P/Ca, Ca/N, Mg/N, Ca/P, Mg/P, Ca/K, Mg/K and Mg/Ca ratios; photosynthesis, stomatal conductance and transpiration; and electrical conductance and Mg and Ca soluble quantities in the surface soil. Spatially stochastic analysis of those variables allows to infer on maize grain yield. Heterogeneity of a great number of such variables has spatial structure, thence observations are autocorrelated. Autocorrelation has direction and scale independence. Behavior of the dominant factors is erratic or chaotic in space.

MAIN ADVISOR SIGNATURE: _____



1. INTRODUCCION

El maíz es la especie vegetal que se cultiva en más países, y en los últimos años ha ocupado el tercer lugar mundial en superficie cosechada, después del trigo y el arroz, con 127-130 millones de ha (Luna-Flores y Zárate-Valdez, 1994). En este contexto, México ocupa el cuarto lugar en el mundo, con poco más del 5 % (5.8-7.7 millones de ha) de la superficie cosechada; aunque solamente produce el 3 % del volumen de producción de grano de maíz, lo cual indica que los rendimientos medios anuales son menores que el promedio mundial (3.7 t ha⁻¹). La mayor parte de la superficie cosechada (88 %) es en condiciones de temporal y en ella se obtiene el 76 % de la producción; gran parte del grano producido mediante este sistema se destina al autoconsumo; por ello, el maíz es la especie más identificada con la idiosincracia del pueblo mexicano. Los estados que producen los mayores volúmenes de maíz, con más altos rendimientos en condiciones de riego, son: Jalisco y Tamaulipas. En los años recientes se ha registrado un incremento de los rendimientos medios anuales; particularmente, en Tamaulipas se obtuvieron 4.5 t ha⁻¹, en el Ciclo Otoño-Invierno 1991-1992. El rendimiento de maíz varía entre regiones y dentro de ellas, debido a la gran diversidad de factores que influyen sobre el proceso de producción.

Generalmente las interacciones biofísicas en la superficie terrestre se consideran a manera de representaciones simples de la vegetación. Además, se supone que el comportamiento de las plantas es controlado únicamente por el clima (la temperatura y la precipitación) y los procesos hidrodinámicos del suelo (Swan *et al.*, 1987; Schimel *et al.*, 1991). Sin embargo, se ha demostrado que la variabilidad espacial de la biomasa de una especie y/o variedad vegetal producida durante una estación de crecimiento específica en un terreno, con prácticas de cultivo y manejo homogéneos, está determinada principalmente por la heterogeneidad del suelo (Bresler *et al.*, 1981; Or y Hanks, 1992), concebido desde 1940 como un cuerpo tridimensional ordenado con diferencias de sus propiedades.

Las propiedades del suelo, como un sistema continuo (Russo y Bresler, 1981b) multivariado (Arkley, 1976), son funciones continuas en el espacio. La continuidad de cada propiedad se puede representar mediante realizaciones u observaciones de un proceso estocástico espacial tridimensional (Yevjevich, 1972). Así, es posible identificar la estructura de la variabilidad espacial del suelo (Jackson y Caldwell, 1993), de la biomasa y del ambiente, e integrar dicha información en modelos estocásticos como mecanismo para conocer la importancia de la respuesta de las plantas a la heterogeneidad de los factores del ambiente.

La premisa fundamental es que la heterogeneidad espacial de los factores determinantes del crecimiento de las plantas tiene efectos trascendentales sobre las funciones y procesos de los sistemas agrícolas y ecológicos (Li y Reynolds, 1994). Desafortunadamente, este tipo de información no ha sido generada en maíz, especie de gran importancia económica y social a nivel mundial y nacional.

1.1. Hipótesis

i). El comportamiento de las plantas es controlado por un gran número de factores que varían en el espacio y en el tiempo; entonces, el análisis estocástico de la heterogeneidad espacial, de los factores dominantes en el proceso de producción de biomasa de las plantas en maíz, permite hacer inferencias sobre el rendimiento.

ii). Los aspectos de nutrición y de intercambio de gases son determinantes del rendimiento de las plantas en maíz; por consiguiente, los nutrientes y/o sus interacciones en suelo y planta, así como las variables de intercambio gaseoso, tienen una heterogeneidad espacial estructurada.

iii). Los factores de nutrición y de intercambio de gases influyen sobre el rendimiento, en consecuencia, es factible predecir el rendimiento de las plantas en maíz mediante modelos estocásticos precisos e insesgados.

1.2. Objetivos

Los objetivos fundamentales fueron:

i). Analizar la heterogeneidad espacial de los factores dominantes, en el proceso de producción de biomasa de las plantas en maíz, que permiten hacer inferencias sobre el rendimiento.

ii). Identificar y analizar la estructura de la heterogeneidad espacial de los factores dominantes en el proceso de producción de biomasa en maíz.

iii). Generar modelos estocásticos, precisos e insesgados, que permitan inferir la respuesta de las plantas a los factores nutricionales y de intercambio gaseoso determinantes del rendimiento en maíz.

BIBLIOTECA

2. REVISION DE LITERATURA

2.1. Conceptos y Supuestos Básicos

2.1.1. Aleatoriedad

Una variable aleatoria es una función definida dentro de un espacio con valores discretos o continuos (Haan, 1977) y puede ser descrita por su función de densidad probabilística (Russo y Bresler, 1981b).

2.1.2. Estocasticidad

Conceptualmente, un proceso estocástico es considerado como un conjunto de realizaciones con las mismas propiedades estadísticas (Russo y Bresler, 1981b). Físicamente, el concepto de conjunto puede ser entendido como repeticiones (varios valores) de alguna propiedad en un tiempo dado y en una posición determinada, en condiciones similares. La mayoría de los fenómenos naturales son procesos aleatorios estocásticos, gobernados por las leyes de probabilidad (Yevjevich, 1972), y descritos estadísticamente por la función de densidad de probabilidad acumulada (Russo y Bresler, 1981b).

2.1.3. Bidimensionalidad Horizontal del Suelo Superficial

En el caso particular de un suelo agrícola cultivado, las dimensiones horizontales del sistema son mayores que las verticales asociadas a la profundidad que alcanzan las raíces de muchas especies. Suponiendo variación vertical no significativa e isotropía horizontal (Russo y Bresler, 1981b), cualquier propiedad puede ser considerada como una realización, $z(X_i)$, de un proceso estocástico horizontal isotrópico bidimensional.

2.2. Limitantes de las Técnicas Estadísticas Convencionales

Los métodos estadísticos convencionales, como las pruebas de t , de F y de χ^2 , o procedimientos como el análisis de varianza, involucran las observaciones de los procesos físicos y químicos de suelo y planta, para su organización y análisis, con el propósito de hacer

inferencias sobre el fenómeno de interés (Rossi *et al.*, 1992) y así cumplir con el estudio científico de las relaciones entre los organismos y el ambiente (Hemmy y Lewi, 1991; Rossi *et al.*, 1992).

Dichas herramientas son fáciles de implementar, pero generalmente suponen que cada uno de los datos es independiente estadísticamente de los demás (Morkoc *et al.*, 1985; Hamlett *et al.*, 1986; Rossi *et al.*, 1992) y no consideran su variación en el espacio [*i. e.* proveen una descripción incompleta de la variabilidad de la propiedad en cuestión, puesto que no relacionan la varianza calculada con la distancia entre las observaciones (Vieira *et al.*, 1981)]. En otras palabras, la distribución de frecuencias de las observaciones, *per se*, no provee información sobre su variabilidad con respecto a las coordenadas del espacio en estudio.

Por ejemplo, el método clásico para identificar diferencias entre tratamientos (análisis de las medias de tratamientos) de fertilidad del suelo, es inadecuado cuando existe una gran variabilidad de las propiedades del suelo y, por lo tanto, de los componentes del rendimiento dentro de la unidad experimental, pues la variabilidad es ignorada en este tipo de análisis, porque generalmente se consideran promedios representativos dentro de cada unidad experimental (Trangmar *et al.*, 1987) y se supone que la variación sistemática del suelo está asociada a la variación entre bloques (Warren y Méndez, 1982; Tamura *et al.*, 1988), o bien el error se atribuye parcialmente a la variación entre bloques o repeticiones (Trangmar *et al.*, 1987; van Es *et al.*, 1989). Además, es común no identificar diferencias importantes entre los tratamientos debido a que la tendencia de la variabilidad espacial no tiene la misma dirección del bloqueo, lo que ocasiona un error experimental alto. El método, entonces, no permite interpretar satisfactoriamente el fenómeno (Trangmar *et al.*, 1987).

Por consiguiente, es aconsejable usar otras técnicas estadísticas de análisis, interpretación y estimación (Morkoc *et al.*, 1985) que tomen en cuenta la heterogeneidad en la parcela experimental, pero cualquier método útil para cuantificar la heterogeneidad espacial debe ser examinado teóricamente, antes de que sea usado en la práctica (Li y Reynolds, 1994).

2.3. Teoría de las Técnicas Estadísticas Espaciales

Existen métodos numéricos que permiten identificar la estructura de la variación horizontal conocidos como coeficientes de distancia (Arkley, 1976): Los índices de similitud y disimilitud, IS e ID, respectivamente (Bidwell y Hole, 1963; Arkley, 1976; Buol *et al.*, 1980), la diferencia media de carácter (DMc), la distancia Euclidiana (DE), la distancia métrica Canberra

(DMC), el coeficiente de Mahalanobis (CM o D^2); y otros de asociación como el coeficiente de Jacard (CJ o S_j). Desafortunadamente, los IS e ID requieren que los datos sean estandarizados en rangos positivos y expresados en porcentaje (Bidwell y Hole, 1963; Arkley, 1976); la DMC representa inadecuadamente las diferencias grandes (Arkley, 1976); la DE es muy sensible a la magnitud, de manera que una gran diferencia contribuye desproporcionadamente sobre la disimilitud entre pares de observaciones (Arkley, 1976; Webster, 1985); la DMC es mas sensible a la proporcionalidad que a la diferencia absoluta entre las observaciones (Arkley, 1976); el CM funciona como un análisis discriminante; mientras que para estimar el CJ es necesario codificar los datos en rangos o intervalos, por lo que involucra una considerable pérdida de información (Arkley, 1976).

Otros coeficientes de similitud, que permiten estimar el patrón o la estructura espacial o temporal de la variación edáfica y de plantas, son: La función de autocorrelación, FAC (Arkley, 1976); la función de autocorrelación parcial, FACP; los variogramas geostatísticos (VARG); los covariogramas (COVAR); la escala integral, ESCI; la zona de influencia (ZI) (Yates *et al.*, 1988) y el índice de dispersión, ID (Perry y Mead, 1979). Una ventaja de los variogramas geostatísticos es que pueden ser utilizados para determinar la dimensión fractal (DF) de los procesos. El análisis fractal se basa en el principio de auto-similitud o auto-similaridad, es decir, en la manera en la cual un patrón en una determinada escala se repite en otras escalas (Burrough, 1981; 1983). La DF es independiente de la escala (Mandelbrot, 1967) e indica la forma geométrica del proceso y la complejidad de las autocorrelaciones sobre algunas escalas de los fenómenos naturales (Burrough, 1983).

Teóricamente, las funciones de autocorrelación son las técnicas apropiadas para cuantificar la heterogeneidad espacial de procesos naturales, pero su uso implica ciertas hipótesis matemáticas, en particular una forma de estacionariedad (Gajem *et al.*, 1981).

2.3.1. Estacionariedad, Uniformidad u Homogeneidad

Físicamente, un proceso estocástico, $z(X_i)$, es considerado estacionario de segundo orden si:

i). La variación del conjunto de alguna propiedad es representada por una realización, de forma tal que el promedio del conjunto puede ser reemplazado por el promedio espacial o temporal (hipótesis ergódica según Russo y Bresler, 1981b; Jury *et al.*, 1987). La hipótesis establece que las inferencias se basan en el promedio de los valores estimados mediante una

realización. [Esta hipótesis ha sido aceptada para procesos naturales (e. g. la velocidad de infiltración constante del suelo; Sisson y Wierenga, 1981), cuyas observaciones se distribuyen normalmente, $z \sim N(\mu, \sigma)$]. Así, el valor esperado de z en la posición X_i es la media, μ , definida por el conjunto, v , ($\mu = \mu_v$)

$$E\{z(X_i)\} = z(X_i) = \mu_v \quad (1)$$

ii). La variabilidad (finita) es la misma a través del sistema, puesto que la covarianza, $Cov\{z(X_i), z(X_{i+h})\}$, es independiente de la posición y depende (Gajem *et al.*, 1981; Russo y Bresler, 1981a) solamente de la distancia espacial o temporal, h , que separa cada par de observaciones [$z(X_i)$ y $z(X_{i+h})$]

$$Cov\{z(X_i), z(X_{i+h})\} = E\{z(X_i) \times z(X_{i+h})\} - [\mu(X_i) \times \mu(X_{i+h})] \quad (2a)$$

Entonces

$$Cov(0) = E\{z(X_i) \times z(X_{i+0})\} - \mu^2 = E\{z^2(X_i) - \mu^2\} \quad (2b)$$

y

$$Cov(h) = E\{z(X_i) \times z(X_{i+h})\} - \mu^2 \quad (2c)$$

La consecuencia implícita inmediata de la estacionariedad de la covarianza es la estacionariedad de la varianza (Vieira *et al.*, 1981; Vieira *et al.*, 1982)

$$var\{z(X_i) - z(X_{i+h})\} = E\{[z(X_i) - z(X_{i+h})]^2\} = 2\gamma(h) \quad (3)$$

Ambos supuestos constituyen la hipótesis intrínseca de la teoría, pues se considera el siguiente modelo de variación

$$z(X_i) = \mu_v + \varepsilon(X_i) \quad (4)$$

donde $z(X_i)$ es el valor de la variable en la posición X_i dentro de un dominio o región, y $\varepsilon(X_i)$ es el componente aleatorio, dependiente temporal o espacialmente, con media cero y varianza definida por

$$var\{\varepsilon(X_i) - \varepsilon(X_{i+h})\} = E\{[\varepsilon(X_i) - \varepsilon(X_{i+h})]^2\} = var\{z(X_i) - z(X_{i+h})\} = E\{[z(X_i) - z(X_{i+h})]^2\} = 2\gamma(h) \quad (5)$$

Entonces, para un proceso estocástico estacionario o uniforme, la función de densidad probabilística no está en función de la posición que ocupa en el espacio o en el tiempo, y su función de densidad de probabilidad acumulada es la única función de las diferencias espaciales o temporales (Russo y Bresler, 1981b).

Por ello, es necesario dejar claramente establecido que antes de realizar cualquier análisis mediante la FAC, la FACP, los VARG, los COVAR, la ESCI y el ID, se debe realizar un exhaustivo análisis exploratorio de los datos o descripción estadística de las variables, involucrando los estadísticos tradicionales univariados, histogramas, regresiones simples y

gráficas de dispersión (Sisson y Weirenga, 1981; Rossi *et al.*, 1992). Si el análisis es multivariado, es conveniente contemplar matrices de correlación, análisis de conglomerados, análisis de componentes principales y análisis de varianza (Rossi *et al.*, 1992). Esta información es fundamental para que los estadísticos espaciales provean resultados valiosos y un mejor entendimiento del fenómeno.

2.3.2. Funciones de Autocorrelación

La autocorrelación, como método para estimar la dependencia espacial y temporal entre observaciones vecinas, se originó con los análisis de series de tiempo (Vieira *et al.*, 1983). Las funciones de autocorrelación (Perrier y Wilding, 1986) o funciones de autocovarianza normalizada (*i. e.* el coeficiente r adquiere valores de -1 a 1 ; Trangmar *et al.*, 1985, Perrier y Wilding, 1986) expresan la correlación lineal entre series espaciales separadas a diferentes distancias h (Russo y Bresler, 1981b; Vieira *et al.*, 1981). Por definición suponen estacionariedad de segundo orden (Trangmar *et al.*, 1985), en cuyo caso la autocorrelación es expresada como

$$r(h) = \text{Cov}(h) / \sigma^2 = 1 - [\gamma(h) / \text{Cov}(0)] \quad (6)$$

donde $r(h)$ es la autocorrelación entre observaciones a distancias de separación h , y σ^2 es la varianza de todas las series [$\sigma^2 = \text{Cov}(0)$].

La función de autocorrelación depende de la varianza, misma que debe ser finita (Ecuación 6) para que tenga sentido (Burguess y Webster, 1980). La relación gráfica entre los valores de autocorrelación, $r(h)$, versus la distancias de separación, h , se denomina autocorrelograma.

2.3.3. Variogramas Geoestadísticos

La autocorrelación entre realizaciones mediante variogramas se fundamenta en la teoría de las variables regionalizadas o geoestadísticas. Una variable regionalizada es, *sensu stricto*, una función actual que toma un valor definitivo en cada punto dentro del espacio (Matheron, 1963).

Si se considera que la Ecuación 5 es, por definición, la varianza (Vauclin *et al.*, 1983), entonces

$$2\gamma(h) = E\{[z(X_i) - z(X_{i+h})]^2\} \quad (7)$$

En la práctica se usa $\gamma(h)$ en lugar de $2\gamma(h)$ y, obviamente, recibe el nombre de semivarianza. En geoestadística la autocorrelación es definida por medio de la semivarianza estadística, $\gamma(h)$, estimada para cada intervalo específico de distancia o tiempo

$$\gamma(h) = 0.5 N(h) \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(X_i) - Z(X_{i+h})]^2 \quad (8)$$

donde $Z(X_i)$ es el valor medido en el punto X_i ; $Z(X_{i+h})$ es el valor medido en el punto X_{i+h} ; y $N(h)$ es el número total de pares de datos o diferencias para el intervalo, h , en cuestión.

La semivarianza está basada en las diferencias entre pares de observaciones (Ecuación 8) y, por ello, es menos sensible a la no estacionariedad que la autocorrelación y, en consecuencia, tiene mas ventajas prácticas para el análisis de distribuciones espaciales (Campbell, 1978).

La curva resultante entre las $\gamma(h)$ versus el vector de desplazamiento (h) se denomina semivariograma. Este último representa el porcentaje de cambio de la variable con respecto a h , y su comportamiento describe el patrón de la variación espacial o temporal en términos de magnitud escala y forma general, o bien, de estructura (Vieira *et al.*, 1982; Valdez-Cepeda, 1991; Valdez-Cepeda *et al.*, 1992). Para ello se fundamenta en los parámetros: rango, A , o intervalo en el cual existe dependencia entre los datos; varianza nugget, C_0 , o varianza no percibida con los datos analizados; varianza identificada con los datos, C_1 ; y varianza total o umbral, C .

El rango es dependiente del area muestreada y la escala; i. e. un area pequeña tendrá un rango menor que el de un area grande (Perrier y Wilding, 1986). El umbral se aprecia cuando la dispersión es finita, requisito indispensable para efectuar las interpolaciones mediante kriging.

El semivariograma o variograma representa en una forma sistemática los caracteres esenciales de los procesos (Mathieron, 1963). El semivariograma experimental puede ajustarse a modelos teóricos con umbral para identificar la estructura de la variación en el tiempo o el espacio. La elección del modelo es crítica y quizá sea la mayor fuente de ambigüedad dado que se limita el vector de desplazamiento a considerar en el ajuste (Vieira *et al.*, 1981); así, el modelo elegido sirve únicamente como una función aproximada.

La comparación de variogramas es factible si se estandarizan. La estandarización consiste en obtener el cociente de cada semivarianza entre la varianza total (Rossi *et al.*, 1992). Entonces, la comparación puede hacerse entre variogramas de procesos con diferentes unidades y/o niveles de variabilidad espacial (Rossi *et al.*, 1992).

2.3.4. Análisis Fractal

Cuando una curva, e. g. un semivariograma, es estadísticamente auto-similar, se caracteriza por un exponente de similitud que poseen algunas propiedades de una dimensión, aunque es generalmente una fracción mayor que la dimensión 1 atribuida comúnmente a las curvas (Mandelbrot, 1967). Dicho exponente se define como dimensión fractal (DF) referida a series en las cuales la dimensión Hausdorf-Besicovith (DHB) excede a la dimensión topológica (Burrough, 1981). Este concepto es de fundamental importancia para caracterizar procesos espaciales o temporales que son continuos y que exhiben correlaciones parciales en varias escalas (Burrough, 1981).

Burrough (1981) consignó que para una función fractal lineal estocástica, la DHB puede variar desde 1 (completamente diferenciable) hasta 2 (muy irregular o errática y prácticamente no diferenciable). Esto significa que es trascendental conocer este aspecto de las funciones antes de intentar hacer predicciones a partir de datos puntuales mediante kriging o regresión lineal mediante mínimos cuadrados.

Los variogramas se construyen a partir de la varianza de los incrementos (Ecuación 8), por lo que son de gran utilidad para estimar la DF considerando a su función como función fractal del tipo Weirstrass-Mandelbrot (e. g. Burrough, 1981; 1983; Armstrong, 1986) puesto que la varianza $\langle [Z(X_i)-Z(X_{i+h})]^2 \rangle$ de los incrementos (h) varía como h^{4-2DF} cerca del origen. Por consiguiente,

$$\log y(h) / \log(h) = 4 - 2DF \quad (9)$$

y

$$DF = 2 - \{0.5[\log y(h) / \log(h)]\} \quad (10)$$

2.3.5. Kriging

La interpolación para puntos, X_0 , donde la variable estacionaria no se midió, puede hacerse al suponer una combinación lineal de los valores medidos, $Z(X_i)$, e involucrando un peso o coeficiente de ponderación, ϕ_i , para cada uno de ellos (Vieira *et al.*, 1982)

$$z(X_0) = \sum_{i=1}^N \phi_i Z(X_i) \quad (11)$$

Vieira *et al.* (1982) consignaron que las formas principales para distribuir los coeficientes de ponderación incluyen la inversa del cuadrado de las distancias, la inversa de las distancias y la inversa del número de valores medidos. El mejor estimador será, por supuesto, insesgado

$$E\{z(X_0)-Z(X_0)\}=0 \quad (12)$$

y tendrá varianza mínima

$$E\{z(X)-Z(X_0)\}^2=\text{mínima} \quad (13)$$

En consecuencia, la suma algebraica de los coeficientes de ponderación, ϕ_i , deberá ser igual a la unidad

$$\sum_{i=1}^N \phi_i = 1 \quad (14)$$

La Ecuación 14 puede ser escrita en términos de notación matricial involucrando la covarianza, $C(h)$

$$[C][\phi]=[b] \quad (15)$$

Así, la solución es obtenida mediante

$$[\phi]=[C]^{-1}[b] \quad (16)$$

La Ecuación 14 es útil para identificar los coeficientes de ponderación para cada punto, expresada en términos de covarianza, $C(h)$, o de semivarianza $\gamma(h)$. Con $C(h)$ se relaciona numéricamente al método usado para obtener la solución, porque es una función decreciente (los valores mayores en la matriz se ubican en la diagonal principal). Sin embargo, la $\gamma(h)$ es más práctica cuando su valor depende de h y no de la posición. Por consiguiente, la Ecuación 14 puede también reportarse al involucrar el error, ϵ , considerando la función semivariograma

$$\sum_{j=1}^N \phi_j \gamma(X_i, X_j) + \epsilon = \gamma(X_i, X_0) \quad (17)$$

donde $i=1$ hasta N ; y $\sum_{j=1}^N \phi_j = 1$

2.3.5.1. Definición de Vecindad

Si la Ecuación 14 es usada para definir $[\phi]$, se requiere una inversión para cualquier número de estimaciones mediante kriging, dentro del dominio, porque la matriz $[C]$ será invariante con X_0 , y únicamente $[b]$ cambiará con X_0 .

Puesto que los ϕ_i decrecen conforme la distancia entre X_0 y X_i se incrementa, es posible que los puntos ubicados a intervalos mayores sean omitidos, lo cual puede conducir a errores serios (Burgess y Webster, 1980). Sin embargo, los procedimientos mas comunes tienden a seleccionar los valores medidos mas cercanos para definir el número de vecinos por involucrar en la estimación de los ϕ_i .

2.4. Estructura Espacial de la Heterogeneidad de Procesos Estocásticos

2.4.1. Procesos Edáficos

La variación del suelo es mas continua que discreta (Odeh *et al.*, 1992). Las propiedades físicas y químicas del suelo varían espacialmente debido a la naturaleza dinámica del material parental y a la posición del punto de interés en el paisaje (Riha *et al.*, 1986). Por consiguiente, en estudios cuantitativos que se consideren procesos edáficos, es necesaria la medición de la variabilidad (Parkin *et al.*, 1990), pues esta afecta grandemente al rendimiento (Bresler *et al.*, 1982) de las especies cultivadas.

2.4.1.1. Físicos

Mulla (1988) reportó rangos de 81.3 y 52 m para el contenido de agua en dos transectos de diferente dirección, así como para la temperatura superficial (71.5 y 117.5 m), resistencia a la penetración (33.7 y 54 m) y contenidos de arena (60.1 y 71.8 m) y arcilla (93.2 y 66.1 m). El modelo de los semivariogramas fue esférico. El mismo autor consignó los rangos para procesos covariados (mediante variogramas cruzados esféricos), también en dos direcciones: 84.9 y 119.4 m para temperatura x contenido de agua y 29.5 y 83 m para temperatura x resistencia a la penetración. La distancia entre pares de muestras de suelo fue de 20 m.

Ovalles y Collins (1988b) elaboraron semivariogramas esféricos direccionales para contenidos promedio de arena, arcilla y carbono orgánico, considerando distancias medias entre observaciones de 10 km. Los valores extremos del rango variaron entre 24.8 y 34.7 km, 15.6 y 34.7 km y <10 km para arena, arcilla y C orgánico, respectivamente. Los rangos oscilaron entre 20.1 y 45 km para el contenido de arcillas en el horizonte superficial. Todos los semivariogramas presentaron un patrón característico que indicó variación cíclica de esos procesos físicos. Campbell (1978) reportó que los rangos para el % de arena es de 30 y 40 m

para dos diferentes tipos de suelo, involucrando pares de observaciones separadas por 10 m. Burrough (1981) reportó un rango (semivariograma esférico) de 153.4 m para el contenido de arena del horizonte A considerando una estrategia de muestreo regular con observaciones separadas por 60 m.

Rogers *et al.* (1991) encontraron evidencias de estructura espacial diaria de la conductividad hidráulica (log-transformada) en 11 de 26 transectos; el rango varió de 18 a 120 m.

El espesor de la capa edáfica arable no presenta estructura espacial al involucrar un esquema de observaciones separadas por distancias mínimas de dos metros (Finke *et al.*, 1992); ello es atribuible a la naturaleza del disturbio que ha afectado ese horizonte del suelo. Sin embargo, los dos estratos subyacentes (2 y 4) a la capa arable si muestran claramente una estructura espacial con rangos de 9 y 10 m, respectivamente (Finke *et al.*, 1992). Evidentemente el espesor del estrato 3 no presenta estructura espacial, debido a que su comportamiento es truncado (Finke *et al.*, 1992) cotidianamente por factores propios del proceso de formación del suelo.

2.4.1.2. Químicos

La heterogeneidad de los niveles de los nutrientes en los suelos resulta de la variabilidad de las características de suelo físicas y químicas (West *et al.*, 1989). Los patrones espaciales de las cantidades de nutrientes disponibles constituyen un componente crítico de la estructura de comunidades de plantas, aunque todavía debe ser comprensivamente cuantificado (Robertson *et al.*, 1988). Lógicamente, para evaluar las relaciones potenciales entre patrones de los nutrientes y la estructura de las comunidades vegetales, se requiere demostrar que la disponibilidad de los nutrientes varía significativamente en el espacio que ocupa la comunidad.

Tabor *et al.* (1985) evidenciaron una alta correlación entre el porcentaje de arcillas y la conductividad eléctrica del extracto de saturación con los nitratos del suelo y de pecíolos de plantas de algodón, respectivamente; inclusive, los nitratos del suelo y la CE presentaron dependencias espaciales y estructura espacial similares, aunque los semivariogramas mostraron dependencia espacial para dichos procesos a distancias mayores a 150 m.

Trangmar *et al.* (1986) determinaron que el P extraíble, $\text{NaHCO}_3\text{-P}$, HCl-P y $(\text{NaHCO}_3\text{-P})\text{-(HCl-P)}$, mostraron dependencia espacial de 6.3, 4.2 y 10.4 km, respectivamente; los semivariogramas isotrópicos y cruzados se estimaron en base a muestras de suelo superficial

(0-15 cm), cuyas distancias mínimas variaron de 0.5 a 3 km para $\text{NaHCO}_3\text{-P}$ y entre 0.1 y 3 km para HCl-P .

Webster y Butler (citados por Trangmar *et al.*; 1985) encontraron que la mayor parte de la variación del fósforo ocurre dentro de distancias de 5 m, mientras que la del potasio soluble y el pH entre 56 y 180 m.

En un suelo sódico, los rangos (semivariogramas esféricos) asociados al horizonte superficial (0-0.3 m) adquirieron los valores de 22, 42, 33 y 24 m para el pH, la relación de adsorción de sodio, P y K, respectivamente (Samra *et al.*, 1990). El muestreo de suelo se hizo cada 6 m. Esos rangos indican que las distancias entre observaciones contiguas están autocorrelacionadas y, por ello, Samra *et al.* (1990) señalaron que los principios de aleatorización, repeticiones, y análisis de tendencia pueden ser inefectivos en suelos afectados por sales o en condiciones similares.

Yost *et al.* (1982) analizaron geoestadísticamente la Isla de Hawaii con observaciones que variaron de 1 a 2 km de distancia; ellos reportaron que los rangos de los semivariogramas para los procesos de suelo pH, Ca, Mg, K, Si y P absorbido, adquirieron los valores de 14-32, 42-45, 39, 10-32, 32 y 32 km, respectivamente.

2.4.2. Procesos de Planta

Generalmente, los rendimientos altos ocurren cuando existe siempre una adecuada cantidad de agua disponible en el suelo, pero conforme la variabilidad se incrementa los rendimientos decrecen (Guitjens, 1992). Desafortunadamente, es muy escasa la información sobre el cuanto afectan la variabilidad del suelo y su arreglo estructurado a la variabilidad del rendimiento (Bresler *et al.*, 1981). Las relaciones causales entre procesos edáficos y la respuesta de las plantas pueden ser detectadas efectivamente si las coordenadas de tiempo y/o espacio de las observaciones se incluyen en el análisis (Wendroth *et al.*, 1992).

2.4.2.1. Físicos y Eco-fisiológicos

La altura de árboles de Shisham (*Dalbergia sissoo* Roxb. ex DC.), plantados a espacios de 3 por 6 m, presentó distancias de dependencia (rangos de semivariogramas esféricos) de 14, 14, 19 y 11 m para el primero, segundo, tercero y cuarto años de edad, respectivamente (Samra *et al.*, 1990). Dependiendo del proceso edáfico involucrado (Relación de adsorción de sodio,

pH, P y K), el horizonte del suelo y la edad de la planta, el valor del rango de semivariogramas cruzados indicó que la correlación cruzada del crecimiento y las propiedades edáficas varió de 30.2 a 66.5 m (Samra *et al.*, 1990).

Espacialmente, el N foliar de un pasto se correlaciona generalmente con la biomasa y donde se tiene mayor disponibilidad de N las plantas sufren menos tensión hídrica, expresada en términos de potencial de presión en el xilema (Schimel *et al.*, 1991).

La variabilidad espacial de los recursos limitantes para el crecimiento de las plantas provoca variación de las tasas de intercambio de agua y bióxido de carbón entre la atmósfera y la biósfera (Schimel, 1992). Entonces, para incrementar la significancia biológica de los modelos para la interacciones ecosistema-atmósfera, se requiere de técnicas que relacionen las respuestas clave, ecológico-fisiológicas, a los factores mas limitantes.

La temperatura es de interés para los científicos de suelos y de plantas, porque es un proceso que influye sobre algunos procesos físicos, químicos y bióticos en la rizósfera y en la capa atmosférica superficial (Ham y Senock, 1992). Este factor es el principal determinante climático de la tasa de crecimiento vegetal (Andrade *et al.*, 1993).

Las diferencias en acumulación de materia seca entre plantas, especialmente entre variedades (Tollenaar y Aguilera, 1992), puede atribuirse a las diferencias de la absorbancia de radiación fotosintéticamente activa (RFA, 400-700 nm) y/o de la conversión de la RFA absorbida en materia seca (Eficiencia en Uso de Radiación, EUR). En el campo, unas plantas impiden la incidencia directa de los rayos solares sobre otras, entonces, la fracción de radiación difusa adquiere mayor importancia para las plantas sombreadas, aunque es distribuida mas uniformemente que la radiación directa (Sinclair *et al.*, 1992). Por ello, la radiación interceptada ha recibido mas atención (Andrade *et al.*, 1993). El gradiente vertical de la capacidad fotosintética se correlaciona, en espacio y tiempo, con la biomasa y la luz interceptada por la vegetación (Schimel *et al.*, 1991).

Para propósitos de detección de deficiencias hídricas o de estimación de rendimientos en una parcela, la distribución espacial de la temperatura en el dosel (TD) es un aspecto importante (Yates *et al.*, 1988). Hatfield y Hatfield *et al.* (citados por Yates *et al.*; 1988) midieron la temperatura del dosel en transectos de algodón y sorgo, y encontraron que dicha variable está aleatoriamente distribuida en el espacio. En cambio, Yates *et al.* (1988) modelaron esféricamente la variación de la misma variable en una parcela de algodón y reportaron rangos de 18 a 40 m; asimismo, consignaron que las temperaturas del dosel y del suelo sin cobertura

vegetal son funciones aleatorias dependientes a escalas de 2 y 15 m para condiciones húmedas y secas, respectivamente.

2.4.2.2. Químicos

En los ecosistemas de regiones templadas el nitrógeno es el nutriente que limita, mas frecuentemente, el crecimiento de las plantas y, en consecuencia, es el nutriente que mas afecta la estructura de las comunidades vegetales (Robertson *et al.*, 1988).

Tabor *et al.* (1985) reportaron que en un suelo arcilloso irrigado, el nitrato del suelo no se correlaciona significativamente con el nitrato de peciolo de plantas de algodón, debido a lo complicado de las relaciones entre nutrientes, a la influencia de las interacciones entre nutrientes sobre el nitrato en los peciolo y a la diferencia entre el nitrato de suelo muestreado y el nitrato de suelo total disponible para ser absorbido por las plantas. El nitrato en peciolo y el porcentaje de arcillas presentaron una correlación moderadamente alta, lo cual sugiere que la estructura espacial de uno de los dos procesos puede ser inferido a partir de la del otro; sin embargo, no se evidenciaron el rango y el umbral de los semivariogramas al involucrar distancias menores a 150 m.

2.5. Interpretación del Análisis Foliar

La interpretación de la composición química foliar o de otras partes es difícil, debido a que la planta es el integrador de todos los factores (Sumner y Boswell, 1981). Esto significa que el efecto total se refleja en la composición química de la planta y se expresa en el rendimiento comercial o biológico.

La composición foliar es mas sensible a los cambios del ambiente que el rendimiento, por lo que su interpretación ha recibido mucha atención con fines de diagnóstico y recomendación. En este sentido se desarrollaron las técnicas de valores críticos y rangos de suficiencia; sin embargo, dichas técnicas únicamente relacionan la concentración de algún elemento mineral con el rendimiento y descuidan el principio de que los rendimientos mas altos se obtienen cuando los nutrientes y los demás factores responsables del crecimiento se encuentran en niveles favorables balanceados, es decir, la posibilidad de ausencia de interacciones (aditividad) y de 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). Por su parte, la técnica conocida como *sistema integrado de diagnóstico-recomendación* (DRIS, por sus siglas en inglés) se sustenta en esos principios, mediante el modelo de la Figura 1, por lo que se constituye en un grupo integrado de normas representativas de factores del vegetal, del suelo, del clima y de prácticas de manejo (Walworth y Sumner, 1987; Sumner, 1986). La exactitud de los diagnósticos foliares depende de la validez de las normas en situaciones específicas (Walworth y Sumner, 1987).

La metodología contempla que la interpretación de la composición foliar se sustente en la estimación de un índice para cada factor, en función de la diferencia entre los valores de la forma de expresión (relación entre dos nutrientes) de la muestra en estudio y la norma correspondiente

$$f(A/B)=100\{[(a/b)/(A/B)]-1\}10/cv; \text{ cuando } a/b > A/B \quad (18)$$

$$f(A/B)=100\{1-[(A/B)/(a/b)]\}10/cv; \text{ cuando } a/b < A/B \quad (19)$$

donde $f(A/B)$ es la función para la expresión A/B ; A y B representan la concentración, en la hoja, de los nutrientes A y B , respectivamente; a/b es el valor medio de la forma de expresión a/b de la muestra y, A/B y cv son la media y el coeficiente de variación asociado, respectivamente, considerados como la norma DRIS.

Posteriormente, se calculan los índices DRIS mediante la fórmula general

$$IA = (\Sigma[f(A/B)+f(A/C)...-f(B/A)-f(C/A)...])/n \quad (20)$$

donde IA es el índice de A ; A , B , C , etc. son los nutrientes o factores involucrados y n es el número de formas de expresión en que interviene A . La suma de los índices debe ser igual a cero.

La suma de los índices DRIS sin considerar el signo (índice de balance nutricional, IBN) indica el grado de desbalance entre los factores. En otras palabras, los índices no tienen un significado intrínseco (Beverly, 1991), pues solo proveen las bases para comparar la suficiencia de cada nutriente con respecto a los demás en términos relativos, o bien el orden en que limitan el rendimiento.

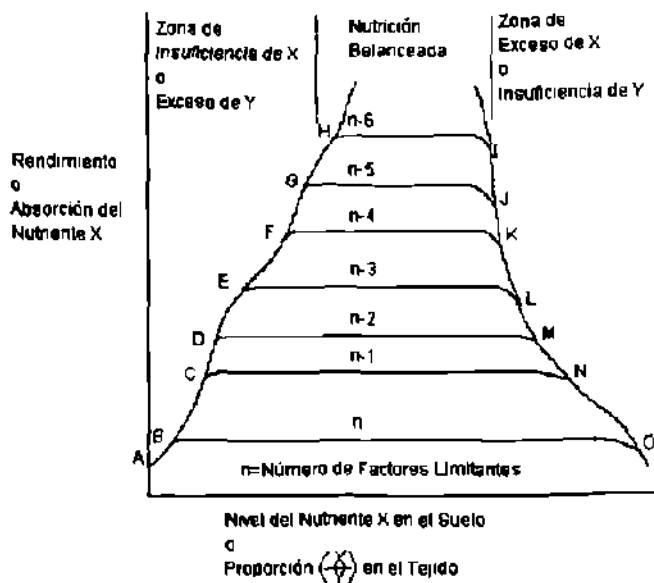


Figura 1. Diagrama representativo de la respuesta de las plantas a cantidades diversas de factores limitantes (Sumner y Farina, 1986). El punto A indica un rendimiento bajo debido a una deficiencia de X o bien a un exceso de Y, lo cual puede corregirse al incrementar X, permitiendo obtener un rendimiento B determinado por n factores limitantes. Niveles altos de X (o bajos de Y) pueden provocar rendimientos relativamente estables como se aprecia con la línea BO. Valores de X mayores que el de O conllevan a reducir al rendimiento. Si el más limitante de los n factores es incrementado a un nivel no limitante, el rendimiento puede aumentarse a C como resultado de un incremento de X y depender de n-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 similares a la de inducción a N y O corresponden a antagonismos, mientras que los incrementos de rendimiento (e.g. de B a C) resultan de la eliminación de la influencia de factores limitantes y el efecto del nuevo nivel de X y demás factores reflejan sinergismos. El incremento en rendimiento de C a D resulta de eliminar un factor limitante (Y) con poca o nula interacción con X, de manera que tal evento refleja una situación de aditividad. Conforme la influencia de los factores limitantes es eliminada, el rendimiento se incrementa en función de X.

2.5.1. Interacciones Entre Nutrientes

Quizá, debido al papel generalizado y dominante del nitrógeno (N) y el fósforo (P) como nutrientes, la interacción entre N y P es probablemente la interacción más importante económicamente. Sin embargo, es sorprendente que sean menos los reportes sobre esta interacción en estudios en campo que en invernadero.

Es típico un efecto interactivo N-P sobre el rendimiento, atribuible a que el N induce la absorción de P por la planta (Terman *et al.*, 1977) y a una posible dilución de P (Terman *et al.*, 1972), pero también se ha evidenciado un efecto estimulador del P sobre el contenido de N en la planta (Sumner y Farina, 1986). Por desgracia, los mecanismos involucrados no están bien entendidos (Sumner y Farina, 1986). Es concluyente que el N tiene un efecto sinérgico sobre el contenido de P en las hojas de maíz y *viceversa*, así como un efecto interactivo positivo sobre el rendimiento (Sumner y Farina, 1986).

Cuando hay deficiencias de NH_4^+ dentro de las plantas en maíz, la concentración de K se incrementa, mientras que la de P decrece (Clark, 1970), pero las deficiencias de NH_4^+ son raras y tienen poco efecto sobre el N total en la planta, porque son mínimas las cantidades de NH_4^+ de la solución requeridas dentro de la planta, ya que NO_3^- puede ser convertido a NH_4^+ vía nitrato reductasa (Clark, 1970).

En condiciones de alta concentración de NH_4^+ en la solución, éste ion puede competir con otros como K^+ , Mg^{2+} y Ca^{2+} en los sitios de intercambio, hasta un nivel en que los últimos iones pueden ser limitantes (Clark, 1970).

Los iones NH_4^+ , K^+ y Mg^{2+} pueden ser antagónicos al ion Ca^{2+} (Marschner, 1986; Parent *et al.*, 1993). Los excesos de Mg inducen deficiencias de K (Rojas, 1979) porque son antagónicos (Parent *et al.*, 1994); la relación entre Mg y P puede vincularse a un proceso de acumulación-dilución (Marschner, 1986; Walworth y Sumner, 1987). El K y el Ca son antagónicos en las plantas (Rojas, 1979; Marschner, 1986) o contrastan por dilución de K y acumulación de Ca (Walworth y Sumner, 1987).

Los efectos antagónicos y sinérgicos de algún nutriente en particular (en la planta) son ya reconocidos. De particular prominencia son las relaciones recíprocas entre los elementos K, Ca y Mg; aunque también han sido evidenciadas entre aniones y cationes, macronutrientes y micronutrientes, y elementos esenciales y no esenciales (Clark, 1970).

Cada una de las interacciones puede o no existir, pues ello depende de las condiciones prevaletentes tales como especie en estudio, propiedades y composición del sustrato, etc.

Desafortunadamente, son pocos los reportes en los cuales se indica que el conocimiento generado acerca de las interacciones entre nutrientes ha sido usado para mejorar la tecnología en parcelas comerciales (Sumner y Farina, 1986).

2.6. Dimensión Fractal de Procesos Naturales

Dado que los valores de la dimensión fractal (DF) son independientes de la escala y de la magnitud de los objetos de interés, pero si dependientes de la variabilidad, pueden ser comparados entre procesos o variables de magnitudes diferentes. Los valores grandes de DF reflejan la dominancia de los efectos de rango pequeño, mientras que los valores pequeños reflejan la importancia mayor o persistencia de variaciones de rangos grandes (Burrough, 1981). Los valores grandes de DF sugieren que las interpolaciones o predicciones de valores de las variables pueden ser no satisfactorias (Burrough, 1981; 1983; Folorunso *et al.*, 1994).

Las metodologías para calcular la DF son numerosas. A continuación se presentan únicamente las dimensiones fractales (estimadas mediante variogramas geoestadísticos principalmente) de algunos procesos estadísticamente auto-similares reportados en la literatura. No se encontró información de variables identificadas en el presente reporte como variables de nutrición vegetal o procesos químicos de planta.

2.6.1. Procesos Edáficos Físicos

Mandelbrot (1967) indicó que la DF de las Costas Oeste de Gran Bretaña y de Australia adquiere valores de 1.25 y 1.13, respectivamente, mientras que la de la frontera entre España y Portugal es 1.14.

Burrough (1981) consignó que la pedregosidad del suelo tiene una DF que varía de 1.1 a 1.8; mientras que de la fracciones limo+arcilla y arena cuarzosa en el suelo superficial, al igual que el diámetro medio de la superficie de las piedras y la resistencia a la penetración es 1.8. El mismo Burrough (1981) señaló que la DF para la densidad aparente del suelo superficial es 1.5.

La resistencia a la penetración del suelo superficial tiene una DF que varía entre 1.76 y 1.944 (Armstrong, 1986).

Kemblowski y Chang (1993) indicaron que la DF de la conductividad hidráulica del suelo es de 1.45 y 1.825 para la infiltración horizontal y vertical, respectivamente. Los niveles de agua subterráneos tienen una DF entre 1.3 y 1.8 (Burrough, 1981; 1983).

2.6.2. Procesos Edáficos Químicos

El pH del suelo tiene un comportamiento muy errático en el suelo y una DF de entre 1.5 y 2 (Burrough, 1981; 1983); el fósforo y el potasio presentan DF's de 2 y 1.6, respectivamente, mientras que la de sodio es 1.7-1.9 y la de la conductividad eléctrica es de 1.4 a 1.6.

2.6.3. Procesos Físicos de Planta

La DF del crecimiento de las raíces de plantas en maíz es de 1.35 a 1.63 (Eghball *et al.*, 1993). Por su parte, Morse *et al.* (1985) determinaron la dimensión fractal media del crecimiento de plantas de diferentes especies: *Berberis vulgaris* L., 1.43-1.46; *Parthenocissus tricuspidata* (sieb. y Zucc.) Planch, 1.28-1.55; *Ulmus glabra* forma pendula (Loud.) Rehd., 1.41; *Cotoneaster horizontalis* Decaisne, 1.35-1.79; *Hedera helix* L., 1.39; *Taxus baccata* L., 1.47-1.68; *Betula pendula* Roth, 1.4; *Betula pubescens* Ehrh., 1.40; *Fraxinus excelsior* L., 1.42 y *Acer pseudoplatanus* L., 1.31.

Burrough (1981) reportó que la DF del rendimiento de las especies cultivadas en parcelas experimentales varía de 1.6 a 1.8. Sin embargo, se ha definido también que los rendimientos anuales de maíz en parcelas con diferente manejo a largo plazo presentan DF's de 1.963 a 1.996 (Eghball *et al.*, 1995); mientras que los rendimientos medios anuales de cebada, algodón, maíz, avena, cacahuete, arroz, centeno, sorgo, soya y trigo en los USA tienen DF's de 1.35, 1.42, 1.32, 1.47, 1.33, 1.20, 1.38, 1.33, 1.46 y 1.31, respectivamente (Eghball y Power, 1995). La DF de los rendimientos medios anuales de maíz, frijol, trigo y arroz en México es 1.36, 1.46, 1.24 y 1.49, respectivamente (Valdez-Cepeda y Olivares-Sáenz, 1996).

De singular importancia es que los rendimientos anuales por efecto de manejo a largo plazo tengan DF's mayores que el resto de los procesos naturales indicados en este apartado, inclusive que los rendimientos medios anuales para USA y México. Ello indica que las funciones que describen la heterogeneidad de dichos procesos son no diferenciables o, en otras palabras, esos procesos son difícilmente predecibles.

3. MATERIALES Y METODOS

3.1. Sitio Experimental y Material Vegetal

3.1.1. Localización y Aspectos Generales

Los experimentos se establecieron en una parcela comercial, facilitada por un productor cooperante incluyendo los derechos de uso de agua, misma que se ubica en la región agrícola "Valle del Bravo", dentro del Municipio de Reynosa, Tamaulipas y del Distrito de Desarrollo Rural No. 26 del Bajo Río San Juan. Dicha superficie se encuentra cerca de los 98° 35.1' longitud oeste y 26° 13.6' latitud norte, a una altitud de 40 msnm. El clima predominante en esa región es (BS1(h')hx'(e)'), el cual es el clima mas seco de los esteparios, muy cálido y extremo, con temperatura media anual >22 °C; las lluvias (precipitación media anual de 540 mm) ocurren a fines del verano, con presencia de canícula.

La parcela experimental para el Ciclo OI 1993-1994 fue un lote de 0.004324 ha (Figura 2) en forma de cruz y comprendió cinco surcos separados 0.92 m (4.6 m); la longitud de los tres surcos centrales fue de 19 m; mientras que la de los dos extremos de 4.5 m. Durante el Ciclo OI 1994-95, la parcela experimental comprendió una superficie de 0.46368 ha (Figura 3) en forma rectangular y cubrió 63 surcos (57.96 m); la longitud de los surcos fue de 80 m. Ambos lotes experimentales se ubicaron al norte del canal sublateral 0-14, de manera que la dirección de los surcos fue sur-norte o *viceversa*.

En el Cuadro 1 se aprecian las labores culturales realizadas en los dos experimentos, las fechas en que se realizaron y la cantidad de fertilizante aplicado por unidad de superficie y sus fuentes (N-P₂O₅-K₂O-S). Los riegos, la fertilización, los cultivos y el control de organismos dañinos los hizo el productor cooperante conforme al paquete tecnológico desarrollado por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias para la región. Durante el Ciclo OI 1993-94 hubo incidencia de gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*), diabrotica (*Diabrotica spp.*) y gusano elotero (*Heliothis zea*), pero no se controlaron porque los daños no fueron considerables en las plantas seleccionadas para conformar la muestra. El Ciclo OI 1994-95 se caracterizó como anormal porque fue muy seco.

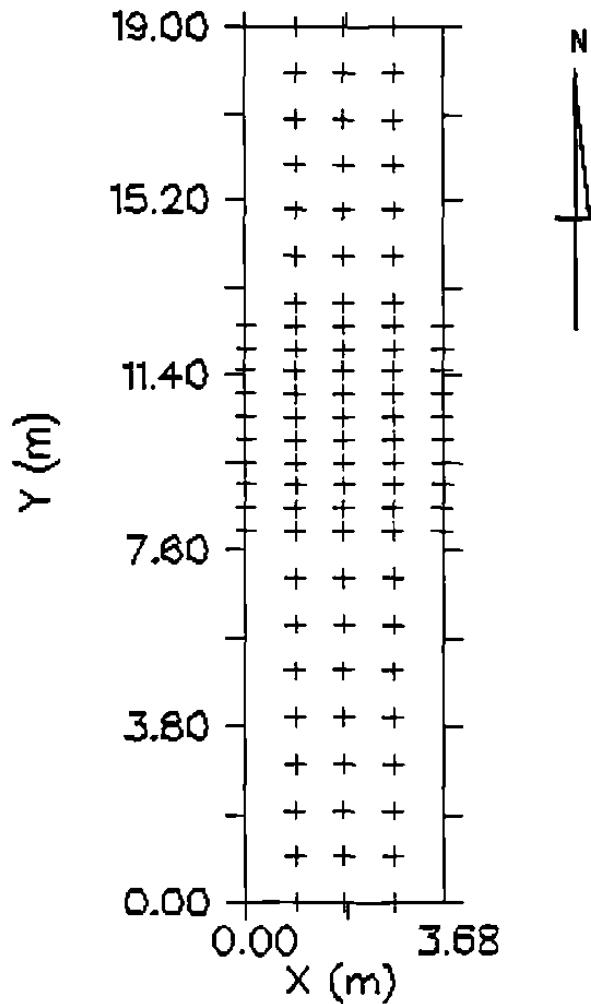


Figura 2. Parcela experimental y estrategia de muestreo. Ciclo OI 1993-94. Los símbolos + indican los 95 sitios de muestreo de suelo superficial (0-30cm) sobre la banda de aplicación de fertilizante. La planta muestreada fue la mas próxima al norte de cada punto de muestreo de suelo. La dirección de los surcos es sur-norte o *viceversa*. Los surcos muestreados estuvieron separados 0.92 m. La distancia mínima de separación de las muestras sobre los surcos fue de 0.5 m en la parte central de la parcela.

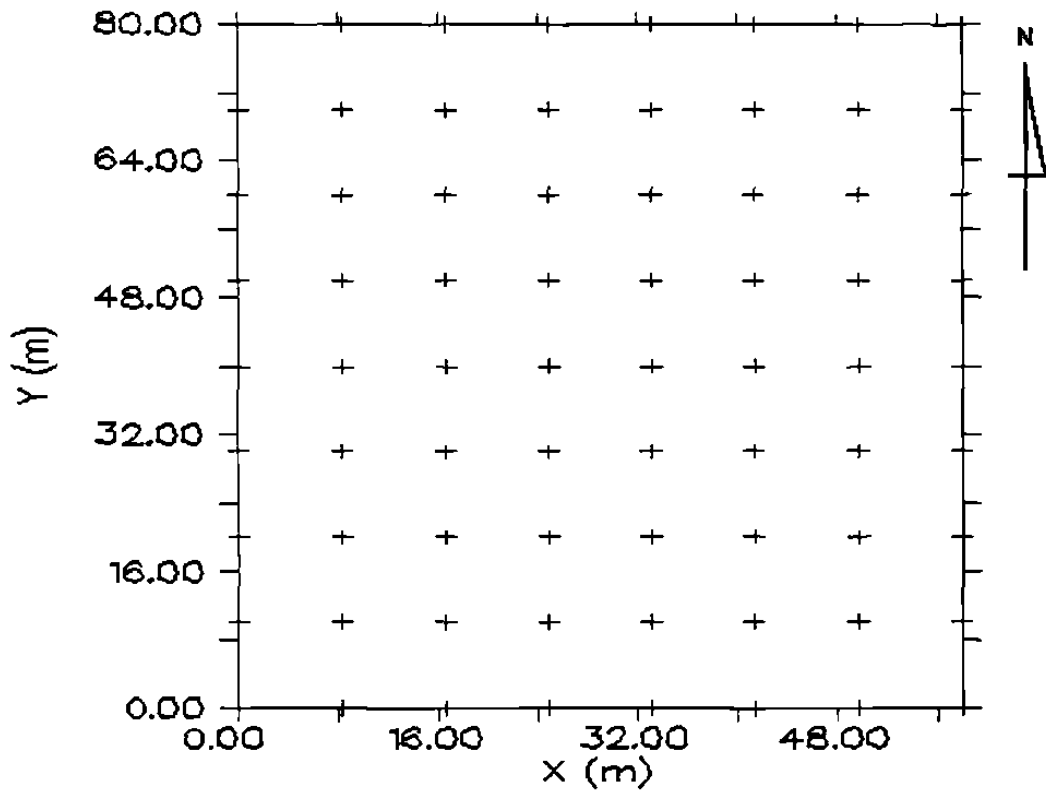


Figura 3. Parcela experimental y estrategia de muestreo. Ciclo OI 1994-95. Los símbolos + indican los 72 sitios de muestreo de suelo superficial (0-30cm) sobre la banda de aplicación de fertilizante. Las plantas muestreadas fueron las cinco más próximas a cada punto de muestreo de suelo. La dirección de los surcos es sur-norte o *viceversa*. Los surcos muestreados estuvieron separados 8.28 m. La distancia mínima de separación de las muestras sobre los surcos fue de 10 m.

Cuadro 1. Labores culturales realizadas en las parcelas experimentales en los dos ciclos de cultivo.

Actividad	Ciclo OI 1993-94		Ciclo OI 1994-95	
	Fecha	Cantidad (Fuente)	Fecha	Cantidad (Fuente)
Rotura	1993-08-25		1994-08-30	
Rastreo	1993-10-06		1994-10-28	
Bordeo	1993-11-29		1994-11-04	
Fertilización	1993-12-05	0.2 t ha ⁻¹ (18-46-00)	1994-12-05	0.178 t ha ⁻¹ (12-32-10-10)
Riego Asiento	1993-12-29	.	1995-01-07	
Pasada cable	1994-01-04		1995-01-28	
Siembra	1994-02-06		1995-01-30	
y Fertilización		0.07 t ha ⁻¹ (46-00-00)		0.07 t ha ⁻¹ (46-00-00)
1er Cultivo	1994-03-10		1995-03-11	
y Fertilización		0.243 t ha ⁻¹ (32-00-00)		0.243 t ha ⁻¹ (46-00-00) + 0.121 t ha ⁻¹ (20.5-00-00)
2do Cultivo	1994-03-21		1995-03-22	
Bordeo	1994-03-25		1995-03-30	
1er Riego Auxilio	1994-04-05		1995-04-14	
2do Riego Auxilio	1994-04-28		1995-05-02	
3er Riego Auxilio	1994-05-16		1995-05-17	
Cosecha	1994-06-26		1995-06-24	

3.1.2. Especie y Normas de Diagnóstico Nutricional

La semilla que se utilizó en la siembra fue del híbrido Pioneer 3044, el cual es una cruz simple de poca variabilidad genética. La elección específica del material genético estuvo en función del mercado, ya que la compañía Pioneer es la que vende mas semilla de maíz en la región.

Las Ecuaciones 18, 19 y 20 se usaron para estimar los índices de los nutrientes (I_i), así como los valores nutricionales de referencia (normas del Sistema Integrado de Diagnóstico-Recomendación, DRIS por sus siglas en inglés) indicados en el Cuadro 2; estos fueron generados en base a datos de experimentos establecidos en diferentes partes del mundo y con material genético diverso (Elwali *et al.*, 1985; Walworth y Sumner, 1987). El IBN se estimó al sumar los índices de los nutrientes, sin considerar el signo (Walworth y Sumner, 1987; Beverly, 1991). El método y sus fundamentos teóricos permiten eliminar la posible influencia de la variación de los nutrientes y su tendencia en las hojas durante la estación de crecimiento, al

Cuadro 2. Normas de diagnóstico nutricional para maíz (*Zea mays* L.) (Sumner, 1979; Elwali *et al.*, 1985; Dara *et al.*, 1992).

Concentración Óptima y/o Norma DRIS	Valor de la Forma de Expresión	cv
N, %	3.1	
P, %	0.3	
K, %	2.1	
Ca, %	0.7	
Mg, %	0.3	
N/P	9.035	16.17
N/K	1.463	29.11
P/K	0.169	31.95
Ca/N	0.160	35.62
Ca/P	1.447	42.29
Ca/K	0.237	51.48
Mg/N	0.071	40.84
Mg/P	0.639	51.64
Mg/K	0.104	60.58
Mg/Ca	0.465	39.14

involucrar las interacciones mas estables y la estimación de índices en un sentido holístico (Walworth y Sumner, 1987).

3.2. Estrategia Experimental y Variables Cuantificadas

Es pertinente indicar que el esquema de muestreo implementado en el presente trabajo se sustenta en tres aspectos de suma importancia:

i). El primero de ellos se refiere a la necesidad de muestrear a distancias menores a las cuales se ha evidenciado dependencia y menguar así la varianza no cuantificada con los diseños de muestreo reportados en la literatura consultada.

ii). El segundo atiende a la estrategia de hacer coincidir puntos de muestreo para diferentes variables, lo cual permite hacer análisis bi y multivariados de mayor calidad.

iii). Otro aspecto, quizás no menos importante, es el que se pretendió obtener mas de 30 observaciones por pares de datos separados por distancias similares, con la finalidad de proveer estocasticidad a las varianzas asociadas (Russo, 1984).

En el Cuadro 3 se enlistan las variables registradas y generadas por ciclo agrícola, así como los métodos de laboratorio específicos y/o de generación para cada variable.

Cuadro 3. Variables registradas y generadas en el proyecto "Análisis estocástico espacial de procesos edáficos y de plantas en *Zea mays* L."

Variable	Ciclo OI 1993-94		Ciclo OI 1994-95	
	Clave	Método	Clave	Método
de Suelo	Laboratorio FA-UANL		Laboratorio FAZ-UJED	
Agua en base a peso de suelo seco (%)			Pw	Gravimétrico
Arena (%)	ARE	Hidrometro	ARE	Hidrometro
Limo (%)	LIMO	Hidrometro	LIMO	Hidrometro
Arcilla (%)	ARC	Hidrometro	ARC	Hidrometro
Potencial hidrogeno	pH	Potenciometro	pH	Potenciometro
Materia organica (%)	MO	Walkley y Black	MO	Walkley y Black
Carbonatos insolubles (%)			CO ₃	Edometria
Conductividad electrica (dS m ⁻¹)	CE	Conductivimetro	CE	Conductivimetro
Calcio soluble (meq l ⁻¹)			CaS	Colorimetria
Magnesio soluble (meq l ⁻¹)			MgS	Colorimetria
Sodio soluble (meq l ⁻¹)			NaS	Espectrofotometria
Potasio soluble (meq l ⁻¹)			KSS	Espectrofotometria
Bicarbonatos (meq l ⁻¹)			HCO ₃	Colorimetria
Sulfatos (meq l ⁻¹)			SO ₄	Turbidimetria
Cloruros (meq l ⁻¹)			ClS	Colorimetria
Sodio intercambiable (%)			PSI	
Nitrogeno total (%)	NS	(0.05)(% MO)		
Nitratos (ppm)			NS	Kjeldahl
Fosforo (ppm)	PS	Olsen	PS	Olsen
Potasio (kg ha ⁻¹)	KS	Morgan		
Potasio (ppm)			KS	Morgan
de Planta				
Olote (g)	OLO		OLO	
Mazorca (g)	MAZ		MAZ	
Rendimiento (g)	REN		REN	
Biomasa (g)	B			
Biomasa ajustada (g)	BA			
Altura de mazorca (cm)	AM			
Altura de planta (m)	AP		AP	
Diametro de tallo (cm)			DT	
Area foliar (cm ²)			AF	0.75xLxA
Radiacion fotosinteticamente activa (quantums)			RFA	Analizador Gases
Fotosintesis (µmol m ⁻² s ⁻¹)			FOTO	Analizador Gases
Conductancia estomatal (mol m ⁻² s ⁻¹)			COND	Analizador Gases
CO ₂ (ppm)			CO ₂	Analizador Gases
Transpiracion (mmol m ⁻² s ⁻¹)			TRAN	Analizador Gases
Nitrogeno (%)	Nf	Kjeldahl	Nf	Kjeldahl
Fósforo (%)	Pf	Espectrofotometria	Pf	Espectrofotometria
Potasio (%)	Kf	Espectrofotometria	Kf	Espectrofotometria
Calcio (%)	Caf	Espectrofotometria	Caf	Espectrofotometria
Magnesio (%)	Mgf	Espectrofotometria	Mgf	Espectrofotometria
Proporcion N/P	N/P		N/P	
Proporcion N/K	N/K		N/K	
Proporcion P/K	P/K		P/K	
Proporcion Ca/N	Ca/N		Ca/N	
Proporcion Ca/P	Ca/P		Ca/P	
Proporcion Ca/K	Ca/K		Ca/K	
Proporcion Mg/N	Mg/N		Mg/N	
Proporcion Mg/P	Mg/P		Mg/P	
Proporcion Mg/K	Mg/K		Mg/K	
Proporcion Mg/Ca	Mg/Ca		Mg/Ca	
Indice N	IN	DRIS	IN	DRIS
Indice P	IP	DRIS	IP	DRIS
Indice K	IK	DRIS	IK	DRIS
Indice Ca	ICa	DRIS	ICa	DRIS
Indice Mg	IMg	DRIS	IMg	DRIS
Indice de balance nutricional	IBN	DRIS	IBN	DRIS

AM, AP, DT, RFA, FOTO, COND, CO₂ y TRAN se registraron en campo AF se estimó con mediciones de largo (L) y ancho (A) de hoja hechas en campo.

3.2.1. Variables Edáficas

El suelo se muestreó con barrenas tipo holandés, considerando la capa arable (0-30 cm) ya establecido el cultivo, entre la aparición del 2do y 3er par de hojas y después de que se aplicó todo el fertilizante (cuando se considera que ya forma parte de la solución del suelo).

En el Ciclo OI 1993-94, el muestreo se realizó, siguiendo la dirección de los surcos, en 5 surcos diferentes distantes 0.92 m (Figura 2). En la parte central se muestreó suelo cada 0.5 m en 5 tramos de 5 m (en cada uno de los 5 diferentes surcos), para obtener 50 muestras; en las partes extremas sur y norte se tomaron muestras de sitios separados cada metro en los tres surcos

Las muestras para el Ciclo OI 1994-95 se tomaron de 8 surcos (Figura 3). La distancia de separación entre surcos fue de 8.28 m; mientras que la distancia entre muestras sobre los surcos fue de 10 m. En total se consideraron 95 muestras de suelo superficial para este ciclo.

Las muestras de suelo del Ciclo OI 1993-94 se procesaron para su análisis en el Laboratorio de Suelos de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León (FA-UANL). Las determinaciones de Materia Orgánica (% MO), Fósforo y Potasio aprovechables se hicieron con los métodos convencionales (Cuadro 3); el nitrógeno total (NT) se estimó mediante el % de MO { $\% \text{NT} = 0.05 (\% \text{MO})$ }.

Las 72 muestras de suelo del Ciclo OI 1994-95 se analizaron en el Laboratorio de Uso y Conservación de Agua y Suelo de la Facultad de Agricultura y Zootecnia de la Universidad Juárez del Estado de Durango (FAZ-UJED), también por los métodos convencionales (Cuadro 3).

3.2.2. Variables de Planta

Los muestreos para cuantificar cada variable se hicieron en las etapas y/o fechas estándar definidas para cada una de ellas.

3.2.2.1. Muestreo no Destructivo

La misma estrategia de muestreo de suelo, pero ahora en las plantas aledañas a los puntos de muestreo de suelo, se consideró para medir la radiación fotosintéticamente activa (RFA), la fotosíntesis (FOTO), la conductancia estomatal (COND), el CO₂ absorbido (CO₂) y la transpiración (TRAN) durante la etapa de mayor actividad de las plantas de maíz (floración completa), con un Analizador de Gases Infra-rojo LI-COR 6200 (únicamente en el Ciclo OI 1994-95 el 28 de abril de 1995); la influencia de la tendencia de estas variables en el tiempo

(2.6 horas en que se usó el aparato) se removió o eliminó al considerar la diferencia entre cada una de las observaciones y la media general en los análisis estadísticos. Cada observación correspondió al promedio de tres lecturas. Las mismas plantas en que se realizaron las mediciones señaladas anteriormente, se cosecharon en el Ciclo OI 1993-94 para cuantificar la biomasa aérea (B), la biomasa ajustada por vecindad cercana (BA) y sus componentes asociados al olote (OLO), a la mazorca (MAZ) y al rendimiento comercial o grano (REN), previo secado hasta obtener peso constante. También se midieron las alturas desde el cuello de la raíz a la base de la mazorca (AM) y de planta (AP) a los 65 días después de nacida la planta. En el Ciclo OI 1994-95, los promedios de las variables B, OLO, MAZ, REN, AM, AP, diámetro de tallo (DT) y área foliar (AF) se obtuvieron de cinco plantas vecinas (las dos más próximas a la planta aledaña al sitio de muestreo de suelo y ésta última); AM, AP, DT y AF se cuantificaron a los 65 días después de nacidas las plantas. El AF (cm^2) por hoja se estimó mediante la función:

$$AF=0.75LA \quad (21)$$

donde L es el largo de la hoja de la mazorca y A el ancho de la misma hoja.

3.2.2.2. Muestreo Destructivo

Las muestras de follaje para su análisis químico se tomaron de cada una de las plantas localizadas al norte de las plantas seleccionadas para cosechar (ver 3.2.2.1. Muestreo no Destructivo). Ello se realizó antes del llenado de grano. La hoja muestreada fue la hoja inferior inmediata opuesta a la posición de la mazorca; después de su limpieza y molido se cuantificaron, en base a materia seca, sus concentraciones de N, P, K, Ca y Mg. Las determinaciones se hicieron por espectrofotometría en ambos ciclos: En el laboratorio de la FAUANL para el Ciclo OI 1993-94 y en el de la FAZ-UJED para el Ciclo OI 1994-95.

3.2.2.3. Precauciones

Se tenía previsto que las plantas dañadas por plagas y enfermedades que coincidieran con los puntos de muestreo serían consideradas para evaluar el grado de daño. Preferentemente las afectadas iban a ser sustituidas por otras vecinas sanas, para cuantificar la(s) variable(s) de interés. No fue necesario tomar en cuenta estas medidas correctivas.

3.3. Análisis Estadístico e Interpretación

3.3.1. Descripción Estadística de las Variables

Esta actividad se inició con el uso de los métodos estadísticos clásicos para caracterizar las variables. Los datos de las variables que no se distribuyeron normalmente se transformaron logarítmicamente. La prueba de normalidad usada fue la de Shapiro y Wilk. Esta prueba se sustenta en la H_0 : La distribución es normal. De manera que si el estadístico de Shapiro y Wilk, W , es significativo, la H_0 se rechaza.

Las variables de nutrición se interpretaron considerando las bases fisiológicas y la técnica DRIS.

3.3.2. Identificación de los Factores Dominantes

Para facilitar el logro de los objetivos, se decidió eliminar las variables de menor importancia; la selección se efectuó en base a un análisis de componentes principales (James y McCulloch, 1990). Las coordenadas de cada observación se incluyeron, dado que se trata de un estudio de variación geográfica o espacial, pues las conexiones causales entre parámetros de suelo y de respuesta de la planta pueden ser efectivamente detectadas, si las coordenadas espaciales de las observaciones son incluidas en el análisis (Wendroth *et al.*, 1992). El patrón espacial y la heterogeneidad son dependientes de la escala a la cual la(s) variable(s) se registra(n) (Goigel, 1989), de manera que en un sistema multivariado las variables de escala similar a la variable dependiente tendrán mayor influencia o serán determinantes. Para proporcionarle importancia semejante a cada una de las variables, éstas se estandarizaron mediante la función:

$$(\text{Observación}-\text{Media})/\text{DE} \quad (22)$$

donde DE=Desviación estándar.

Las variables estandarizadas, con media cero y varianza unitaria (1), se utilizaron para construir las matrices de correlación (Cuadros A1 y A7). Estas matrices fueron la fuente de información para el análisis de componentes principales.

El método de componentes principales permite reducir la dimensionalidad (Pla, 1986; James y McCulloch, 1990; Parent *et al.*, 1994) del problema que se está estudiando, al eliminar algunas variables si aportan poca información (Pla, 1986) y remover la redundancia y el efecto aleatorio entre variables relacionadas (Parent *et al.*, 1994). En otras palabras, el método da resultados satisfactorios si las variables están correlacionadas.

Particularmente, en estudios de variación geográfica o espacial, un análisis por componentes principales provee una reducción apropiada de datos (James y McCulloch, 1990).

El análisis por componentes principales se basa en la maximización de la varianza de transformaciones lineales de las observaciones (Pla, 1986; James y McCulloch, 1990), conocida en álgebra vectorial como generación de vectores y valores propios (Pla, 1986). Dichas transformaciones o combinaciones lineales son sensibles a los cambios de escala (Pla, 1986) y a valores extraños (James y McCulloch, 1990), por ello se usó la matriz de correlación construida con las variables estandarizadas (para homogeneizar las varianzas), previa eliminación de valores extraños, de ahí que el número de observaciones no sea similar para todas las variables del Ciclo OI 1993-1994 (Cuadro 4).

Las combinaciones lineales generadas se denominan componentes principales (CP's) y son independientes entre sí. Cada CP sintetiza la máxima variabilidad residual contenida en los datos (Pla, 1986) y explica una proporción de la variación total, misma que será igual al número de variables estandarizadas; así, todos los componentes explican el 100 % de la variación del conjunto total de observaciones. Entonces, es conveniente decidir cuántos CP's son significativos para explicar un porcentaje de variación satisfactorio. Aquellos CP's con valores propios $>100/\text{número de variables estandarizadas}$ son declarados significativos (Ovalles y Collins, 1988a).

Las combinaciones lineales de las variables estandarizadas se constituyen de vectores propios como coeficientes (Ovalles y Collins, 1988a). Por lo tanto, la colinealidad entre variables puede ser un problema. El uso de variables altamente correlacionadas produce estimadores con grandes errores estándar (SAS Institute Inc., 1982). Por lo anterior, cuando el objetivo es reducir el número de variables es conveniente:

i). Identificar los coeficientes de los vectores propios importantes en cada CP (Ovalles y Collins, 1988a; Parent *et al.*, 1994), y son aquellos con valores mayores (positivos o negativos). Subjetivamente es conveniente considerar los coeficientes cuyos valores superen a los estimados por la función (Ovalles y Collins, 1988a):

$$CS=0.5/(\text{Valor propio del CP})^{0.5} \quad (23)$$

donde CS=Criterio de selección

Cuando se dificulta identificar en cual CP es mas clara la contribución de los coeficientes de los vectores propios, es recomendable una rotación para maximizar la variación de las combinaciones lineales (Ovalles y Collins, 1988a; James y McCulloch, 1990).

ii). Seleccionar las variables que se correlacionen mas con los CP's.

$$T=1-R^2 \quad (24)$$

donde R^2 =coeficiente de correlación múltiple.

3.3.3. Identificación y Remoción de Tendencias en el Espacio

Generalmente se reconoce que las variables son aleatorias en el espacio. Sin embargo, se consideró pertinente determinar la influencia de los vectores espaciales X (distancia perpendicular a la dirección de los surcos o columnas) y Y (distancia sobre los surcos o hileras) sobre cada una de las variables (Z), a manera de tendencia lineal dentro de los rangos de los vectores X y Y.

$$Z=b_0+b_{1z}x +b_{2z}y \quad (25)$$

Los coeficientes se obtuvieron mediante análisis de regresión por mínimos cuadrados. Si los coeficientes resultan *significativos* indican la posible presencia de una tendencia. Para corroborarlo se realizó la prueba de Durbin-Watson, considerando que las variables independientes no son estocásticas (Gujarati, 1981), para probar la H_0 : no existencia de correlación serial (entre puntos vecinos) significativa de los residuales (Bresler *et al.*, 1984; Gujarati, 1981).

El coeficiente de correlación serial (R) para las observaciones es definido (Li y Keller, 1951) como

$$R=\{\sum X_i X_{i+1} - [(\sum X)^2/N]\} / \{\sum X^2 - [(\sum X)^2/N]\} \quad (26)$$

donde $\{\sum X_i X_{i+1} - [(\sum X)^2/N]\}$ es la suma corregida de productos de N pares de observaciones adyacentes, mientras que $\{\sum X^2 - [(\sum X)^2/N]\}$ es la suma de cuadrados de N observaciones. Un valor grande de R (positivo o negativo) indica pérdida de aleatoriedad, mientras que un valor pequeño sugiere aleatoriedad.

En los casos donde se rechaze la H_0 es conveniente utilizar los residuales en análisis posteriores para remover y/o evitar la influencia de la tendencia, a menos que el método indique lo contrario.

Las autocorrelaciones de primer orden (autocorrelación serial espacial, R) basadas únicamente en la variable explicatoria respectiva (*i. e.* $Z=b_0+b_{1z}x$ o $Z=b_0+b_{1z}y$) se analizaron con la finalidad de conocer la magnitud de la pérdida de aleatoriedad para las secuencias en dirección de los surcos y perpendicular a ella.

3.3.4. Análisis Estocástico Espacial de la Heterogeneidad

Posteriormente, se identificó la estructura de la variación de cada proceso, mediante las técnicas de correlación espacial agrupadas en términos de geoestadísticas. Los variogramas se estandarizaron (Rossi *et al.*, 1992) con el objetivo de minimizar e incrementar la certidumbre de las inferencias respecto a la comparación entre variables. Los semivariogramas experimentales se ajustaron a modelos teóricos con umbral mediante el procedimiento de mínimos cuadrados.

El programa de computación utilizado fue el GS+: Geostatistics for Environmental Sciences, versión 2.3 (Gamma Design Software, 1995).

3.3.5. Análisis Fractal

La dimensión fractal para cada variable identificada como importante, mediante el análisis de componentes principales, se estimó mediante la Ecuación 10, previa determinación de las semivarianzas (Ecuación 8) para cada intervalo de separación (h). El programa de computación utilizado fue el GS+: Geostatistics for Environmental Sciences, versión 2.3 (Gamma Design Software, 1995).

3.3.6. Interpolación o Predicción del Rendimiento

La interpolación se realizó mediante el sistema kriging (Ecuaciones 11-16). Los 10 vecinos más cercanos se usaron para la interpolación en cada punto.

Finalmente, se planteó generar un modelo estocástico espacial, mediante un análisis de regresión múltiple por mínimos cuadrados; dicho modelo debería explicar satisfactoriamente, en términos de precisión e incesgadura, el rendimiento con el menor número razonable de variables posible, pues ha sido demostrado que ello es factible y permitiría obtener un mejor entendimiento del efecto de las variabilidades edáfica y de las propias plantas con el objetivo de mejorar el manejo del suelo y del cultivo.

4. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1. Descripción Estadística de las Variables

En los Cuadros 4 y 5 se aprecian los estimadores estadísticos básicos y las unidades de las variables consideradas en los Ciclos OI 1993-94 y OI 1994-95, respectivamente. También se muestra, para ambos ciclos, el tercer (Sesgo) y cuarto (Kurtosis) momentos en torno a la media para caracterizar las distribuciones no normales, principalmente (Snedecor y Cochran, 1967) y en las últimas dos columnas se encuentran los resultados de la prueba de normalidad mediante el estadístico de Shapiro y Wilk (W).

Un análisis comparativo de varianzas entre variables correspondientes y expresadas en las mismas unidades para ambos ciclos indicó heterocedasticidad para la mayoría: ARE, LIMO, MO, CE, OLO, MAZ, REN, AP, Pf, Kf, Caf, Mgf, N/P, N/K, P/K, Ca/N, Ca/P, Ca/K, Mg/N, Mg/P, Mg/K, Mg/Ca, IN, IP, IK, ICa, IMg e IBN. Esto sugiere diferencias entre ciclos debido a situaciones intrínsecas a los ciclos (clima y manejo), así como a la confiabilidad de los análisis en los dos laboratorios y a las escalas consideradas. Únicamente Nf, Pf, N/P y N/K mostraron mayor heterogeneidad en el Ciclo OI 1993-94, lo que indica la importancia de dichas variables en el mencionado ciclo agrícola.

4.1.1. Ciclo OI 1993-94

Considerando $p < 0.05$ se rechaza la hipótesis de que las observaciones se distribuyen normalmente en los casos de pH, MO, NS, PS, KS, AM, AP, Pf, Kf, P/K, Ca/P, Ca/K, Mg/P y Mg/Ca para el Ciclo OI 1993-94 (Cuadro 4). Los valores negativos del sesgo en pH, AM y AP indican que los valores mayores son cercanos a la media, pero los menores, que son dominantes en la distribución, se ubican en clases inferiores a la de la media. En el resto de los casos con distribución no normal, los valores del sesgo son positivos, y permiten inferir que los valores menores son cercanos a la media; sin embargo, los valores mayores a la media son dominantes y se ubican en clases superiores a la de la media, particularmente en los casos de MO, NS, KS, Kf, Ca/K y Mg/Ca (Sesgo > 1). Los valores de kurtosis positivos indican que las distribuciones son leptokúrticas, mientras que los negativos indican que son platikúrticas (Snedecor y Cochran, 1967). MO, NS, KS, AP, Kf, Ca/P, Ca/K, Mg/Ca e ICa son marcadamente leptokúrticas, de manera que un gran número de observaciones se distribuyen cerca de la media,

Cuadro 4. Descripción estadística de las variables edáficas y de plantas en *Zea mays* L. Ciclo OI 1993-94.

Variable	n	Media	Mínimo	Máximo	Varianza	DE	CV	Sesgo	Kurtosis	W	p<
ARE (%)	89	33.2418	28.1200	38.9600	4.105	2.02618	6.0953	-1.34302	.200511	.98646	.8616
LIMO (%)	89	27.8912	23.0000	33.3600	4.530	2.12848	7.6314	.290910	-.183338	.97129	.2055
ARC (%)	89	38.8670	35.3600	42.1600	2.214	1.48786	3.8281	-.075200	-.188758	.97516	.3380
pH	91	7.4824	6.8000	8.0000	.083	.28852	3.8560	-.322762	-.856406	.93894	.0005
MO (%)	90	1.4391	.9000	2.4000	.056	.23585	16.3887	1.262329	3.317710	.90119	.0000
CE(dSm ⁻¹)	91	1.5709	1.0000	2.2000	.063	.25056	15.9501	.237967	-.154351	.96763	.1153
NS (%)	90	.0720	.0450	.1200	.000	.01179	16.3750	1.262329	3.317710	.90119	.0000
PS (ppm)	91	3.2331	1.2280	7.0570	1.503	1.22612	37.9239	.915608	-.562932	.92882	.0000
KS (kg ha ⁻¹)	91	384.5670	248.1498	736.8617	8939.244	94.54758	24.5855	1.566154	2.830916	.86643	.0000
OLO (g)	94	21.4670	11.2000	32.2000	22.968	4.79248	22.3249	.202699	-.259424	.97307	.2430
MAZ (g)	94	137.0011	63.7000	192.8000	879.162	29.65067	21.6426	-.278236	-.340589	.97307	.1143
REN (g)	94	115.3596	40.3000	162.3000	663.393	25.75642	22.2884	-.413911	.011150	.96801	.1542
B (g)	94	219.7287	103.3000	317.9000	2126.367	46.11255	20.9861	-.100687	-.403633	.97774	.4328
BA (g)	94	220.4168	93.0359	346.1359	2471.877	49.71797	22.5563	.026078	-.296153	.98629	.8488
AM (cm)	94	63.6702	43.0000	76.5000	54.503	7.38261	11.5951	-.474627	-.313928	.96009	.0286
AP (m)	93	1.5904	1.3000	1.7800	.010	.09853	6.1953	-.833550	1.190342	.93749	.0003
Nf (%)	95	2.0841	1.6810	2.4514	.022	.14885	7.1422	.036996	.137952	.98713	.8788
Pf (%)	92	.4044	.2647	.6789	.006	.07583	18.7512	.826583	.962456	.95398	.0097
Kf (%)	94	2.2664	1.3989	4.2432	.319	.56471	24.9166	1.022781	1.225066	.92986	.0000
Caf (%)	95	.9127	.3882	1.4780	.038	.19590	21.4638	.350930	.631465	.98114	.6015
Mgf (%)	95	.6551	.3347	.9785	.016	.12509	19.0948	-.086133	.091868	.98627	.8468
N/P	95	5.2147	2.1067	7.9377	1.121	1.05900	20.3079	.001354	-.583770	.98581	.8284
N/K	94	.9738	.4952	1.5784	.060	.24472	25.1304	.279648	-.409810	.96347	.0531
P/K	91	1.895	.0820	.4170	.004	.06420	33.8786	.637330	.417416	.95170	.0065
Ca/N	95	.4402	.1799	.6545	.010	.09825	22.3194	.089880	-.345467	.97997	.5407
Ca/P	92	2.3298	1.1910	5.0759	.438	.66145	28.3908	.877039	1.925418	.95242	.0071
Ca/K	94	.4230	.1365	.9533	.017	.13228	31.2719	1.195540	3.411113	.93378	.0001
Mg/N	95	.3163	.1593	.4657	.004	.06576	20.7904	-.068280	-.314068	.97908	.4952
Mg/P	92	1.6749	.9171	2.7582	.171	.41390	24.7119	.536471	.0097327	.96068	.0345
Mg/K	94	.2994	.1521	.53251	.005	.07071	23.6172	.508357	.1557159	.97534	.5267
Mg/Ca	95	.7462	.3567	1.5921	.041	.20177	27.0397	1.047532	2.689589	.94526	.0013
IN	94	-51.1915	-80.9593	-21.0458	150.009	12.24783	23.9255	-.061812	.128756	.98136	.6156
IP	91	.8317	-25.7286	29.7906	142.627	11.94264	1435.93	.014648	-.377757	.98167	.6397
IK	91	-6.8024	-32.9338	20.8424	124.025	11.13665	163.72	.041745	-.125502	.98445	.7753
ICa	92	15.7566	-18.8565	46.0566	112.144	10.58983	67.2088	-.082689	1.346924	.98255	.6814
IMg	91	40.9311	14.9498	65.1702	116.914	10.81268	26.4168	-.184729	-.138070	.97989	.5491
IBN	91	128.2705	57.4731	187.9394	755.592	27.48803	21.4297	-.053947	-.298611	.98104	.6074

por lo que sus varianzas son mayores a la de una distribución normal estándar (Snedecor y Cochran, 1967).

Cotejando las variables de nutrición concentraciones y proporciones de nutrientes con los valores medios óptimos (normas indicadas en el Cuadro 2) se aprecia lo siguiente:

i). Nutrientes. En general, el Nf es menor y el Mgf es mayor que la concentración óptima (3.1 % y 0.3 %, respectivamente); esto sugiere deficiencias de nitrógeno y excesos de magnesio en la parcela experimental. La deficiencia de N puede atribuirse a un agotamiento de dicho elemento en el suelo, puesto que ha sido explotado durante mucho tiempo con maíz como monocultivo; mientras que el exceso de Mg es explicable porque las plantas tienden a absorber mas cantidades de dicho nutriente, Ca y Mn en suelos de origen calcáreo (Dara *et al.*, 1992) ricos en esos elementos. La mayoría de las plantas presentaron concentraciones mayores que el

Cuadro 5. Descripción estadística de las variables edáficas y de plantas en *Zea mays* L. Ciclo OI 1994-95.

Variable	n	Media	Minimo	Maximo	Varianza	DE	CV	Sesgo	Kurtosis	W	p<
Pw (%)	72	10.343	8.061	15.769	1.81	1.3460	13.0136	1.51395	4.889851	.88460	.0000
ARE (%)	72	39.118	36.200	42.180	1.33	1.1532	2.9480	.58793	.281752	.81351	.0000
LIMO (%)	72	22.847	20.000	26.000	2.58	1.6068	7.0329	.08827	-.632591	.90122	.0000
ARC (%)	72	38.026	33.820	41.820	2.17	1.5401	4.0501	-.22879	.412889	.92529	.0000
pH	72	7.715	7.170	8.150	.06	.2385	3.0914	-.10299	-.900929	.95929	.0596
MO (%)	72	1.590	.900	2.200	.03	.1801	11.3270	-.10354	3.716878	.92971	.0006
CO ₃ (%)	72	14.444	11.700	19.300	2.89	1.6992	11.7640	1.00889	.465130	.90703	.0000
CE (dS m ⁻¹)	72	2.586	1.450	4.560	.50	.7042	27.2312	.72729	.035251	.93750	.0021
CaS (meq l ⁻¹)	72	10.275	4.000	20.400	17.22	4.1500	40.3893	.59963	-.469691	.93314	.0010
MgS (meq l ⁻¹)	72	6.685	2.800	13.000	5.41	2.3253	34.7838	.93177	.371389	.91726	.0001
NaS (meq l ⁻¹)	72	8.375	5.400	12.700	2.28	1.5086	18.0131	.48468	.787398	.95922	.0590
KSS (meq l ⁻¹)	72	.732	.520	1.140	.02	.1404	19.1803	.53878	-.251613	.94378	.0057
HCO ₃ (meq l ⁻¹)	72	3.804	0.000	14.100	4.01	2.0026	52.6445	1.63978	9.291849	.84063	.0000
SO ₄ (meq l ⁻¹)	72	11.032	1.600	25.300	38.41	6.1977	56.1793	.68847	-.329158	.92137	.0001
ClS (meq l ⁻¹)	72	10.486	3.300	22.200	20.14	4.4873	42.7932	.76791	-.306215	.91492	.0000
PSI (%)	72	2.961	1.600	4.400	.46	.6757	22.8199	.00537	-.692398	.97058	.2549
NS (ppm)	72	34.583	10.000	120.000	450.92	21.2349	61.4027	1.97277	4.386955	.77216	.0000
PS (ppm)	72	12.597	8.000	28.000	15.31	3.9134	31.0661	1.42706	2.944104	.84368	.0000
KS (ppm)	72	628.667	357.000	825.000	11575.77	107.5908	17.1141	-.37601	-.585970	.96082	.0738
OLO (g)	72	15.385	11.200	18.800	2.99	1.7288	11.2369	-.09647	-.517361	.97771	.5203
MAZ (g)	72	117.125	85.300	155.900	250.38	15.8233	13.5097	.02958	-.377569	.97935	.5937
REN (g)	72	101.740	73.100	137.100	202.64	14.2351	13.9916	.04082	-.366354	.97948	.5999
AP (m)	72	1.308	1.140	1.410	.00	.0557	4.2584	-.61633	.564913	.96458	.1224
DT (cm)	72	1.842	1.500	2.210	.05	.1616	8.7731	.08388	-.397535	.97827	.5451
AF (cm ²)	72	429.102	326.025	520.125	1884.59	43.4119	10.1169	-.18353	-.331633	.97799	.5324
RFA (quantums)	72	2297.766	2068.422	2546.391	6992.57	83.6216	3.6393	-.01309	1.067647	.98353	.7791
FOTO (μmol m ⁻² s ⁻¹)	72	20.957	12.793	31.009	9.75	3.1231	14.9024	.25039	.516644	.98777	.9225
COND (mol m ⁻² s ⁻¹)	72	.730	.456	1.229	.03	.1585	21.7123	.50993	.314385	.97221	.3054
CO ₂ (ppm)	72	191.703	142.144	227.853	324.76	18.0211	9.4005	-.43962	-.059987	.97477	.3976
TRAN (mmol m ⁻² s ⁻¹)	72	18.264	13.126	25.300	6.35	2.5193	13.7938	.80724	-.598696	.94699	.0095
Nf (%)	72	2.638	2.300	2.970	.02	.1544	5.8529	-.17979	-.783279	.96057	.0712
Pf (%)	72	.310	.200	.370	.00	.0466	15.0322	-.95913	.012415	.85669	.0000
Kf (%)	72	1.294	.720	1.750	.04	.2085	16.1128	-.15836	.093465	.97490	.4027
Ca _f (%)	72	.690	.460	.930	.01	.0887	12.8551	.25884	.211255	.94568	.0077
Mg _f (%)	72	.312	.170	.520	.01	.0773	24.7756	.35559	-.080234	.95124	.0183
N/P	72	8.781	6.378	13.050	3.30	1.8178	20.7015	1.00386	-.123484	.85401	.0000
N/K	72	2.096	1.453	3.417	.15	.3861	18.4208	.84043	1.276455	.94996	.0150
P/K	72	.243	.171	.444	.00	.0445	18.3127	1.68924	5.096038	.89069	.0000
Ca/N	72	.263	.166	.351	.00	.0402	15.2852	.15705	-.276405	.98053	.6473
Ca/P	72	2.285	1.444	3.600	.22	.4725	20.6783	.94329	.535233	.91946	.0001
Ca/K	72	.546	.329	.903	.01	.1059	19.3956	1.10433	1.634959	.91931	.0001
Mg/N	72	.119	.061	.194	.00	.0314	26.3865	.47997	-.032976	.95936	.0602
Mg/P	72	1.016	.500	1.625	.06	.2417	23.7894	.37860	.001138	.97271	.3222
Mg/K	72	.242	.119	.361	.00	.0513	21.1983	-.09063	.282888	.97204	.2996
Mg/Ca	72	.452	.236	.627	.01	.0968	21.4159	-.32413	-.635977	.95120	.0181
IN	72	-5.705	-21.472	10.459	65.07	8.0665	141.393	-.09854	-.767744	.96139	.0798
IP	72	-2.065	-19.037	11.762	53.10	7.2869	352.876	-.43479	-.330679	.96079	.0735
IK	72	-18.963	-48.066	-8.530	41.83	6.4679	34.1080	-.17196	4.881664	.88370	.0000
ICa	72	14.737	1.566	29.191	30.89	5.5578	37.7132	.17434	.303584	.98347	.7766
IMg	72	11.995	-6.439	29.955	55.16	7.4270	61.9174	-.29294	.356787	.97849	.5551
IDN	72	60.159	25.215	96.482	276.63	16.6322	27.6471	-.11981	-.668313	.97222	.3056

nivel óptimo de P (0.3 %), de K (2.1 %) y de Ca (0.7 %). Posiblemente el P, a manera de fertilizante, no se distribuyó uniformemente en la parcela experimental, o bien se fijó irregularmente de acuerdo a la heterogeneidad edáfica. Los casos de K y Ca pueden atribuirse a mecanismos similares al del Mg.

ii). Proporciones de nutrientes. Todas las plantas mostraron valores de N/P menores a la norma (9.035) (Cuadro 2), de manera que, interpretando el modelo de la Figura 1, las insuficiencias de N con respecto a P fueron un aspecto dominante en la parcela experimental. Sánchez (1995) concluyó que las concentraciones de N no fueron diferentes al considerar varios niveles de N como fertilizante (en un experimento colateral), pero en general fueron menores a la concentración óptima; ello sugiere la posible respuesta a niveles mayores de N que los experimentados y al utilizado por el productor. La mayoría de las plantas también mostraron insuficiencias de N con respecto a K; esta interacción reafirma la posible respuesta a más N y quizá a K, porque una gran cantidad de plantas presentaron valores de N/K inferiores a la norma correspondiente (1.463), indicada en el Cuadro 2. La respuesta a la fertilización potásica en términos de concentración de K, con diferencias estadísticas significativas, en el follaje del mismo material genético fue comprobada por Sánchez (1995); mientras que la respuesta a la fertilización nitrogenada se expresó en rendimiento, e incluso, las plantas presentaron síntomas de deficiencias de N por efecto de los tratamientos con menos N. Esto explica los valores de N/P y N/K bajos. Asimismo, la mayoría de las plantas mostraron excesos relativos de P y Ca con respecto a K, y Mg con respecto a Ca, mientras que todas presentaron excesos de Ca con respecto a N y P, y de Mg con respecto a P y K. Son característicos los contenidos excesivos de Ca y Mg, y deficiencias de K en el follaje de las plantas de maíz Pioneer H-3044 en la parcela experimental, a pesar de que la mayoría de las plantas presentaron concentraciones de K mayores que la considerada como óptima. En general, los resultados son lógicos debido a la naturaleza calcárea del suelo de la parcela experimental.

El orden de requerimiento identificado con los índices DRIS (Cuadro 4) para las medias de las variables es acorde a la interpretación de los valores medios de las concentraciones y proporciones de nutrientes:

$N > K > P > Ca > Mg$

4.1.2. Ciclo OI 1994-95

La hipótesis de que las observaciones se distribuyen normalmente ($p < 0.05$) se rechaza para los casos de Pw, ARE, LIMO, ARC, MO, CO₃, CE, CaS, MgS, KSS, HCO₃, SO₄, CIS, NS, PS, TRAN, Pf, Caf, Mgf, N/P, N/K, P/K, Ca/P, Ca/K, Mg/Ca e IK (Cuadro 5).

Los valores del sesgo indican distribuciones asimétricas negativas para ARC, MO, Pf, Mg/Ca e IK, lo cual permite inferir que los valores mayores de dichas variables son cercanos a

la media, pero los menores a esta son los dominantes y se ubican en clases inferiores a la de la media en la distribución de frecuencias. Las distribuciones no normales restantes son positivamente asimétricas, en cuyos casos las observaciones dominantes son mayores a la media, principalmente en los casos de Pw, CO₃, HCO₃, NS, PS, N/P, P/K y Ca/K (Sesgo >1).

Asimismo, las distribuciones de Pw, MO, HCO₃, NS, PS, RFA, N/K, P/K, Ca/K e IK son claramente leptokúrticas (Kurtosis >1), lo cual significa que la mayoría de las observaciones se ubican alrededor de la media y sus varianzas son significativamente mayores a la de la distribución normal estándar (Snedecor y Cochran, 1967).

Considerando la caracterización de las variables de nutrición y las normas de referencia asociadas (Cuadro 2), se aprecia que:

i). Nutrientes. Todas las plantas tuvieron concentraciones de N y K menores que las óptimas (3.1 y 2.1 %, respectivamente) y la mayoría de P y Ca menores que las normas (0.3 y 0.7 %, respectivamente); mientras que la mayoría de las plantas presentaron concentraciones mayores de Mg que la óptima (0.3 %). Esto sugiere deficiencias de N y K y excesos de Mg. La diferencias con respecto al ciclo pasado, radican en una mayor concentración de N y una deficiencia de K mas severa en las hojas por efecto de la fertilización nitrogenada (Cuadro 1). En el Ciclo OI 1993-94 se usaron 18-46-0, 46-0-0 y 32-0-0; mientras que en el Ciclo OI 1994-95 se utilizaron 12-32-10-10, 46-0-0 y 20.5-0-0. Ello sugiere que el fertilizante 20.5-0-0 mezclado con 46-0-0 es mas eficiente que el 32-0-0, al aplicarlos al momento del 1er cultivo. La deficiencia de K evidenciada coincide con la respuesta a la fertilización potásica señalada por Sánchez (1995).

ii). Proporciones de nutrientes. La mayoría de las observaciones de N/P, N/K, Ca/P, Mg/N, Mg/P y Mg/K son mayores a las normas, lo cual sugiere excesos de N y Mg con respecto a P y K y de Mg y Ca con respecto a N y P, respectivamente, si se considera el modelo DRIS (Figura 1), o bien insuficiencias relativas de P y K con respecto a N y Mg y de N con respecto a Mg. La suficiencia de N con respecto a P y K se explica debido a una mejor fertilización nitrogenada en el Ciclo OI 1994-95. Asimismo, todas las plantas presentaron proporciones P/K, Ca/K y Mg/K mayores que las normas, sugiriendo excesos de P, Ca y Mg con respecto a K. Esta insuficiencia de K fue evidenciada mediante la respuesta de las plantas a la fertilización potásica (Sánchez, 1995). La mayoría de las plantas mostraron menor valor de la proporción Mg/Ca que la norma, lo cual puede atribuirse a que hubo menor cantidad de iones cálcicos y magnésicos aprovechables por las plantas durante este ciclo particularmente seco.

Así, el Mg fue insuficiente con respecto a Ca, pero excesivo con respecto a N, P y K; mientras que el Ca fue excesivo con respecto a N, P, K y Mg; esto resulta acorde con el orden de requerimiento en base a los valores medios de los índices (Cuadro 5):

$$K > N > P > Mg > Ca$$

Este orden y la interpretación de las concentraciones y proporciones indica la factible respuesta del maíz a la aplicación de N y K en forma de fertilizantes en años secos. Es importante señalar que, en los dos Ciclos, las concentraciones de Mg ilustran que dicho elemento fue suficiente con respecto a los otros elementos.

4.2. Transformación de Variables con Distribución no Normal

Con el propósito de identificar variables con distribución log normal se realizó la transformación de los valores de las variables con distribución no normal a $p > 0.01$ (Cuadros 4 y 5), mediante logaritmos neperianos (\ln); para ello se adicionó, antes de la transformación, una constante (valor absoluto) a todos los valores de las variables cuyos rangos oscilaran de <1 a >1 , para hacer los valores >1 ; con ello se evita la discontinuidad de los \ln 's del rango <1 a >1 . Posteriormente, se realizó una prueba de normalidad, mediante el estadístico de Shapiro y Wilk, a las nuevas variables. Se logró que P_s , P_f , K_f , Ca/P , Ca/K , Mg/P y Mg/Ca , para el Ciclo OI 1993-94, y CE , CaS , MgS , ClS , $TRAN$, N/K y Ca/P , para el Ciclo OI 1994-95, se distribuyeran log normal. Es notable que Ca/P se distribuye log normal en forma consistente (en ambos ciclos).

Los análisis inmediatos posteriores se realizaron considerando las variables originales con distribución normal, las variables con distribución log normal, y las variables originales con distribución no normal, pero que no se distribuyeron log normal, tal como se especifica en los Cuadros A1 y A7 para los Ciclos OI 1993-94 y OI 1994-95, respectivamente.

4.3. Identificación de los Factores Dominantes

En el análisis de componentes principales, también las coordenadas de cada observación se incluyeron dado que se trata de un estudio de variación geográfica o espacial, pues las conexiones causales entre parámetros de suelo y de respuesta de la planta pueden ser efectivamente detectadas, si las coordenadas espaciales de las observaciones son incluidas en el análisis (Wendroth *et al.*, 1992).

4.3.1. Correlación Entre Variables Estandarizadas

Los coeficientes de correlación (r) de Pearson (Cuadros A1 y A7) sugieren, en general, que existen correlaciones significativas entre variables de la misma naturaleza (grupos de variables). Por ejemplo, son significativas las correlaciones entre las variables de textura (ARE, LIMO y ARC), de masa vegetal (REN, MAZ, B, BA) en los dos ciclos, y de alturas (AM y AP) y de intercambio gaseoso (FOTO, COND, CO₂ y lnTRAN) en el Ciclo OI 1994-1995; ello implica colinealidad y, posiblemente, no todas las variables de cada grupo son necesarias para los análisis vinculados a los objetivos. En el caso de las variables químicas de suelo y de nutrición vegetal (concentraciones de nutrientes en el follaje, proporciones e índices), no se aprecia un patrón de correlaciones como el de los grupos previamente señalados, aunque en este grupo es donde se presenta el mayor número de correlaciones significativas. Es claro entonces que el sistema en estudio es complejo, lo cual dificulta la decisión de seleccionar las variables más importantes. En consecuencia, es imprescindible tomar en cuenta los resultados de los análisis por componentes principales.

También es evidente la posible presencia de una tendencia en la parcela experimental (*i. e.* correlaciones significativas entre un vector espacial, X o Y, y alguna otra variable) en ambos ciclos (Cuadros A1 y A7).

4.3.2. Ciclo OI 1993-94

Solamente tres CP's (Cuadro A2) presentaron valores propios significativos que representaron al menos 2.94 % de la varianza total de las variables registradas durante el Ciclo OI 1993-94; en conjunto explican el 53.06 % de la variación total de 34 variables estandarizadas.

La contribución de Caf, Ca/N, Mg/N e Ica es importante en los CP 2 y 3 (Cuadro A3). Esto sugiere la necesidad de maximizar la variación de las combinaciones lineales para aclarar la contribución de esas variables.

Los coeficientes del primer vector propio (Cuadro A3) permiten apreciar la importancia relativa de lnKf, N/K, P/K, lnMg/P, IP e IK. Sus signos indican que plantas de maíz con valores grandes de lnKf, lnMg/P e IK presentaron valores pequeños de N/K, P/K e IP. Al maximizar la variación de las combinaciones lineales (Cuadro A5), se aprecia que en el CP 1 es mayor la

importancia de las variables $\ln Pf$, P/K , Mg/K , IP e IK , además del vector espacial X (surcos). Ello significa que en los surcos de la sección este de la parcela se ubicaron las plantas con los valores mas pequeños de $\ln Pf$, P/K , Mg/K e IP , y los valores mas grandes de IK . Es notable la importancia de una posible tendencia dirección oeste-este o este-oeste de las variables $\ln Pf$, P/K , Mg/K e IP .

En el segundo vector propio, $CP 2$, se aprecian coeficientes importantes negativos de Caf , Mgf , Ca/N , Mg/N , Mg/K , IK e IBN , y positivo de IN (Cuadro A3); ello indica que las plantas con menor IBN presentan mejor nivel de suficiencia de N con respecto a P , Ca y Mg , pero principalmente con K .

Maximizando la variación de la combinación lineal, se reafirma la importancia de la contribución de Mgf , $\ln Mg/N$, IN , IMg e IBN (Cuadro A5). Es interesante resaltar la dominancia de las variables que involucran a Mgf en el $CP 2$. En cambio, el Caf influye notablemente en el $CP 3$, pues antes de ser maximizada su variación se aprecia la importancia de Caf , Mgf , Ca/N , $\ln Ca/P$, $\ln Ca/K$, Mg/N , $\ln Mg/Ca$, ICa e IMg (Cuadro A3); pero, después de la rotación de las combinaciones lineales, se aclara la importancia de Caf , Ca/N , $\ln Ca/P$, $\ln Ca/K$, $\ln Mg/Ca$ e ICa (Cuadro A5).

En los tres CP 's de mayor importancia relativa, ningún coeficiente es mayor que el CS indicado en el último renglón de los Cuadros A3 y A5. Esto indica que el mencionado CS dado por Ovalles y Collins (1988a) es estricto, o bien que la contribución de cada una de las variables en la variación de las combinaciones lineales es no significativa. Rechazando la última aseveración, se considera objetivo no eliminar a las variables con coeficientes >0.10 o <-0.10 .

La eliminación de variables se complementó mediante la correlación entre cada uno de los CP 's y las variables. La magnitud de la correlación muestra la contribución relativa de cada variable en el respectivo CP (Broschat, 1979). Un valor de coeficiente de correlación >0.7 se definió arbitrariamente como criterio de selección, para evitar ambigüedades interpretando variables que no se correlacionan satisfactoriamente con las combinaciones lineales.

Las variables $\ln Kf$, N/K , P/K , $\ln Mg/P$, IP e IK contribuyen mas en el $CP 1$ antes de la rotación (Cuadro A4), pero después de maximizar la variación en la primer combinación lineal (Cuadro 6) sobresalen el vector espacial surcos (X), $\ln Pf$, $\ln Kf$, N/P , P/K , Mg/K , IP e IK , lo cual manifiesta la posible presencia de una tendencia (previamente señalada) de estas variables en la parcela.

Las variables $\ln Pf$, P/K , Mg/K e IP tienen coeficientes de correlación positivos relativamente grandes en el $CP 1$, y están positivamente intercorrelacionadas como un grupo

(Cuadro 6). Por su parte, N/P e IK, cuyos coeficientes de correlación son negativos, están también positivamente intercorrelacionados como un grupo, pero están negativamente correlacionadas con las variables de coeficientes de correlación positivos (lnP/E, P/K, Mg/K e IP).

El antagonismo entre IK e IP sobresaliente en el CP 1 (Cuadro 6) es común en maíz cuando ocurren deficiencias de $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (Clark, 1970). Evidentemente, ello resulta factible en el Ciclo OI 1993-94, pues el orden de requerimiento general en base a los índices consignados en el Cuadro 4 es $\text{N}>\text{K}>\text{P}>\text{Ca}>\text{Mg}$, pero únicamente el N es insuficiente con respecto a los demás nutrientes: esta posible deficiencia de $\text{NH}_4^+\text{-N}$ puede eliminarse al fertilizar con amonio o nitrato, porque el $\text{NO}_3^+\text{-N}$ dentro de la planta es convertido a $\text{NH}_4^+\text{-N}$ via nitrato reductasa (Clark, 1970). También es explicable por un proceso de dilución de P (Terman *et al.*, 1972) y acumulación de K, ya que el NH_4^+ compete con el catión K^+ en la planta (Evans y Sorger, 1966), e incluso ambos iones se comportan en forma similar en suelos no ácidos (Springob, 1993).

Es evidente un sinergismo (Terman *et al.*, 1977; Sumner y Farina, 1986) entre N y P (signos negativos de IN e IP en el Cuadro 6).

En el CP 2 contribuyen mas Caf, Ca/N, IN e IBN antes de la rotación (Cuadro A4). La contribución importante de las variables donde participa el Ca se transfiere al CP 3 (Caf, Ca/N, lnCa/P, lnCa/K, lnMg/Ca e ICa) después de la rotación (Cuadro 6); mientras que en el CP 2 es clara la contribución de Mgf, Mg/N, IN, IMg e IBN al maximizar la variación de las combinaciones lineales (Cuadro 6). Mgf, Mg/N, IMg e IBN están negativamente correlacionadas con IN en el CP 2. Interpretando la estructura general del CP 2, se aprecia que IN define el IBN, debido a un exceso de Ca o deficiencia de N. El exceso de Ca es corroborado por la intercorrelación significativa positiva entre Caf, Ca/N e IBN, y la intercorrelación negativa de esas variables con IN.

El CP 3 está principalmente conformado por Caf, Ca/N, lnCa/P, ln Ca/K e ICa y lnMg/Ca (Cuadro 6). La estructura del grupo de los índices nutricionales del CP 3 [signo positivo (ICa) versus signos negativos (IN, IP, IK e IMg)] es soportada por algunos principios que gobiernan el equilibrio de los nutrientes en las plantas, puesto que los iones NH_4^+ , K^+ y Mg^{2+} pueden ser antagónicos al ion Ca^{2+} (Marschner, 1986; Parent *et al.*, 1993).

En el Cuadro A6 se aprecia que ninguna de las variables es eliminada mediante el criterio de tolerancia. Es decir, todas las variables mostraron $T>0.01$ como función de 1, 2 o 3 CP's.

Cuadro 6. Correlaciones entre los tres primeros componentes principales (CP) y las variables edáficas y de plantas en *Zea mays* L. después de una rotación (maximización de la varianza de las combinaciones lineales). Ciclo OI 1993-94.

Variable	CP 1	CP 2	CP 3
X	<u>-.728481</u>	.027209	.046922
Y	-.044554	-.051298	.281362
ARE	.076512	.087125	-.146548
LIMO	-.177137	-.001704	.115601
ARC	.143046	-.118363	.040561
pH	-.298257	-.013922	.024942
MO	.270397	-.139777	-.064631
CE	-.092099	.007952	.182316
lnPS	-.202800	.295970	.004779
KS	.030416	-.072425	-.011493
REN	-.019303	.233333	.090874
AM	-.246251	.004167	.293555
AP	.035114	.132319	.315381
Nf	.110337	-.346537	-.032075
lnPf	<u>.822650</u>	.118748	-.165183
lnKf	-.712090	.447261	-.122822
Caf	.089069	.277057	<u>.891867</u>
Mgf	.029179	<u>.916119</u>	-.109158
N/P	<u>-.763636</u>	-.260596	.161445
N/K	.693368	-.498410	.117682
P/K	<u>.940805</u>	-.200557	-.013246
Ca/N	.043168	.377697	<u>.863812</u>
lnCa/P	-.457765	.156292	<u>.821329</u>
lnCa/K	.587669	-.126676	<u>.724192</u>
Mg/N	-.002256	<u>.966653</u>	-.086223
lnMg/P	-.568039	.660912	.036685
Mg/K	<u>.751266</u>	.335646	.009508
lnMg/Ca	-.056183	.422614	<u>-.826412</u>
IN	-.151623	<u>-.857423</u>	-.187936
IP	<u>.846799</u>	-.165617	-.260454
IK	<u>-.858768</u>	.187264	-.219231
ICa	.072739	.048590	<u>.964655</u>
IMg	.005805	<u>.878744</u>	-.243727
IBN	.313449	<u>.791047</u>	.338018
Varianza explicada	7.047124	5.859986	5.133242

En términos generales, los tres primeros CP's explican una gran proporción de la variación de las variables de nutrición vegetal, pero una mínima de las variables de textura, de masa vegetal, de alturas y químicas de suelo. De singular interés resulta que los tres primeros CP's explican una mínima proporción de la variación del rendimiento (REN), misma que se incrementa hasta 41.89 % (R^2 , Cuadro A6) al considerar todas (34) las combinaciones lineales.

Las variables vector espacial surcos (X), $\ln Pf$, N/P , P/K , Mg/K , IP , IK , Mgf , Mg/N , IN , IMg , IBN , Ca/N , $\ln Ca/P$, $\ln Ca/K$, $\ln Mg/Ca$ e ICa (subrayadas y en negritas en el Cuadro 6) fueron seleccionadas por el análisis de componentes principales, como las que explican la parte mas importante de la variación del sistema en estudio para el Ciclo OI 1993-1994 y son las determinantes para propósitos específicos (Ovalles y Collins, 1988a).

4.3.3. Ciclo OI 1994-95

En el Cuadro A8 se muestran los valores propios de los siete primeros componentes principales, mismos que resultaron significativos porque representan al menos 1.89 % de la varianza total de las 53 variables estandarizadas consideradas para el Ciclo OI 1994-95; los siete explican el 66.71 % de la variación total de las variables.

Los coeficientes >0.1 del CP 1 (Cuadro A9) indican la importancia relativa de Mgf y Mg/N . Considerando el signo del vector espacial surcos (X) y los de esas variables; es interesante inferir que en los surcos del oeste de la parcela experimental es donde se presentaron plantas de maíz con las concentraciones mas altas de Mgf y los valores mas grandes de la proporción Mg/N . Al maximizar la variación de las combinaciones lineales, las variables de mayor importancia relativa son Mgf , Mg/N , Mg/P , Mg/K , Mg/Ca e IMg (Cuadro A11). Resalta la importancia de las variables que involucran al Mgf en el CP 1.

En el CP 2 (Cuadro A9) únicamente $\ln Ca/P$ es variable de importancia relativa. Su contribución importante se transfiere al CP 3 después de la rotación (Cuadro A11). El componente etiquetado como CP 2 después de maximizar la variación, reduce su importancia al explicar un porcentaje de variación menor, aunque sustentado prácticamente en las variables edáficas $\ln CE$, $\ln CaS$, $\ln MgS$, NaS , KSS , SO_4 , $\ln ClS$ y NS (Cuadro A11).

Por su parte, NaS , KSS , $\ln ClS$, P/K e IP son las variables de mayor importancia relativa en el CP 3 (Cuadro A9). Después de maximizar la variación de las combinaciones lineales, la contribución importante para el CP 3 es por parte de Pf , N/P , P/K e IP (Cuadro A11); los signos positivo para N/P y negativos para las otras tres formas de expresión indican que las plantas de maíz con los valores menores de Pf presentaron valores pequeños de P/K y grandes de N/P , lo cual sugiere posibles excesos de K y N o deficiencias de P .

La contribución importante de las variables $\ln CE$, $\ln CaS$, $\ln MgS$, $\ln ClS$, Kf , Ca/K , IK e IBN es notable en el CP 4 (Cuadro 12 R), pero al maximizar la variación de las combinaciones lineales (Cuadro A11), la importancia relativamente mayor recae en las variables que incluyen

al Kf (Kf, lnN/K, P/K, Ca/K, Mg/K e IK). Como se indicó *ut supra*, la importancia de las variables edáficas se trasladó al denominado CP 2 y explican, junto con otras variables edáficas principalmente relacionadas a salinidad, un porcentaje de variación del sistema en estudio menor al original asignado a ese componente principal.

En el CP 5, HCO₃, NS, Nf, Caf, Ca/N, Mg/P, Mg/K, Mg/Ca, ICa e IMg son importantes antes de la rotación (Cuadro A9); sin embargo, al considerar dicho procedimiento, las variables dominantes en el mencionado componente son variables que contemplan al Caf (Caf, Ca/N, lnCa/P, Ca/K, Mg/Ca e ICa), además de Nf e lBN (Cuadro A11).

Lo señalado en los párrafos inmediatos previos, para el Ciclo OI 1994-95, indican que las variables de nutrición vinculadas a los elementos Mg, P, K, Ca y N (en ese orden) son mas dominantes que las asociadas a la salinidad en el sistema complejo en estudio, y que este aspecto debe manejarse si se desea mejorar el balance nutricional de las plantas de maíz que crecen en el predio de la parcela experimental.

En el CP 6 las variables de mayor importancia relativa son el vector espacial hileras o distancia sobre los surcos (Y), Pw, pH, CO, PSI, DT, FOTO, COND y lnTRAN (Cuadro A9). Al efectuar la rotación, las variables determinantes en el CP 6 son Y, Pw, LIMO, ARC, FOTO, COND y lnTRAN (Cuadro A11); los signos de los coeficientes indican que las plantas de la sección norte (al final de los surcos) crecieron en los sitios menos arcillosos de la parcela experimental y con suficiente agua, por lo que mostraron buena capacidad de intercambio de gases. Este resultado ilustra la sensibilidad del intercambio gaseoso de las plantas de maíz a las condiciones ambientales, principalmente a las edáficas humedad del suelo superficial y textura.

En el último componente principal significativo (CP 7) resaltan la importancia de LIMO, ARC, PS, KS, REN, DT, AF, FOTO, COND y lnTRAN antes de la rotación (Cuadro A9), pero después de realizarla son determinantes Y, LIMO, ARC, pH, NaS, HCO₃, PSI, PS, KS, REN, DT, AF y Pf (Cuadro A11). Los signos de los coeficientes indican que la sección sur de la parcela experimental es la menos arcillosa y por consiguiente con menos cantidad de fósforo y potasio disponibles. Esta parte de la parcela experimental sostuvo a las plantas con mayores rendimientos, de tallos mas gruesos y mayor area foliar, y con las mayores concentraciones de fósforo en la hoja de la mazorca.

Al igual que para el Ciclo OI 1993-94, en los siete CP's de importancia relativa, ningún coeficiente es mayor que el CS reportado en el último renglón de los Cuadros A9 y A11; entonces, se consideró apropiado seleccionar a las variables con coeficientes >0.10, y continuar

con la eliminación en base al criterio de correlaciones significativas (>0.70) entre cada uno de los CP's y las variables.

Únicamente cuatro variables superan la prueba de correlación antes de la rotación: Mgf, Mg/N en el CP 1; y $\ln\text{Ca/P}$ (CP 2) y P/K en el CP 3 (Cuadro A10); esto manifiesta la importancia del Mg y las interacciones entre dicho elemento y el N, y entre el P y el Ca y el K. Al maximizar la variación de las combinaciones lineales, se incrementó el número de variables que se correlacionan significativamente con los CP's (Cuadro 7).

En el CP 1, el más importante, destacan las variables donde participa el Mg: Mgf, Mg/N, Mg/P, Mg/K, Mg/Ca e IMg. La estructura general del CP 1, con respecto al grupo de los índices nutricionales y a la intercorrelación positiva entre IMg con Mgf, Mg/N, Mg/P, Mg/K y Mg/Ca, indica un incremento de la concentración de Mg y decrementos de N, P, K y Ca. Los excesos de Mg inducen deficiencias de K (Rojas, 1979) porque son antagónicos (Parent *et al.*, 1994); la relación Mg-P puede vincularse a un proceso de acumulación-dilución (Marschner, 1986; Walworth y Sumner, 1987).

En el segundo CP importante (CP 3) destacan Pf, N/P, P/K, $\ln\text{Ca/P}$ e IP. Sin embargo, la estructura general de dicho CP no es explicable en bases fisiológicas; pero es imprescindible resaltar que el pH juega un papel interesante, pues el valor positivo de 0.60 en el Cuadro 7 indica que se correlaciona negativamente con Pf, P/K e IP, y positivamente con N/P y $\ln\text{Ca/P}$. Esto permite inferir que cuando el pH es relativamente alto, se afecta negativamente la acumulación de P en la hoja de la mazorca, pero se favorecen las proporciones N/P y $\ln\text{Ca/P}$, lo cual podría deberse en parte a la formación en el suelo de fosfatos cálcicos no disponibles para la planta, o bien al incremento de la disponibilidad de formas asimilables de nitrógeno y calcio. Ya se evidenció en el Cuadro A11, la importancia de pH y LIMO (CP 7) en la parcela experimental y, precisamente, la caliza activa se asocia al limo (Sánchez, 1995).

En el tercer componente en importancia (CP 4), son dominantes las variables vinculadas al K: Kf, $\ln\text{N/K}$, Ca/K e IK. Kf e IK se correlacionan negativamente con $\ln\text{N/K}$ y Ca/K, lo cual resalta también la importancia del calcio en el suelo superficial de la parcela experimental.

Es notable la influencia del Ca sobre el K en la parcela experimental al interpretar el CP 4, pues su estructura general puede ser interpretada en términos de un antagonismo entre K y Ca en la planta (Marschner, 1986) o un contraste entre ambos elementos por dilución de K y acumulación de Ca (Walworth y Sumner, 1987).

Cuadro 7. Correlaciones entre los siete primeros componentes principales (CP) y las variables edáficas y de plantas en *Zea mays* L. después de una rotación (maximización de la varianza de las combinaciones lineales). Ciclo OI 1994-95.

Variable	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	CP 6	CP 7
X	-.374630	-.077781	-.370324	.414577	-.562500	.007914	-.113158
Y	-.091675	.079761	.118401	.019322	-.017647	.372271	-.325780
Pw	.103595	-.034601	-.353578	.243701	.391984	.389818	-.039767
ARE	-.218866	.194014	-.027044	.080329	.032836	-.227969	-.059094
LIMO	.091230	-.074209	.352732	-.215643	-.074640	.429482	.295858
ARC	.070575	-.059895	-.338279	.159532	.052383	-.270405	-.261041
pH	-.007772	-.016194	.605994	-.261976	.086157	-.192260	.302611
MO	.055646	.376016	-.032564	-.188165	.246778	-.024580	-.186611
CO ₂	.093978	-.104419	.415877	.082995	.147670	-.234755	.145905
lnCE	-.041073	<u>.918234</u>	-.084852	-.082284	-.194408	-.079863	.025550
lnCaS	-.195770	<u>.796335</u>	-.243944	.045787	-.333222	-.059874	.016756
lnMgS	.122353	<u>.855935</u>	.023844	-.204418	.001088	-.019446	-.044477
NaS	.060713	.639751	.303416	-.124399	-.149772	-.169979	.243082
KSS	-.055805	.691853	.242990	-.103986	-.047453	-.040072	.027264
HCO ₃	-.016564	-.365522	.324449	.177376	-.334724	-.095911	.241093
SO ₄	-.115437	.594845	-.542984	-.076185	-.319278	-.010687	-.129656
lnCIS	.021394	.634284	.474806	.105866	.190874	-.055941	.152391
PSI	.179568	-.298672	.507368	-.068902	.103710	-.093501	.280014
NS	.096011	.577132	-.045483	-.351246	.281272	-.131908	.228610
PS	.079687	-.204970	.144658	-.093582	.046455	-.146190	-.245376
KS	.162075	.360123	.086451	-.407439	-.008813	-.013880	-.389793
REN	-.073454	.065546	.064270	-.065999	.195640	.056229	.615986
AP	.055990	.170111	.206621	.071050	.024201	.017546	-.027409
DT	.233164	.026256	.090437	.133351	-.115286	-.098876	.587454
AF	.032825	.024701	-.087745	.018165	.035185	.094277	.562352
RFA	.076230	-.180819	.140572	.342784	-.138465	-.003533	-.099174
FOTO	.102889	.008706	.062479	.018451	-.109049	<u>.797722</u>	.061209
COND	.130890	-.137699	-.290408	.008072	.286416	<u>.766285</u>	.038900
CO ₂	-.057510	-.363492	.165013	-.178570	.215484	-.223904	.031839
lnTRAN	.147163	-.191320	.152936	-.054967	.208215	<u>.797441</u>	.036649
Nf	-.086669	-.071978	.551527	-.041577	-.563256	-.018300	.060311
Pf	.208813	-.096100	<u>-.766389</u>	-.402283	.065227	-.109548	.240324
Kf	.276391	.030433	-.042906	<u>-.912596</u>	.102952	.024489	.010616
Caf	.241511	-.201497	.176598	-.177961	<u>.822767</u>	.042742	.111524
Mgf	<u>.903263</u>	-.021287	-.017228	-.271756	.208424	.065374	.058478
N/P	-.224711	.089334	<u>.813326</u>	.352536	-.172067	.117691	-.164722
lnN/K	-.264061	-.046508	.226139	<u>.864994</u>	-.224916	-.035417	.016733
P/K	-.030072	-.115086	-.679094	.570328	.024116	-.136301	.217229
Ca/N	.237223	-.126927	-.065847	-.147816	<u>.904342</u>	.040969	.062544
lnCa/P	-.040536	-.042948	<u>.754826</u>	.249634	.509729	.121701	-.113889
Ca/K	-.077875	-.146217	.155814	<u>.787619</u>	.502524	-.021914	.066677
Mg/N	<u>.866052</u>	.004668	-.132079	-.261046	.324981	.062961	.045876
Mg/P	<u>.801449</u>	.057126	.475430	.025168	.162011	.136648	-.096435
Mg/K	<u>.823056</u>	-.059617	-.018459	.469283	.153992	.045836	.088176
Mg/Ca	<u>.872440</u>	.093336	-.143246	-.193954	-.311127	.061386	-.004770
IN	-.500993	.046020	.474909	.509118	-.434223	.000081	-.093971
IP	-.095446	-.075531	<u>-.901958</u>	-.077272	-.065002	-.157005	.195146
IK	-.141467	.116115	.089156	<u>-.902180</u>	-.171797	.053103	-.128182
ICa	-.266563	-.138126	.359621	.402488	<u>.741920</u>	.028476	.003027
IMg	<u>.960446</u>	.026365	.022385	.007346	.129808	.086399	.019962
IBN	.437362	-.032249	.163964	.472307	.653453	.103233	.078895
Variación Explicada	5.999663	5.226305	6.575246	5.824645	5.274620	2.870159	2.252545

En el CP 5 (cuarto en importancia) del Cuadro 7 las variables dominantes son Caf, Ca/N e ICa, mismas que están positivamente intercorrelacionadas. Este resultado manifiesta la importancia de una posible insuficiencia relativa de N con respecto a Ca, debido a un antagonismo o proceso de dilución-acumulación (Parent *et al.*, 1994).

El quinto CP en importancia fue el CP 2. Las variables edáficas dominantes en él están positivamente intercorrelacionadas: lnCE, lnCaS y lnMgS (Cuadro 7); ello indica que el Mg y el Ca son los elementos que definen principalmente la naturaleza salina del suelo superficial de la parcela experimental, lo cual es corroborado por el r de Pearson entre esos elementos y el lnCE (0.85 y 0.89, respectivamente, en el Cuadro A7); y son los factores responsables de las interacciones entre los iones que provocan el desequilibrio nutricional en las plantas de maíz Pioneer H-3044. Al respecto, en la literatura sobre el tópico se indica que la salinidad del medio de crecimiento de las raíces puede limitar el crecimiento de las plantas como resultado del efecto osmótico y desórdenes nutricionales (Greenway y Munns, 1980); el último mecanismo ocurre aún con relativamente bajas concentraciones salinas (Silberbush, 1993), como en el presente caso. La evidencia ilustra que la consideración de la conductividad eléctrica de la solución del suelo como índice de salinidad, y su uso por conveniencia práctica como base del concepto de potencial osmótico es sesgada, pues el principal efecto de las sales en la parcela experimental es sobre el metabolismo de las plantas de maíz mediante las interacciones entre los iones en la hoja de la mazorca. Un efecto similar del medio salino sobre las interacciones entre los iones durante la absorción de nutrientes por las raíces ha sido reportado por Mass y Hoffman (1977), Papadopoulos y Rending (1983), Akhavan-Kharazian *et al.* (1991) y modelado por Silberbush *et al.* (1993).

Por su parte, las variables de intercambio gaseoso FOTO, COND y lnTRAN son las dominantes en el CP 6 (Cuadro 7) y se correlacionan significativamente con esa combinación lineal, y positivamente entre sí.

Con el CP 7 se correlacionan positivamente las variables REN, DT y AF, aunque no significativamente al nivel definido (Cuadro 7).

Todas las variables seleccionadas por el valor de su coeficiente y grado de correlación con los diferentes CP's (variables cuyas correlaciones significativas están subrayadas y en negritas en el Cuadro 7), se sometieron a la prueba de tolerancia; ninguna resultó con $T < 0.01$, por lo que fueron seleccionadas como las que explican satisfactoriamente la variación total del sistema complejo en estudio. De sumo interés es el señalar que la proporción de la variación explicada de las variables REN y AF se incrementa sustancialmente en función del CP 7, porque son variables positiva y significativamente intercorrelacionadas junto con DT. Ello significa que el rendimiento está más en función de DT y AF que de las variables seleccionadas mediante el método de componentes principales, pero estas variables no son tan heterogéneas como las que resultaron determinantes.

4. 4. Identificación de Tendencias

Generalmente se reconoce que las variables consideradas son aleatorias en el espacio. Sin embargo, se consideró pertinente determinar la influencia de los vectores espaciales X (distancia perpendicular a la dirección de los surcos o columnas) y Y (distancia sobre los surcos o hileras) sobre cada una de las variables (Z), a manera de tendencia lineal dentro de los rangos de los vectores X y Y mediante la Ecuación 25.

4.4.1. Ciclo OI 1993-94

Los coeficientes obtenidos mediante análisis de regresión por mínimos cuadrados para el Ciclo OI 1993-94 se aprecian en el Cuadro 8. Los coeficientes significativos de las variables asociadas al CP1 (lnPf, N/P, P/K, Mg/K, IP, IK) indican la posible presencia de una tendencia en dirección este-oeste o *viceversa*. Por su parte, las variables vinculadas al CP 3 (Ca/N, lnCa/P, lnCa/K, lnMg/Ca e lCa) también indican la posibilidad de la existencia de una tendencia, tanto en dirección este-oeste como en dirección sur-norte.

Cuadro 8. Coeficientes de regresión, R^2 , la probabilidad de una F mayor ($p>F$), el estadístico de Durbin-Watson (D) y los coeficientes de correlación serial r_x y r_y para las variables dominantes. Ciclo OI 1993-94.

Variable	b_0	b_1	b_2	R^2	$p>F$	D	r_x	r_y
lnPf	2.0979	-0.033602 *	-0.000840	0.48	0.00	1.06	0.43 *	0.68 *
N/P	-21.2737	0.513000	0.011400	0.32	0.00	1.09	0.44 *	0.63 *
P/K	2.2399	-0.039286 *	-0.001114	0.43	0.00	1.36	0.33 *	0.62 *
Mg/K	2.0015	-0.031219 *	-0.002364	0.24	0.00	1.51	0.21 *	0.17
IP	381.3861	-7.180500 *	-0.326800	0.43	0.00	0.99	0.52 *	0.70 *
IK	-319.4796	5.768000 *	0.302000	0.33	0.00	1.54	0.25 *	0.47 *
Mgf	5886.3922	20.453000	-6.525000	0.00	0.96	1.57	0.19 *	0.19 *
Mg/N	-0.0938	0.008278	0.000175	0.01	0.42	1.73	0.10	0.12
IN	-64.1567	0.540000	-0.283200	0.01	0.54	1.71	0.14	0.13
IMg	5.3019	0.879763	-0.178522	0.01	0.56	1.71	0.14	0.14
IBN	269.6179	-3.538200	0.809300	0.03	0.19	1.87	0.03	0.04
Caf	10502.2475	-105.750000	79.810000	0.04	0.18	1.64	0.19	0.18
Ca/N	0.0972	0.002467	0.004377 *	0.04	0.15	1.59	0.22 *	0.20 *
lnCa/P	-5.0205	0.102020 *	0.013020 *	0.20	0.00	1.25	0.41 *	0.47 *
lnCa/K	1.8996	-0.031239 *	0.000658	0.13	0.00	1.82	0.07	0.19
lnMg/Ca	0.5328	0.005488	-0.005141 *	0.05	0.12	1.63	0.21 *	0.17
ICa	-3.0518	-0.107390	0.486680 *	0.05	0.13	1.68	0.19	0.16
REN	-64.8751	3.328900	0.024420	0.03	0.41	1.99	0.00	0.02

* Coeficiente significativo ($\alpha=0.05$)

La prueba de Durbin-Watson se realizó considerando que las variables independientes no son estocásticas (Gujarati, 1981). Los valores del estadístico de Durbin-Watson (D) en el Cuadro 8 permiten rechazar la hipótesis de no existencia de correlación serial (entre puntos o sitios vecinos) significativa de los residuales (Gujarati, 1981) para las variables lnPf, N/P, P/K, Mg/K, IP, IK, Ca/N y lnCa/P ($D \leq 1.61$), mientras que para lnCa/K la hipótesis no se rechaza ($D \geq 1.7$) y para lnMg/Ca e ICa la prueba es no concluyente ($1.61 \leq D \leq 1.7$). Ello significa que únicamente lnCa/K presenta tendencia, aunque la variación explicada por el modelo de regresión lineal en el plano (x, y) es pequeña (13.44 %).

Para las variables que no presentaron coeficientes de regresión significativos se aprecia lo siguiente (Cuadro 8): La hipótesis de no existencia de correlación serial se rechaza para Mgf; no se rechaza para Mg/N, IN, IMg, IBN y REN; y la prueba es no concluyente para Caf. Entonces, es factible que Mg/N, IN, IMg, IBN y REN sean aleatorias y espacialmente independientes, incluyendo Mgf dado el valor de $p>F$ (0.96).

4.4.1.1. Autocorrelación Serial Espacial

En el mismo Cuadro 8 se aprecia que las autocorrelaciones de primer orden, basadas únicamente en la variable explicatoria respectiva (*i. e.* $Z=b_0+b_1x$ o $Z=b_0+b_1y$), son, casi todas, positivas.

La secuencia dominante para pares de puntos vecinos entre surcos y/o sobre ellos es de valores alto-alto y/o bajo-bajo de las variables $\ln Pf$, N/P , P/K , Mg/K , IP , IK , Mgf , Ca/N , $\ln Ca/P$ y $\ln Mg/Ca$; con pérdida significativa de aleatoriedad (Li y Keller, 1951) para $\ln Pf$, N/P , P/K , IP , IK , Mgf , Ca/N y $\ln Ca/P$ por efecto de surcos e hileras y para Mg/K y $\ln Mg/Ca$ por efecto de surcos (Cuadro 8). La secuencia entre pares de observaciones vinculadas a plantas de surcos adyacentes se debe probablemente a las condiciones creadas por efecto del manejo, principalmente.

La pérdida de aleatoriedad en las variables señaladas sugiere que los principios de aleatorización y repeticiones tan usados en experimentación agrícola pueden ser inefectivos en la parcela donde se realizó el presente estudio. En especial debe tenerse cuidado cuando se analiza la información de experimentos de fertilización-nutrición.

Es conveniente realizar un análisis de la estructura de la heterogeneidad, pues la mayoría de las variables presentan correlación (dependencia) espacial y pérdida de aleatoriedad (Cuadro 8). En el caso de $\ln Ca/K$ deben involucrarse los residuales y así evitar la influencia de la tendencia.

4.4.2. Ciclo OI 1994-95

Los coeficientes significativos, para el vector X , de las variables Mgf , Mg/N , Mg/P , IMg , N/P , $\ln Ca/P$, IP , Kf , $\ln N/K$, Caf , Ca/N , ICa , $\ln TRAN$ y $\ln CaS$ indican la posible presencia de una tendencia en dirección este-oeste o *viceversa* (Cuadro 9). Además, N/P también ilustra la posibilidad de la existencia de una tendencia en dirección sur-norte (Cuadro 9).

Los valores del estadístico de Durbin-Watson (D), en el caso de las variables con coeficientes de regresión significativos, permiten rechazar la hipótesis de no existencia de correlación serial (entre puntos vecinos) significativa de los residuales (Gujarati, 1981) para

Cuadro 9. Coeficientes de regresión, R^2 , la probabilidad de una F mayor ($p>F$), el estadístico de Durbin-Watson (D) y los coeficientes de correlación serial r_x y r_y para las variables dominantes. Ciclo OI 1994-95.

Variable	b_0	b_1	b_2	R^2	$p>F$	D	r_x	r_y
Mgf	0.3639	-0.001692 *	-0.000083	0.18	0.00	1.06	0.46 *	0.55 *
Mg/N	0.1387	-0.000587 *	-0.000073	0.13	0.01	0.94	0.52 *	0.59 *
Mg/P	1.1805	-0.006968 *	0.000946	0.31	0.00	1.54	0.25 *	0.47 *
Mg/K	0.2551	-0.000362	-0.000055	0.02	0.52	1.59	0.20	0.22
Mg/Ca	0.4689	-0.000455	-0.000091	0.01	0.74	1.35	0.32 *	0.33
IMg	15.6479	-0.122780 *	-0.002370	0.10	0.03	1.48	0.26 *	0.34 *
Pf	0.3094	0.000545	-0.000390	0.10	0.03	0.50	0.75 *	0.76
N/P	8.8714	-0.024992 *	0.015857 *	0.12	0.01	0.44	0.77 *	0.80 *
lnCa/P	0.9234	-0.005746 *	0.001242	0.34	0.00	0.70	0.68 *	0.76 *
IP	-5.8522	0.218900 *	-0.063910	0.38	0.00	0.68	0.67 *	0.79 *
Kf	1.4151	-0.004371 *	0.000135	0.16	0.00	0.60	0.68 *	0.71 *
lnN/K	0.6359	0.002531 *	0.000371	0.08	0.06	0.62	0.68 *	0.69 *
Ca/K	0.5528	-0.000186	-0.000040	0.00	0.96	0.85	0.57 *	0.57 *
IK	-17.3484	-0.071500	0.011400	0.05	0.19	1.09	0.44 *	0.47 *
Caf	0.7706	-0.002705 *	-0.000046	0.34	0.00	1.03	0.47 *	0.63 *
Ca/N	0.2927	-0.000854 *	-0.000120	0.17	0.00	0.83	0.58 *	0.64 *
ICa	17.1133	-0.090640 *	0.006260	0.10	0.03	0.93	0.54 *	0.58 *
FOTO	20.1950	-0.009880	0.026200	0.05	0.16	1.95	0.00	-0.03
COND	0.6645	0.000942	0.000947	0.04	0.27	1.37	0.32 *	0.32 *
lnTRAN	2.9117	-0.000795 *	0.000584	0.11	0.02	1.61	0.21	0.26 *
lnCE	0.8683	0.001931	-0.000226	0.02	0.50	0.99	0.50 *	0.51 *
lnCaS	1.9808	0.009085 *	0.000096	0.18	0.00	1.19	0.40 *	0.51 *
lnMgS	1.9044	-0.002922	0.000610	0.03	0.34	0.97	0.50 *	0.51 *
REN	105.0746	-0.141000	0.018800	0.04	0.27	1.78	0.01	0.10

*Coeficiente significativo ($\alpha=0.05$)

dichas variables ($D \leq 1.55$), con la excepción de lnTRAN, variable para la cual la prueba es no concluyente ($1.55 \leq D \leq 1.67$).

Por consiguiente, para ninguna de las variables con coeficientes significativos se tiene la certeza de la existencia de una tendencia en la parcela experimental durante el Ciclo OI 1994-95.

4.4.2.1. Autocorrelación Serial Espacial

Las autocorrelaciones de primer orden de los residuales estimados considerando ambas variables explicatorias por separado (*i. e.* $Z=b_0+b_{1z}x$ o $Z=b_0+b_{1zy}$) son positivas

(Cuadro 9), de manera que la secuencia dominante de puntos vecinos entre surcos y sobre ellos es de valores alto-alto y/o bajo-bajo en la mayoría de las variables.

La pérdida significativa de aleatoriedad en las dos secuencias se evidenció para Mg_f, Mg/N, Mg/P, Mg/Ca, IMg, Pf, N/P, lnCa/P, IP, K_f, lnN/K, Ca/K, IK, Caf, Ca/N, lCa, COND, lnCE, lnCaS y MgS. La variable lnTRAN pierde aleatoriedad significativamente sobre los surcos. En todas las variables es ligeramente mayor la pérdida de aleatoriedad en la secuencia sobre los surcos, pero es importante señalar que dicha característica es casi igual o semejante en ambas secuencias para Mg/Ca, Pf, lnN/K, Ca/K, COND, lnCE y lnMgS; además, Mg/K está próxima a presentar una pérdida de aleatoriedad significativa (Cuadro 9).

Al igual que en el ciclo próximo pasado y a pesar de que en ambos se involucraron escalas diferentes, también en el ciclo OI 1994-95 la pérdida de aleatoriedad en la mayoría de las variables se manifestó significativamente.

Los coeficientes de correlación serial de magnitud similar entre lnCE y lnMgS sugieren que esta última variable es la determinante de la salinidad en la parcela experimental. Este aspecto es corroborado por el r de Pearson de 0.85 entre las dos variables, mismo que se aprecia en el Cuadro A7.

Por consiguiente, es importante definir la estructura de la variación espacial de las variables dominantes en el Ciclo OI 1994-95, dado que un buen número de ellas muestran dependencia espacial o pérdida de aleatoriedad significativa tanto en secuencia vertical como horizontal.

4.5. Estructura Espacial de la Heterogeneidad de los Procesos Dominantes

Los semivariogramas pueden mostrar dependencias espaciales diferentes para las variables (e. g. Figura 4). La semivarianza se incrementa con la distancia (h) entre sitios de muestreo hasta un valor más o menos constante [umbral, varianza muestral o semivarianza total, (C)] a una distancia de separación dada conocida como rango (A) de dependencia espacial. Los sitios o puntos separados por distancias menores al rango están relacionadas espacialmente y aquellos separados por distancias mayores que el rango no están relacionados espacialmente. Los rangos dependen de la interacción espacial de los factores que afectan las variables a la escala considerada.

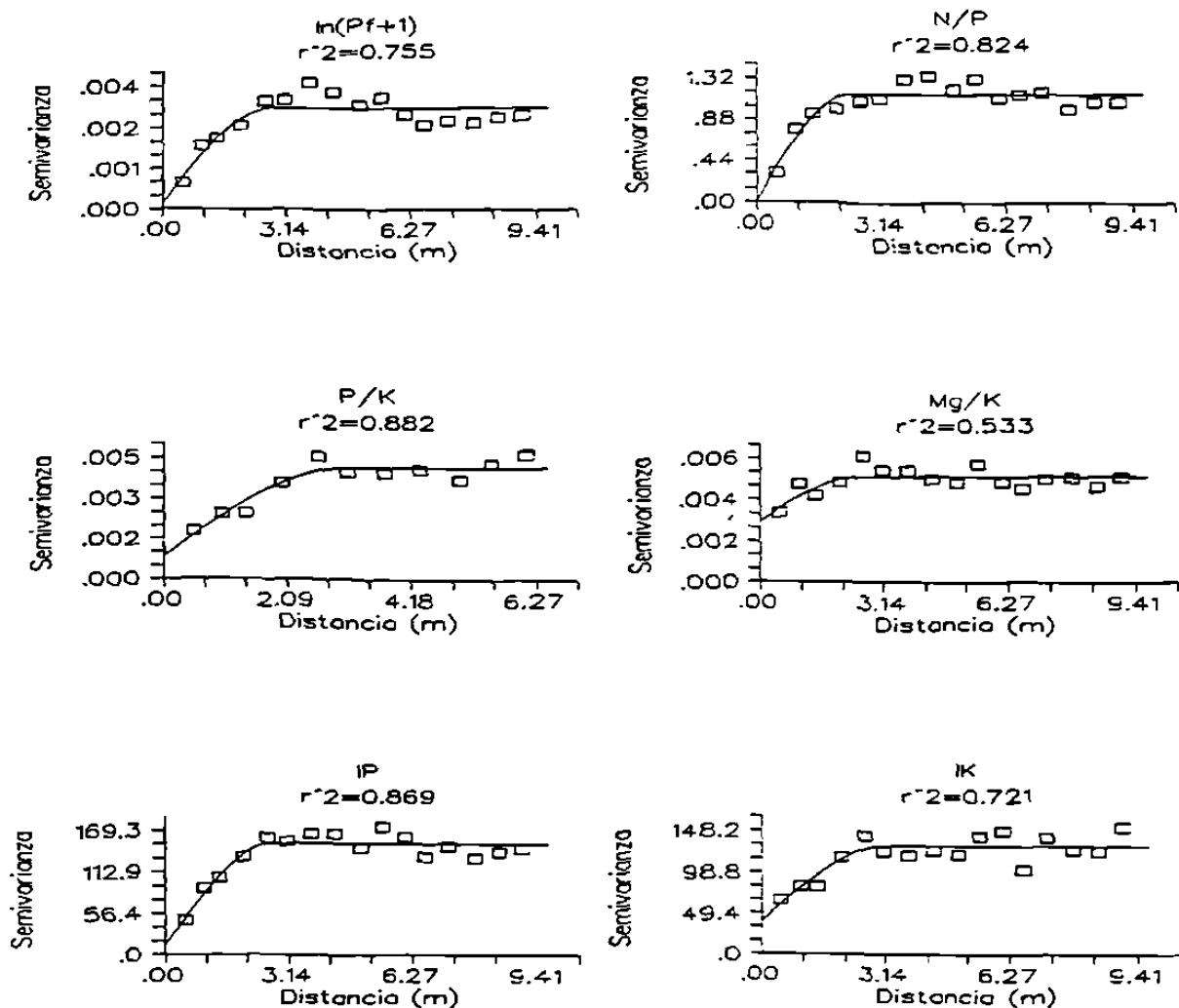


Figura 4. Semivariogramas isotrópicos experimentales (□) y teóricos esféricos (-) de las variables dominantes del CP I. Ciclo OI 1993-94.

La semivarianza a $h=0$ es denominada varianza nugget, C_0 (Webster, 1985), y representa la variabilidad aleatoria o error experimental, es decir, la heterogeneidad no detectada en la escala de muestreo.

Los semivariogramas isotrópicos experimentales fueron ajustados mediante análisis de regresión no lineal con el procedimiento de mínimos cuadrados a los modelos teóricos lineal, esférico, exponencial y gaussiano. El modelo esférico (Ecuación 28) fue, en general, el que más consistentemente se ajustó (tomando como criterios de selección al cuadrado medio del error y al R^2) a los semivariogramas experimentales de las variables.

$$\begin{aligned} \gamma(h) &= C_0 + C_1 [(1.5 h/A) - (0.5 h^3/A^3)] && \text{para } h < A \\ \gamma(h) &= C_0 + C_1 && \text{para } h > A \end{aligned} \quad (28)$$

El modelo esférico ha sido también reportado como el más apropiado para procesos naturales como temperatura del suelo superficial (Mulla, 1988), resistencia del suelo a la penetración (Mulla, 1988), contenidos de arcilla y arena (Burrough, 1981; Mulla, 1988; Ovalles y Collins, 1988b), pH, relación de adsorción de sodio, P y K en el suelo (Samra *et al.*, 1990).

Los modelos teóricos esféricos fueron definidos para todas las variables con la finalidad de permitir una comparación válida entre ellas con base en los valores de C_0 , varianza estructurada estocásticamente, C_1 ($C_1 = C - C_0$), C y A.

La C_0 expresada como porcentaje de la C habilita la comparación de la magnitud relativa del efecto nugget (Trangmar *et al.*, 1985) entre variables. Esta proporción permite definir clases distintas de dependencia espacial de las variables como se describe a continuación (Cambardella *et al.*, 1994): Si la proporción es $\leq 25\%$, la variable es dependiente en forma consistente; si la proporción adquiere valores de entre 25 y 75 %, la variable es dependiente moderadamente; y si la proporción $>75\%$, la variable es considerada como dependiente espacialmente en forma negligible o débil.

4.5.1. Ciclo OI 1993-94

Las variables lnPf, N/P, P/K e IP son dependientes consistentemente (Cuadro 10; Figura 4) cuando en la estrategia de muestreo se consideran plantas de maíz Pioneer H-3044 separadas por 0.5 m sobre los surcos y 0.92 m entre surcos. Esto implica que la heterogeneidad de dichas variables puede ser controlada por variaciones intrínsecas del

material genético y del suelo. La C_0 tan pequeña sugiere que es poca la variación presente a distancias menores a 0.5 m, e indica que el esquema de muestreo usado fue apropiado para cuantificar la dependencia espacial de estos procesos. El buen ajuste del modelo esférico y la C_0 tan pequeña indican que la variación (Journel y Huijbregts, 1978) local es mas continua y gradual que abrupta, lo cual confirma que las variables lnPf, N/P, P/K e IP son *quasi*-estacionarias a distancias de separación pequeñas dentro de la parcela.

De las variables vinculadas al CP 1, tan solo Mg/K e IK son moderadamente dependientes (Cuadro 10; Figura 4) al igual que las asociadas al CP 3 (Caf, Ca/N, lnCa/P, lnCa/K, lnMg/Ca e ICa) (Cuadro 10; Figura 6) y REN (Cuadro 10; Figura 7). Los valores de C_0 de REN indican que:

Cuadro 10. Valores aproximados de los componentes de la heterogeneidad de las variables dominantes. Ciclo OI 1993-94.

Variable	T^{\dagger}	C_0^{\dagger}	C_1^{\dagger}	A^{\dagger}
	(Proporción de varianza) [§]			(m)
ln(Pf+1)	_____	0.066	0.934	2.75
N/P	_____	0.001	0.009	2.38
P/K	_____	0.232	0.768	3.11
Mg/K	_____	0.588	0.412	2.68
IP	_____	0.096	0.904	2.78
IK	_____	0.321	0.679	3.13
Mgf	_____	1.000	1.000	_____
Mg/N	_____	1.000	1.000	_____
IN	_____	0.850	0.250	5.53
IMg	_____	1.000	1.000	_____
IBN	_____	1.000	1.000	_____
Caf	_____	0.701	0.299	2.56
Ca/N	_____	0.636	0.364	2.60
lnCa/P	_____	0.251	0.749	2.61
lnCa/K	0.134	0.733	0.133	2.71
lnMg/Ca	_____	0.630	0.370	3.03
ICa	_____	0.591	0.409	2.43
REN	_____	0.671	0.329	0.99

[†]T=tendencia; C_0 =varianza nugget;

C_1 =varianza estructurada; A=rango.

[§]Componente/Varianza total.

i). La estructura espacial de los factores de nutrición no se refleja sobre el rendimiento debido, probablemente, a la integración de las condiciones de fertilidad edáfica: y

ii). Otros efectos ambientales no relacionados a la nutrición también influyen sobre el rendimiento.

Otra clase de variables son las agrupadas en el CP 2, tales como Mgf, Mg/N, IMg, IBN e IN (Cuadro 10; Figura 5); estas se caracterizaron por semivariogramas con proporciones *varianza nugget/varianza total* > 75 %; incluso las primeras cuatro son espacialmente independientes y completamente aleatorias (Cuadro 10; Figura 5). Teóricamente las variaciones de factores extrínsecos, *i. e.* aplicación de agroquímicos y agua, labranza, etc., pueden controlar una parte de la heterogeneidad aleatoria de las variables del CP 2. Es imprescindible indicar también que dichas variables pueden exhibir dependencia a escalas menores que la usada en el presente estudio, principalmente Mgf, Mg/N, IMg e IBN. En términos prácticos, es posible mejorar la condición nutricional (insuficiencias relativas de N y K con respecto a P, Ca y Mg) e incrementar el rendimiento de las plantas de maíz en la parcela experimental y factible una respuesta a la aplicación de fertilizantes nitrogenados y potásicos. Así lo demostró Sánchez (1995) en un experimento de fertilización en una parcela adyacente a la del presente caso en el mismo Ciclo OI 1993-94.

Los valores de los rangos oscilan entre 2.38 y 3.13 m, con la excepción de IN (5.53 m) y REN (0.99 m). Seguramente, la dependencia del N, a distancias mayores que las de los otros cuatro elementos y las interacciones entre todos ellos en las plantas en maíz, está vinculada a la mayor movilidad del nitrógeno en el suelo. En cambio, la dependencia del rendimiento a distancias menores, sugiere gran sensibilidad de las plantas de maíz Pioneer H-3044 a la heterogeneidad de la fertilidad del suelo y de los factores nutricionales en la propia planta.

4.5.2. Ciclo OI 1994-95

Las variables que integran los CP 3 (Pf, N/P, InCa/P e IP) (Cuadro 11; Figura 9), CP 4 (Kf, InN/K, Ca/K e IK) (Cuadro 11; Figura 10) y CP 5 (Caf, Ca/N e ICa) (Cuadro 11; Figura 11) son dependientes espacialmente en forma consistente al igual que Mgf y Mg/N del CP 1 (Cuadro 11; Figura 8). Entonces, la *varianza nugget* esas variables puede ser controlada por variaciones mínimas intrínsecas del material genético y las propiedades del suelo, y por la imprecisión en las técnicas de medición.

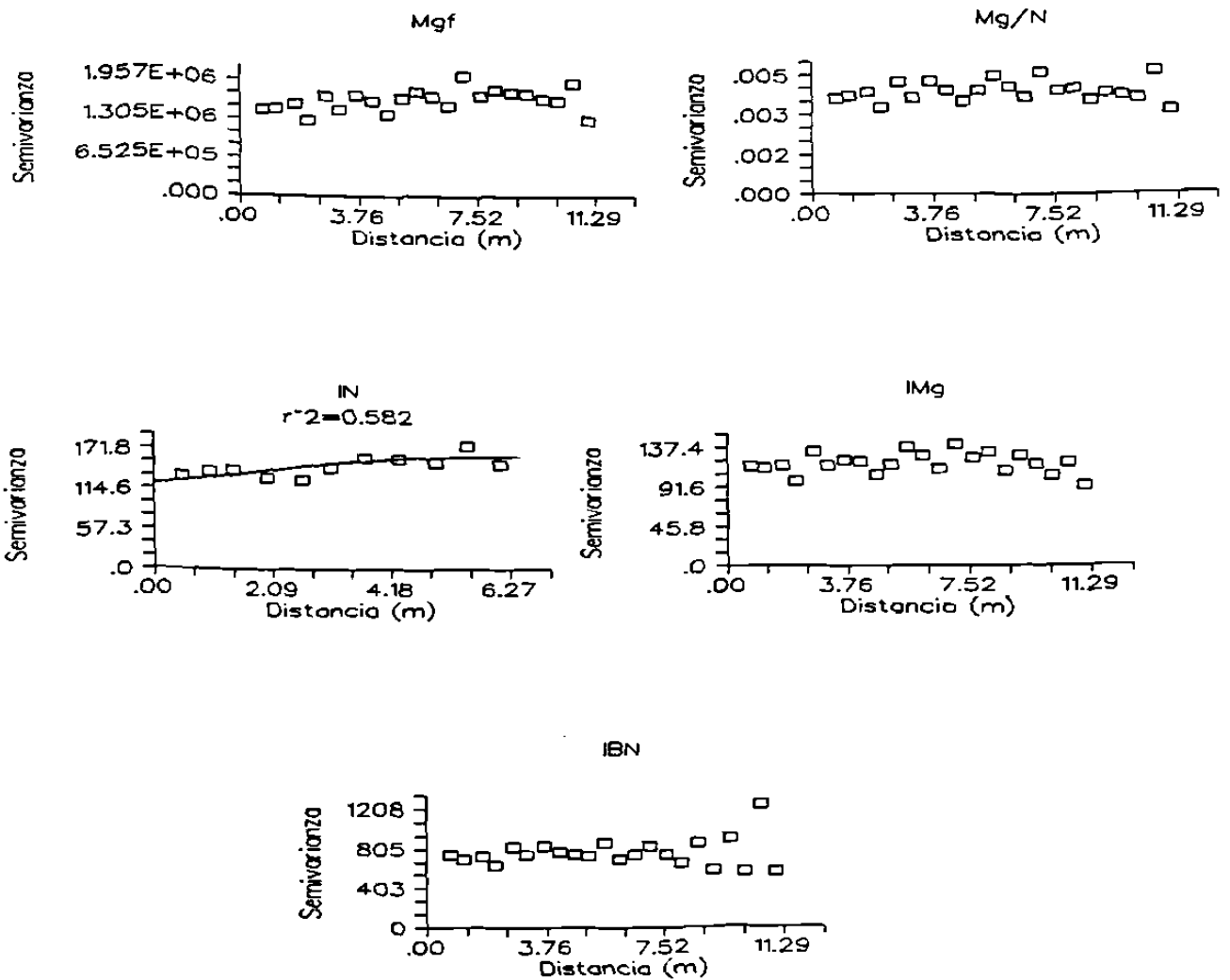


Figura 5. Semivariogramas isotrópicos experimentales (□) y teóricos esféricos (-) de las variables dominantes del CP 2. Ciclo OI 1993-94.

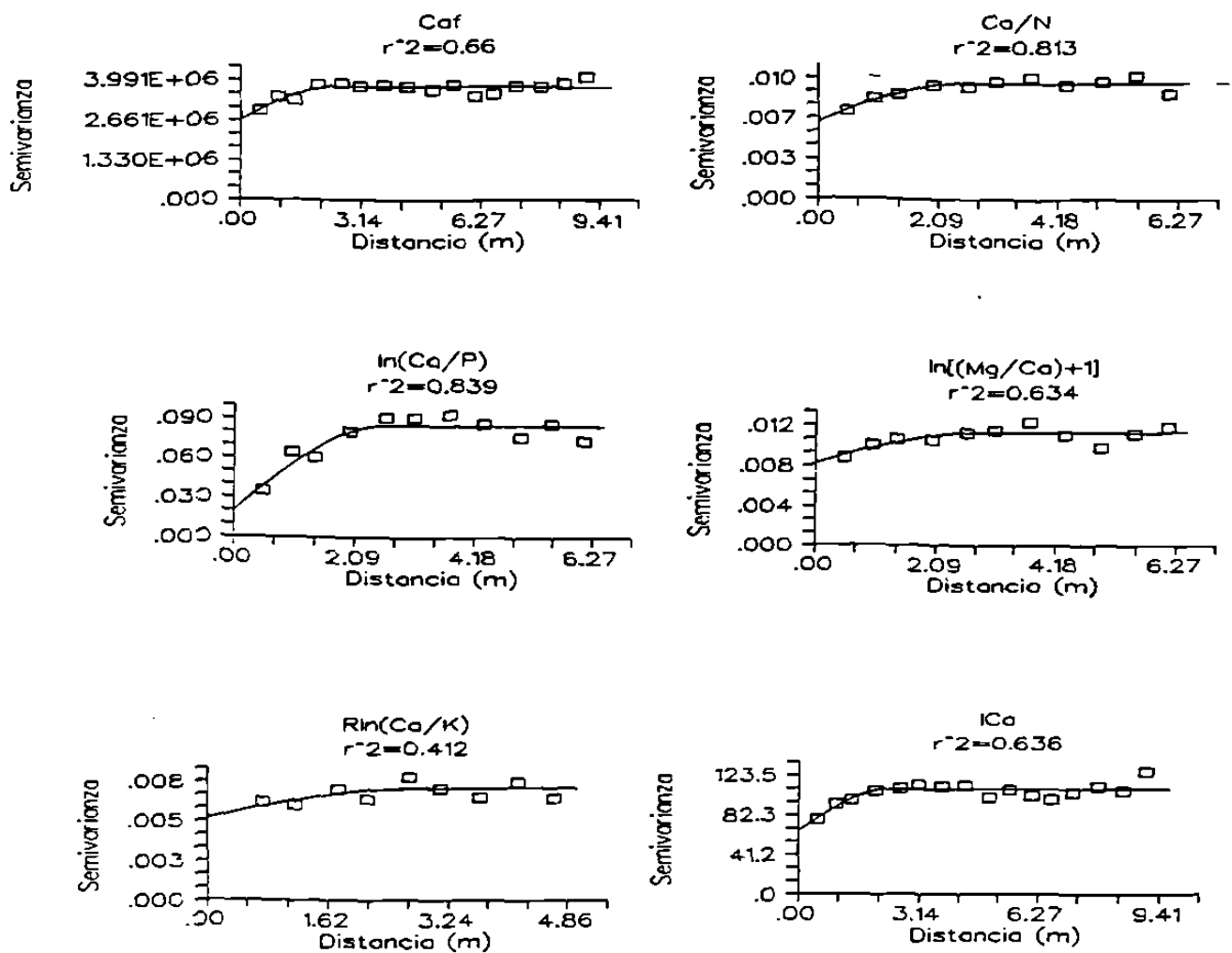


Figura 6. Semivariogramas isotrópicos experimentales (□) y teóricos esféricos (-) de las variables dominantes del CP 3. Ciclo OI 1993-94.

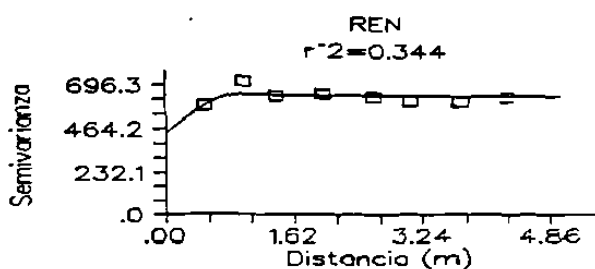


Figura 7. Semivariogramas isotrópicos experimental (□) y teórico esférico (-) del rendimiento por planta. Ciclo OI 1993-94.

Cuadro 11. Valores aproximados de los componentes de la heterogeneidad de las variables dominantes. Ciclo OI 1994-95.

Variable	C ₀ [†]	C ₁ [‡]	A [§]
	(Proporción de varianza) [§]		(m)
Mgf	0.039	0.961	22.2
Mg/N	0.013	0.987	24.8
Mg/P	0.508	0.492	63.2
Mg/K	1.000	1.000	—
Mg/Ca	0.340	0.660	16.8
IMg	0.758	0.242	45.4
Pf	0.052	0.948	24.4
N/P	0.001	0.999	32.6
lnCa/P	0.001	0.999	29.1
IP	0.153	0.847	50.9
Kf	0.001	0.999	22.2
lnN/K	0.001	0.999	20.8
Ca/K	0.001	0.999	18.5
IK	0.231	0.769	16.8
Caf	0.177	0.823	51.1
Ca/N	0.001	0.999	32.5
ICa	0.001	0.999	20.5
FOTO	1.000	1.000	—
COND	0.307	0.693	33.9
lnTRAN	0.578	0.422	34.3
lnCE	1.000	1.000	—
lnCaS	0.651	0.349	55.1
lnMgS	1.000	1.000	—
REN	0.410	0.590	17.3

[†]C₀=varianza nugget; C₁=varianza estructurada;
A=rango.

[‡]Componente/Varianza total.

El grupo de variables moderadamente dependientes lo integran Mg/P y Mg/Ca del CP 1 (Cuadro 11; Figura 8), COND y lnTRAN del CP 6 (Cuadro 11; Figura 12), lnCaS del CP 2 (Cuadro 11; Figura 13) y REN (Cuadro 11; Figura 14).

Considerando que los rangos de los semivariogramas indican las distancias dentro de las cuales las observaciones contiguas están autocorrelacionadas, los principios de aleatorización y repeticiones usados en experimentación agrícola pueden ser inefectivos en la parcela donde se realizó el presente estudio, principalmente con respecto a las variables que resultaron fuerte y moderadamente dependientes en el espacio para los ciclos OI 1993-94 y OI 1994-95. Algunos métodos alternativos que permiten controlar la heterogeneidad a las escalas en que se evidencia autocorrelación espacial son mas apropiados. Por ejemplo, Sánchez (1995) (al analizar el rendimiento por parcela útil) demostró que la técnica de vecindad cercana con ajuste norte-sur, así como el análisis de covarianza, usando como variable concomitante a la humedad de suelo, fueron mas apropiadas que el análisis de varianza convencional para un diseño de bloques al azar.

Las variables dependientes espacialmente en forma débil, es decir, aquellas prácticamente aleatorias e independientes en el espacio, son: Mg/K e IMg del CP 1 (Cuadro 11; Figura 8), FOTO del CP 6 (Cuadro 11; Figura 12), lnCE y lnMgS del CP 2 (Cuadro 11; Figura 13). Es factible que estas variables puedan ser modificadas por efecto de factores extrínsecos, tales como aplicación de agroquímicos al suelo y/o a la planta, incorporación de agua a la parcela, labranza, etc.

De singular importancia es la participación del magnesio en el grupo de variables débilmente dependientes en términos de su concentración en la hoja, la cual es excesiva con respecto a K, N y P; esto sugiere que la aplicación de los últimos elementos como fertilizante puede mejorar la condición nutricional de las plantas de maíz Pioneer H-3044. La C_0 de IMg implica que las relaciones del Mg con los otros elementos, en el follaje, pueden modificarse; pues en las condiciones prevalecientes (principalmente suelo calcáreo en la parcela experimental), las plantas de maíz Pioneer H-3044 acumulan en las hojas mas Mg que el nivel definido como óptimo. Esta evidencia sugiere que es necesario generar normas nutricionales locales con la finalidad de hacer diagnósticos nutricionales mas acertados.

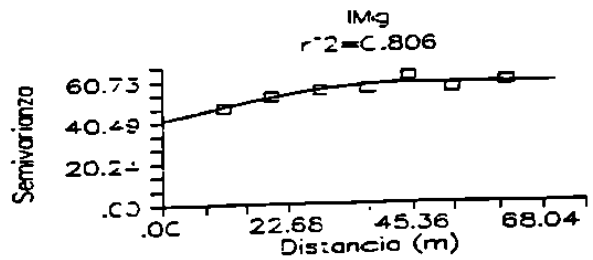
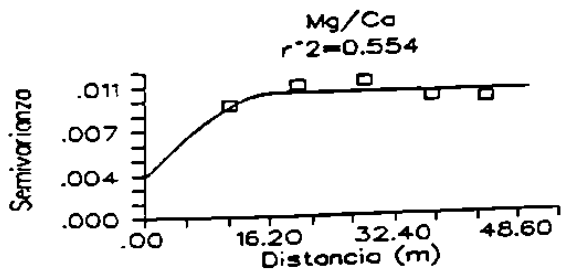
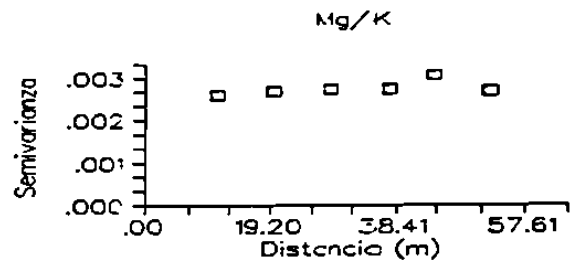
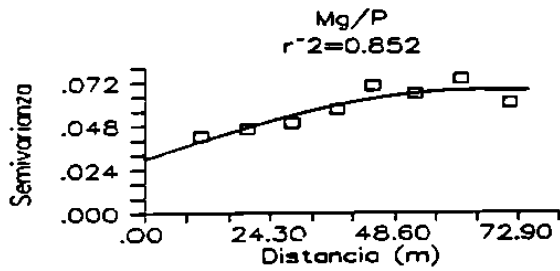
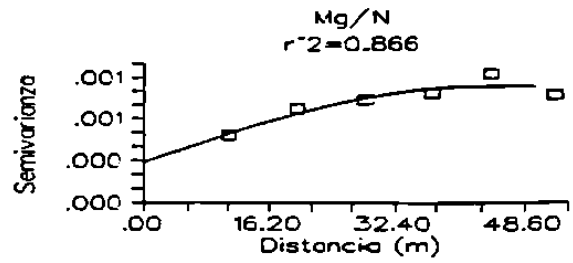
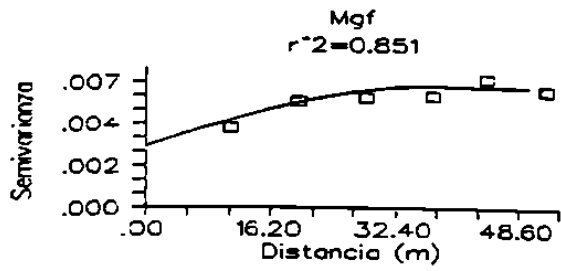


Figura 8. Semivariogramas isotrópicos experimentales (□) y teóricos esféricos (-) de las variables dominantes del CP 1. Ciclo OI 1994-95.

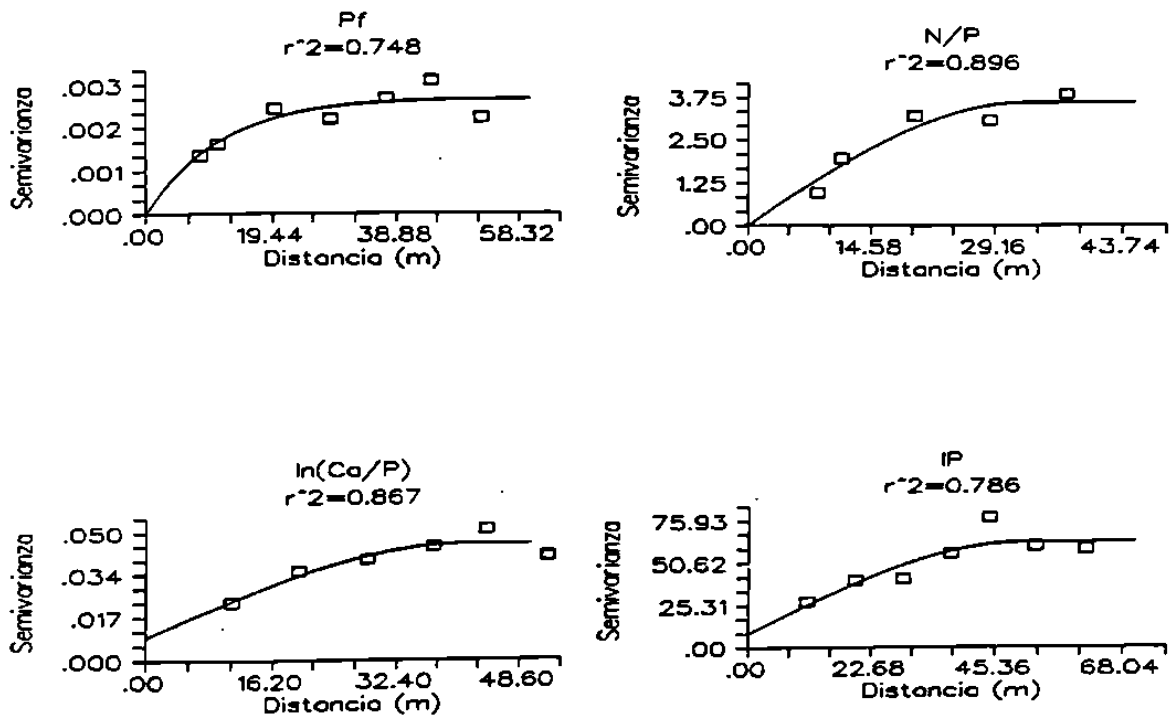


Figura 9. Semivariogramas isotrópicos experimentales (□) y teóricos esféricos (-) de las variables dominantes del CP 3. Ciclo OI 1993-94.

BIBLA

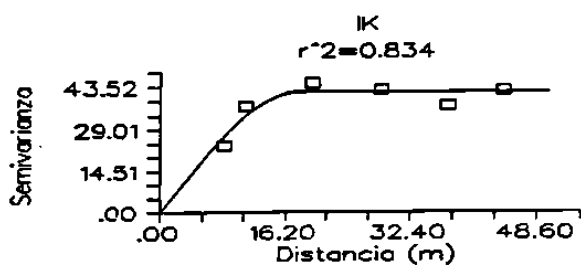
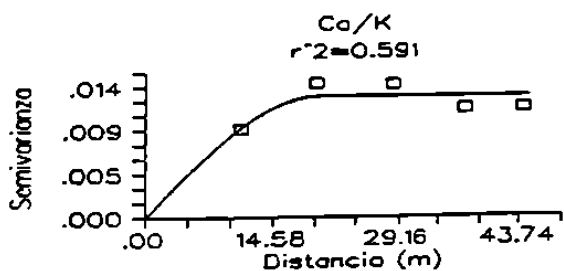
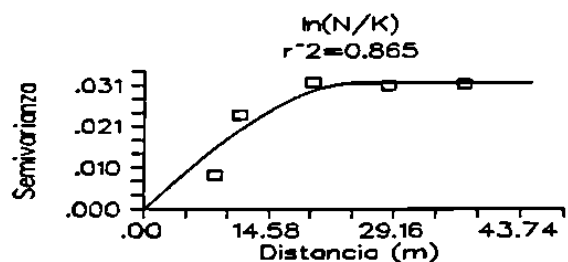
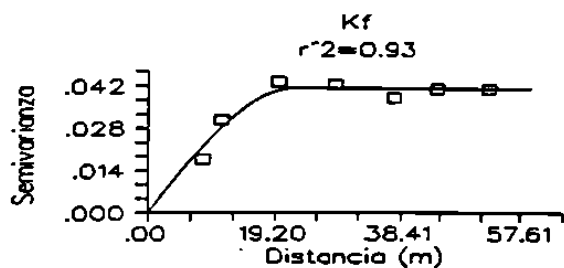


Figura 10. Semivariogramas isotrópicos experimentales (□) y teóricos esféricos (-) de las variables dominantes del CP 4. Ciclo O1 1994-95.

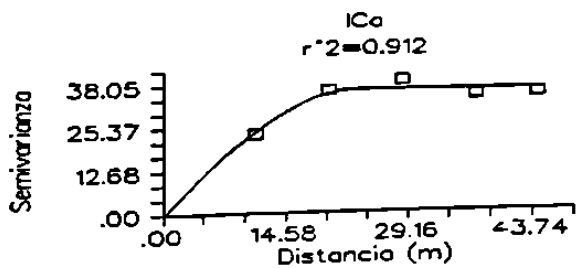
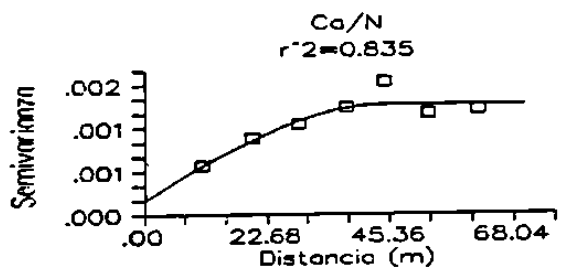
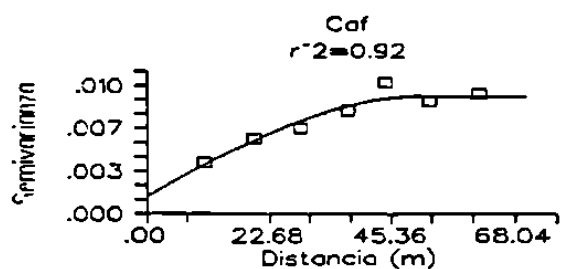


Figura 11. Semivariogramas isotrópicos experimentales (□) y teóricos esféricos (-) de las variables dominantes del CP 5. Ciclo OI 1994-95.

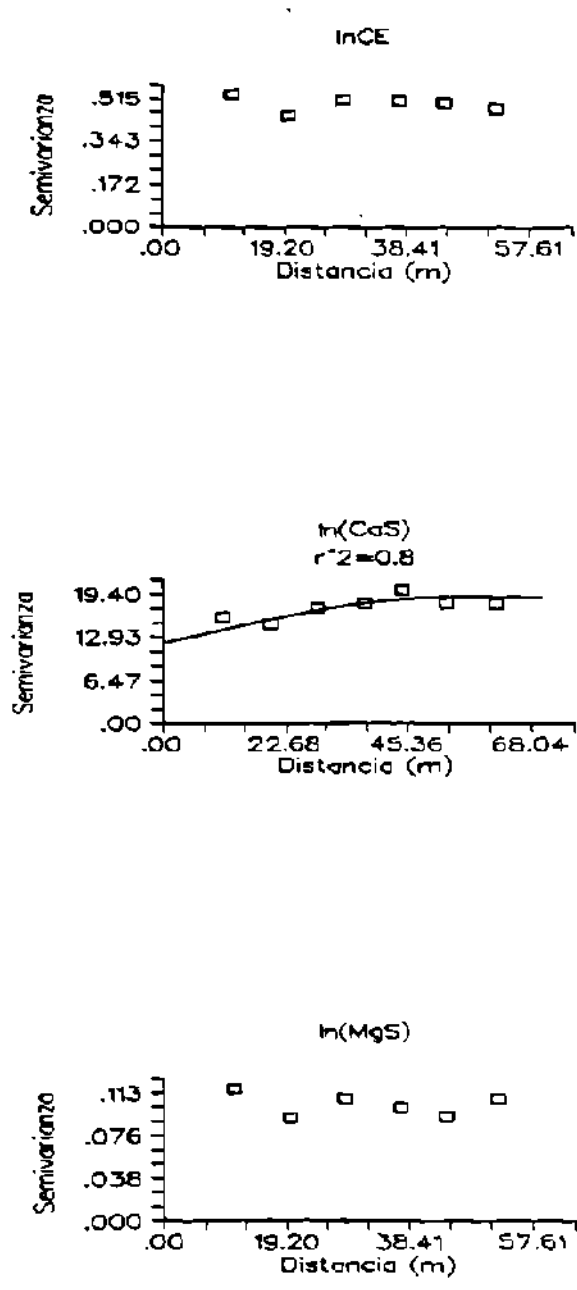


Figura 13. Semivariogramas isotrópicos experimentales (□) y teóricos esféricos (-) de las variables dominantes del CP 2. Ciclo OI 1994-95.

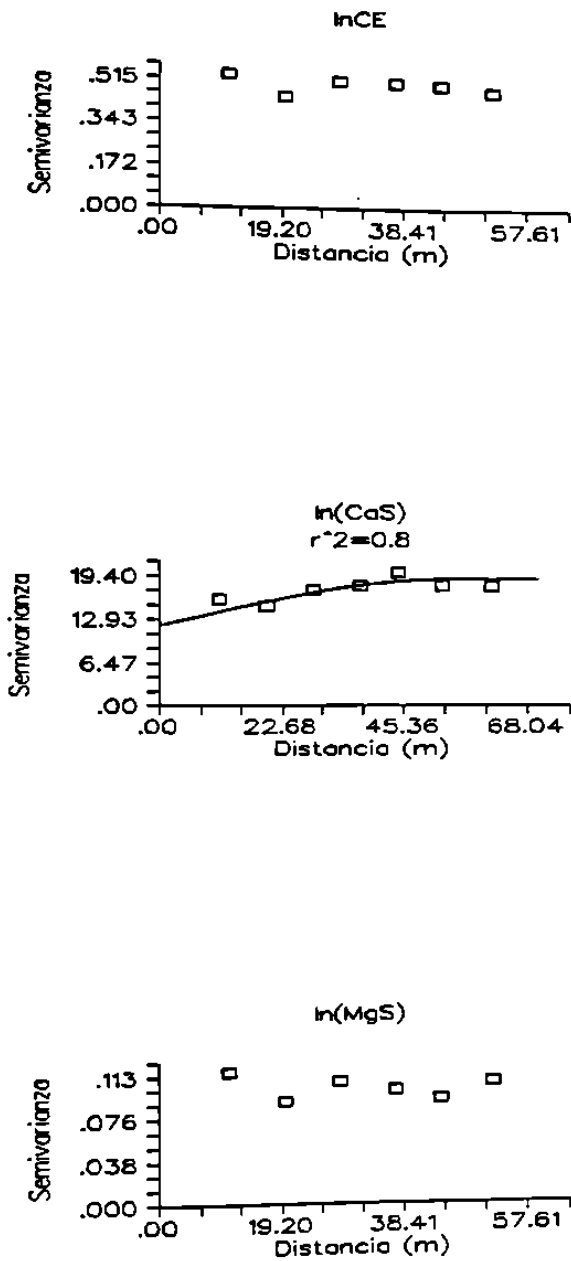


Figura 13. Semivariogramas isotrópicos experimentales (□) y teóricos esféricos (-) de las variables dominantes del CP 2. Ciclo OI 1994-95.

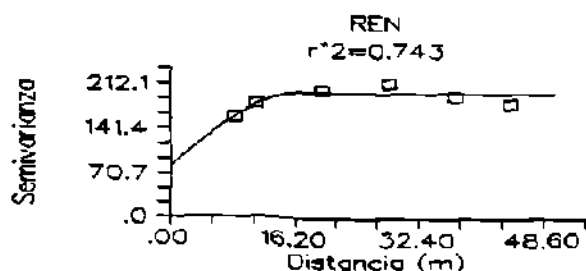


Figura 14. Semivariogramas isotrópicos experimental (□) y teórico esférico (-) del rendimiento por planta. Ciclo OI 1994-95.

4.6. Análisis Fractal de los Procesos Dominantes

La dimensión fractal (DF) para cada variable dominante fue estimada mediante la Ecuación 10. La finalidad de obtener dicho índice, para los procesos estocásticos en estudio, consistió básicamente en determinar si la función semivariograma estimada era diferenciable o no. La función semivariograma diferenciable, como función fractal lineal estocástica, indica que el proceso es predecible (Burrough, 1981); en caso de ser no diferenciable, resulta impredecible.

4.6.1. Ciclo OI 1993-94

En el Cuadro 12 se muestran los valores de la DF para cada una de las variables dominantes vinculadas al Ciclo OI 1993-94. Es notorio que todas las variables son procesos muy irregulares o erráticos y prácticamente no diferenciables (valores de $DF > 1.5$). Valores de magnitud similar han sido reportados para algunos procesos naturales de suelo (Burrough, 1981; Armstrong, 1986; Kemblowski y Chang, 1993) y de planta, como rendimiento de la mayoría de las especies cultivadas (Burrough, 1981), raíces en maíz (Eghball *et al.*, 1993) y del crecimiento de árboles de *Cotoneaster horizontalis* Decaisne y *Taxus baccata* L. (Morse *et al.*, 1985).

Cuadro 12. Dimensión fractal (DF) estimada para las variables dominantes por componente principal (CP) y rendimiento (REN). Ciclo OI 1993-94.

CP 1 y REN		CP 2		CP 3	
Variable	DF	Variable	DF	Variable	DF
lnPf	2.0	Mgf	2.0	Caf	1.97
N/P	1.69	Mg/N	2.0	Ca/N	1.94
P/K	1.82	IN	1.96	ln(Ca/P)	1.79
Mg/K	1.95	IMg	2.0	Rln(Ca/K)	2.0
IP	1.75	IBN	2.0	ln(Mg/Ca)	1.95
IK	1.88			ICa	1.95
REN	2.0				

4.6.2. Ciclo OI 1994-95

Al igual que en el Ciclo OI 1993-94, todas las variables dominantes y el rendimiento del Ciclo OI 1994-95 mostraron DF's > 1.5 (Cuadro 13); esto indica que son procesos muy irregulares o caóticos (Burrough, 1981) y, en consecuencia, prácticamente impredecibles. En la Figura 15 se aprecia que el sistema kriging (Ecuaciones 11-17) basado en la función del semivariograma isotrópico, es un *interpolador impreciso en el caso particular de la variable Mgf*, lo cual coincide con la interpretación de la dimensión fractal. Los resultados fueron similares para todas las variables dominantes en ambos ciclos.

La naturaleza impredecible de los procesos dominantes y el rendimiento pudiera deberse a un efecto anisotrópico, por lo que se consideró necesario realizar un análisis de anisotropía, mismo que se describe en el siguiente apartado.

4.6.3. Análisis Anisotrópico de los Procesos Dominantes

La variable Mgf fue seleccionada como ejemplo demostrativo, para verificar si su naturaleza errática en el espacio en el Ciclo OI 1994-95 se debe a un efecto de anisotropía.

El modelo esférico (Ecuación 29) se consideró para estimar la estructura de la heterogeneidad en el espacio

$$\begin{aligned} \gamma(h) &= C_0 + C_1 [1.5 (h/A) - 0.5 (h/A)^3] && \text{para } h < A \\ \gamma(h) &= C_0 + C_1 && \text{para } h > A \end{aligned} \quad (29)$$

Cuadro 13. Dimensión fractal (DF) estimada para las variables dominantes por componente principal (CP) y rendimiento (REN). Ciclo OI 1994-95.

CP 1 y REN		CP 2		CP 3		CP 4		CP 5		CP 6	
Variable	DF	Variable	DF	Variable	DF	Variable	DF	Variable	DF	Variable	DF
Mgf	1.86	Pf	1.86	Kf	1.92	Caf	1.72	FOTO	2.0	lnCE	2.0
Mg/N	1.83	N/P	1.78	lnN/K	1.83	Ca/N	1.77	COND	1.86	lnCaS	1.9
Mg/P	1.84	lnCa/P	1.8	Ca/K	1.84	ICa	2.0	lnTRAN	1.91	lnMgS	2.0
Mg/K	1.97	IP	1.71	IK	2.0						
Mg/Ca	2.0										
IMg	1.93										
REN	1.93										

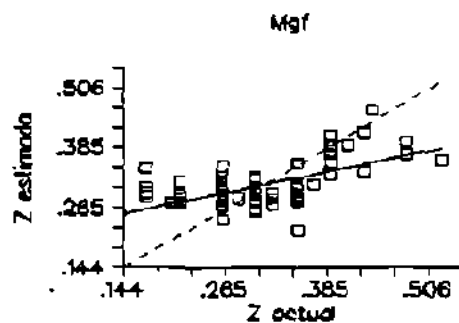


Figura 15. Validación de la interpolación de Mgf mediante kriging puntual en base a la función semivariograma isotrópico esférico.

donde $A = A_1^2[\cos^2(\theta-\phi)] + A_2^2[\sin^2(\theta-\phi)]$; A_1 es el rango para el eje mayor (ϕ); A_2 es el rango para el eje menor ($\phi+\pi/2$); ϕ es el ángulo de variación máxima; y θ es el ángulo entre pares.

En la Figura 16 se aprecia que la naturaleza errática de Mgf en la hoja de la mazorca de maíz Pioneer H-3044 no se debe a la anisotropía espacial, pues el sistema kriging se comporta como un interpolador impreciso considerando la función semivariograma anisotrópico. Entonces, la naturaleza de la autocorrelación espacial de las variables dominantes es independiente de la dirección y de la escala en los dos ciclos.

Los resultados de los análisis (isotrópico y anisotrópico) de heterogeneidad espacial y fractal, de los factores dominantes y del rendimiento, en los dos ciclos y las dos escalas, sugieren que difícilmente se puede generar un modelo estocástico preciso e insesgado que

permita inferir la respuesta del maíz a esos factores. El análisis de regresión lineal múltiple, mediante el procedimiento de mínimos cuadrados, tomando como variable dependiente al rendimiento y como independientes a las variables dominantes permite evidenciar que los modelos explican un reducido porcentaje de la variación del rendimiento, y coincide con los resultados del análisis de componentes principales en ambos ciclos (Cuadro A6 para el Ciclo OI 1993-94 y Cuadro A12 para el Ciclo OI 1994-95); sin embargo, el análisis de los residuales indican que los modelos generados son imprecisos, debido a que los errores están autocorrelacionados.

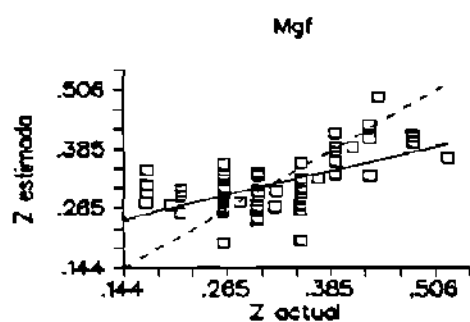


Figura 16. Validación de la interpolación de MgF mediante kriging puntual en base a la función semivariograma anisotrópico esférico.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El análisis de la heterogeneidad estocástica espacial de los factores dominantes, en el proceso de producción de biomasa de las plantas en maíz, permite hacer inferencias sobre el rendimiento; por consiguiente, la hipótesis planteada en este sentido no se rechaza y el primer objetivo se cumple.

La mayoría de los factores dominantes, nutricionales y de intercambio de gases, en el proceso de producción de biomasa en maíz tienen heterogeneidad estocástica espacial estructurada; en consecuencia, la hipótesis propuesta en dicho contexto no se rechaza. Esto permite el cumplimiento parcial del segundo objetivo.

Los modelos estocásticos generados, para los dos ciclos de cultivo, con la finalidad de predecir el rendimiento en función de los factores, de nutrición y de intercambio de gases, determinantes involucran errores autocorrelacionados independientes de la dirección y de la escala, debido a la pérdida de aleatoriedad de los factores tanto en dirección de los surcos como en el sentido perpendicular a ellos; esto indica que los modelos son imprecisos. Por lo tanto, la hipótesis asociada a esta conclusión se rechaza, mientras que el objetivo respectivo no se cumple.

Las concentraciones de Mg y Ca en las hojas de las plantas, en maíz Pioneer H-3044, tienden a ser mayores que las consideradas como óptimas para la especie *Zea mays* L., debido a la naturaleza calcárea del suelo superficial en el Norte de Tamaulipas. Esto causa que las concentraciones tanto de Mg como de Ca en el follaje de las plantas sean excesivas con respecto a las de N, P y K, lo cual induce deficiencias de N y K que limitan el rendimiento, principalmente.

Las variables concentración de N, P, K, Ca y Mg, las relaciones N/P, N/K, P/Ca, Ca/N, Mg/N, Ca/P, Mg/P, Ca/K, Mg/K y Mg/Ca en las hojas de las plantas, así como la fotosíntesis, conductancia estomatal, transpiración y la conductividad eléctrica del extracto de saturación y las cantidades de Mg y Ca solubles en el suelo superficial son dominantes en el proceso de producción de biomasa en maíz en el Norte de Tamaulipas.

Las variables fotosíntesis, conductancia estomatal y transpiración de las plantas en maíz son sensibles a la humedad y la condición textural del suelo superficial.

De acuerdo al análisis geoestadístico, la heterogeneidad estocástica espacial de los factores nutricionales y de intercambio de gases, dominantes en el proceso de producción de biomasa en maíz, tienen estructura descrita por modelos esféricos no diferenciables, pero no se

refleja sobre el rendimiento debido a que otros factores *no relacionados a la nutrición y al intercambio gaseoso* también influyen sobre el rendimiento.

La distancia de dependencia espacial (rango) de los factores nutricionales y de intercambio de gases, dominantes en el sistema de producción de biomasa en maíz, es dependiente de la escala.

El análisis de componentes principales tiende a agrupar variables con heterogeneidad espacial estructurada de magnitud relativa semejante.

El método kriging puntual es un interpolador impreciso cuando las variables se comportan erráticamente en el espacio, independientemente de la dirección y de la escala.

Todas las variables dominantes y el rendimiento, en ambos ciclos, mostraron valores de dimensión fractal >1.5 , lo cual indica que son irregulares o caóticas y prácticamente impredecibles en el espacio asociado a las escalas consideradas.

El comportamiento errático de las variables estudiadas no se debe a que la magnitud de la heterogeneidad espacial estructurada dependa de la dirección (del efecto de la anisotropía).

Es conveniente estudiar la heterogeneidad espacial a escalas mayores en futuras investigaciones.

Es recomendable generar normas de diagnóstico nutricional regionales, con la finalidad de potenciar su uso para mejorar y optimizar la fertilización.

Debido a la pérdida de aleatoriedad de las variables dominantes, tanto en el sentido de los surcos como en el sentido perpendicular a ellos, es recomendable poner atención especial en el diseño y establecimiento de futuros experimentos de fertilización-nutrición, o bien usar algún método alternativo de análisis de varianza (ver Sánchez, 1995) que permita reducir la variación asociada al error experimental, para hacer inferencias más acertadas.

6. LITERATURA CITADA

- Akhavan-Kharazian, M., W. F. Campbell, J. J. Jurinak and L. M. Dubley. 1991. Calcium amelioration of Na Cl effects on plant growth, chlorophyll, and ion concentration in *Phaseolus vulgaris*. *Arid Soil Res. Rehab.* 5:9-19.
- Andrade, F. H., S. A. Uhart and A. Cirilo. 1993. Temperature affects radiation use efficiency in maize. *Field Crops Research* 32:17-25.
- Arkley, R. J. 1976. Statistical methods in soil classification research. *Adv. Agron.* 28:37-70.
- Armstrong, A. C. 1986. On the fractal dimensions of some transient soil properties. *J. Soil Sci.* 37:641-652.
- Beverly, R. B. 1991. A Practical guide to the diagnosis and recommendation integrated system (DRIS). Micro-Macro Publishing. Athens, GA, USA. 87 p.
- Bidwell, O. A. and F. D. Hole. 1963. Numerical taxonomy and soil classification. *Soil Sci.* 97:58-62.
- Bresler, E., G. Dagan and R. J. Hanks. 1982. Statistical analysis of crop yield under controlled line-source irrigation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46:841-847.
- Bresler, E., G. Dagan, R. J. Wagenet and A. Laufer. 1984. Statistical analysis of salinity and texture effects on spatial variability of soil hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48:16-25.
- Bresler, E., S. Dasberg, D. Russo and G. Dagan. 1981. Spatial variability of crop yield as a stochastic process. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45:600-605.
- Broschat, T. K. 1979. Principal component analysis in horticultural research. *HortScience* 14(2):114-117.
- Burgess, 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.
- Burrough, P. A. 1981. Fractal dimension of landscapes and other environmental data. *Nature* 294:240-242.
- Burrough, P. A. 1983. Multiscale sources of spatial variation in soil: I. The application of fractal concepts to nested levels of soil variation. *J. Soil Sci.* 34:577-597.
- Burrough, P. A. 1991. Sampling designs for quantifying map unit composition. In: Mausbach, M. J. and L. P. Wilding (Editors). *Spatial variabilities of soils and landforms*. SSSA Spec. Publ. 28. Madison, WI, USA. pp. 89-125.
- Buol, S. W., F. D. Hole and R. J. McCracken. 1980. *Soil genesis and classification*. The Iowa Univ. Press. 2nd Ed. Ames, IA, USA. 404 p.
- Cambardella, C. A., T. B. Moorman, J. M. Novak, T. B. Parkin, D. L. Karlen, R. F. Turco and A. E. Konopka. 1994. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58:1501-1511.
- 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.
- Clark, R. B. 1970. Effects of mineral nutrient levels on the organic composition and growth of corn (*Zea mays* L.). Ohio Agricultural Research and Development Center. Wooster, OH, USA. Research Circular 181. 21 p.
- Dara, S. T., P. E. Fixen and R. H. Gelderman. 1992. Sufficiency levels and diagnosis and recommendation integrated system approaches for evaluating the nitrogen status of corn. *Agron. J.* 84:1006-1010.
- Eghball, B., J. R. Settini, J. W. Maranville and A. M. Parkhurst. 1993. Fractal analysis for morphological description of corn roots under nitrogen stress. *Agron. J.* 85:287-289.
- Eghball, B. and J. F. Power. 1995. Fractal description of temporal yield variability of ten crops in the United States. *Agron. J.* 87:152-156.

- Eghball, B., G. D. Binford, J. F. Power, D. D. Baltensperger and F. N. Anderson. 1995. *Mayze temporal yield variability under long term manure and fertilizer application: Fractal analysis*. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59:1360-1364.
- Elwali, A. M. O., G. J. Gascho and M. E. Sumner. 1985. *DRIS norms for 11 nutrients in corn leaves*. *Agron. J.* 77:506-508.
- Evans, H. J. and G. J. Sorger. 1966. *Role of mineral elements with emphasis on the univalent cations*. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 17:47-76.
- Finke, P. A., J. Bouma and A. Stein. 1992. *Measuring field variability of disturbed soils for simulation purposes*. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:187-192.
- Folorunso, O. A., C. E. Puente, D. E. Rolston and J. E. Pinzón. 1994. *Statistical and fractal evaluation of the spatial characteristics of soil surface strength*. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58:284-294.
- Gajem, Y. M., A. W. Warrick and D. E. Myers. 1981. *Spatial dependence of physical properties of a typic torrifluent soil*. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45:709-715.
- Gamma Design Software. 1995. *GS+: Geostatistics for the environmental sciences. Version 2.3*. Plainwell, MI, USA. 165 p.
- Goigel, M. 1989. *Landscape ecology: The effect of pattern on process*. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 20:171-197.
- Greenway, H. and R. Munns. 1980. *Mechanisms of salt tolerance in nonhalophytes*. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 31:149-190.
- Guitjens, J. C. 1992. *Interpreting spatial yield variability of irrigated spring wheat*. *Trans. ASAE* 35(1):91-95.
- Gujarati, D. 1981. *Econometría básica*. McGraw Hill / Interamericana de México, S. A. de C. V. México. D. F. 463 p.
- Haan, C. T. 1977. *Statistical methods in hydrology*. The Iowa State Univ. Press. Ames, IA, USA. 378 p.
- Ham, J. M. and R. S. Senock. 1992. *On the measurement of soil surface temperature*. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:370-377.
- Hamlett, J. M., R. Horton and N. A. C. Cressie. 1986. *Resistant and exploratory techniques for use in semivariogram analyses*. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50:868-875.
- Hermý, M. and P. J. Lewi. 1991. *Multivariate ratio analysis, a graphical method for ecological ordination*. *Ecology* 72(2):735-738.
- Jackson, R. B. and M. M. Caldwell. 1993. *The scale of nutrient heterogeneity around individual plants and its quantification with geostatistics*. *Ecology* 74(2):612-614.
- James, F. C. and Ch. E. McCulloch. 1990. *Multivariate analysis in ecology and systematics: Panacea or Pandora's box?* *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 21:129-166.
- Journel, A. G. and Ch. J. Huijbregts. 1978. *Mining geostatistics*. Academic Press Inc. New York, NY, USA. 599 p.
- Jury, W. A., D. Russo, G. Sposito and H. Elabd. 1987. *The spatial variability of water and solute transport properties in unsaturated soil: I. Analysis of property variation and spatial structure with statistical models*. *Hilgardia* 55(4):1-32.
- Kemblowski, M. W. and Ching-Min Chang. 1993. *Infiltration in soils with fractal permeability distribution*. *Ground Water* 31(2):187-192.
- Li, J. C. R. and K. R. Keller. 1951. *An application of serial correlation in field experiments*. *Agron. J.* 43:201-203.
- Li, H. and J. F. Reynolds. 1994. *A simulation experiment to quantify spatial heterogeneity in categorical maps*. *Ecology* 75(8):2446-2455.
- Luna-Flores, M. y J. L. Zárate-Valdez. 1994. *La producción de maíz en México ante el tratado de libre comercio*. In: *El TLC y sus repercusiones en el sector agropecuario del Centro-Norte de México*. CIESTAAM-UACH. Chapingo, México. pp. 17-38.

- Mandelbrot, B. 1967. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension. *Science* 156:636-638.
- Marschner, H. 1986. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, London, England.
- Mass, E. V. and G. J. Hoffman. 1977. Crop salt tolerance-current assesment. *J. Irrig. Drain.* 103(IR-2):115-134.
- Matheron, G. 1963. Principles of geostatistics. *Econ. Geol.* 58: 1246-1266.
- Morkoc, F., J. W. Biggar, R. J. Millar and D. R. Nielsen. 1985. Statistical analysis of sorghum yield: A stochastic approach. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:1342-1348.
- Morkoc, F., J. W. Biggar, D. R. Nielsen and D. M. Myers. 1987. Kriging with generalized covariances. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51: 1126-1131.
- Morse, D. R., J. H. Lawton, M. M. Dodson and M. H. Williamson. 1985. Fractal dimension of vegetation and the distribution of arthropod body lengths. *Nature* 314:731-733.
- Mulla, D. J. 1988. Estimating spatial patterns in water content, matric suction and hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52:1547-1553.
- Odeh, I. O. A., A. B. McBratney and D. J. Chittleborough. 1992. Fuzzy-c-means and Kriging for mapping soil as a continuous system. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:1848-1854.
- Or, D. and R. J. Hanks. 1992. Soil water and crop yield spatial variability induced by irrigation nonuniformity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:226-233.
- Ovalles, F. A. and M. E. Collins. 1988a. Variability of northwest Florida soils by principal components analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52:1430-1435.
- Ovalles, F. A. and M. E. Collins. 1988b. Evaluation of soil variability in Northwest Florida using geostatistics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52:1702-1708.
- Papadopoulus, Y. and V. V. Rending. 1983. Interactive effects of salinity and nitrogen on growth and yield of tomato plants. *Plant & Soil* 73:47-57.
- Parent, L. E., A. Karam and S. A. Visser. 1993. Compositional nutrient diagnosis of greenhouse tomato. *HortScience* 28(10):1041:1042.
- Parent, L. E., D. Isfan, N. Tremblay and A. Karam. 1994. Multivariate nutrient diagnosis of the carrot crop. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 119(3):420-426.
- Parkin, T. B., S. T. Chester and J. A. Robinson. 1990. Calculating confidence intervals for the mean of a lognormally distributed variable. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54:321-326.
- Perrier, E. R. and L. P. Wilding. 1986. An evaluation of computational methods for field uniformity studies. *Adv. Agronomy* 39:265-312.
- Perry, J. N. and R. Mead. 1979. On the power of the index of dispersion test to detect spatial pattern. *Biometrics* 35:613-632.
- Pla, L. 1986. Análisis multivariado: Método de componentes principales. Sría. Gral. OEA. Washington, D. C., USA. Serie de matemática. Monografía No. 27. 94 p.
- Riha, S. J., B. R. James, G. P. Senesac and E. Pallant. 1986. Spatial variability of soil pH and organic matter in forest plantations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50:1347-1352.
- Robertson, G. P., M. A. Huston, F. C. Evans and M. Tiedje. 1988. Spatial variability in a successional plant community: Patterns of nitrogen availability. *Ecology* 69(5):1517-1524.
- Rogers, J. S., H. M. Selim, C. E. Carter and J. L. Fouss. 1991. Variability of auger hydraulic conductivity values for a commerce silt loam. *Trans. ASAE* 34(3):876-882.
- Rojas G., M. 1979. Fisiología vegetal aplicada. 2da edición. McGraw Hill. México, D. F. 262 p.
- Rossi, R. E., D. J. Mulla, A. J. Journel and E. H. Franz. 1992. Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence. *Ecological Monographs* 6(2):277-314.
- Russo, D. 1984. Design of an optimal sampling network for estimating the variogram. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48:708-716.

- Russo, D. and E. Bresler. 1981a. Effect of field variability in soil hydraulic properties on solutions of unsaturated water and salt flows. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45:675-681.
- Russo, D. and E. Bresler. 1981b. Soil hydraulic properties as stochastic process: I. An analysis of field spatial variability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45:682-687.
- Samra, J. S., J. Richter, H. S. Gill and R. Anlauf. 1990. Spatial dependence of soil sodicity and tree growth in a natric haplustalf. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54:1228-1233.
- Sánchez de la Cruz, R. 1995. Respuesta a la aplicación de nitrógeno, potasio y azufre en dos densidades de siembra en maíz (*Zea mays* L.) en suelos calcáreos del norte de Tamaulipas. Tesis de M. C. FA-UANL. Marín, N. L., México. 125 p.
- SAS Institute, Inc. 1982. SAS user's guide: Statistics. 1982 Edition. SAS Inst., Inc. Cary, NC, USA.
- Schimel, D. S., T. G. F. Kittel, A. K. Knapp, T. R. Seastedt, W. J. Parton and V. B. Brown. 1991. Physiological interactions along resource gradients in a tallgrass prairie. *Ecology* 72(2):672-684.
- Silberbush, M., S. Sorek and A. Yakirevich. 1993. K⁺ uptake by root systems grown in soil under salinity: I. A mathematical model. *Transport in Porous Media* 11:101-116.
- Sinclair, T. R., T. Shiraiwa and G. L. Hammer. 1992. Variation in crop radiation use efficiency with increased diffuse radiation. *Crop Sci.* 32:1281-1284.
- Sisson, J. B. and P. J. Wierenga. 1981. Spatial variability of steady-state infiltration rates as a stochastic process. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45:699-704.
- Snedecor, G. W. and W. G. Cochran. 1967. Statistical methods. The Iowa State University Press. Ames, IA, USA.
- Springob, G. 1993. Basic kinetic model for potassium release from soil forming minerals. *Modeling Geo-Biosphere Processes* 2:151-162.
- Sumner, M. E. 1979. Interpretation of foliar analyses for diagnostic purposes. *Agron. J.* 71:343-348.
- Sumner, M. E. 1986. Diagnosis and recommendation integrated system (DRIS) as a guide to orchard fertilization. Food and Fertilizer Technology Center. Taiwan, China. Ext. Bull. No. 231. 21 p.
- Sumner, M. E. and F. C. Boswell. 1981. Alleviating nutrient stress. In: Arkin, G. F. and H. M. Taylor (Eds.). *Modifying the root environment to reduce crop stress*. ASAE. St. Joseph, MI, USA. pp. 99-137.
- Sumner, M. E. and M. P. W. Farina. 1986. Phosphorus interactions with other nutrients and lime in field cropping systems. *Adv. Soil Sci.* 5: 201-236.
- Swan, J. B., M. J. Shaffer, W. H. Paulson and A. E. Peterson. 1987. Simulating the effects of soil depth and climatic factors on corn yield. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51:1025-1032.
- Tabor, J. A., A. W. Warrick, D. E. Myers and D. A. Pennington. 1985. Spatial variability of nitrate in irrigation cotton: II. Soil nitrate correlated variables. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:390-394.
- Tamura, R. N., L. A. Nelson and G. C. Naderman. 1988. An investigation of the validity and usefulness of trend analysis for field plot data. *Agron. J.* 80:712-718.
- Terman, G. L., J. C. Noggle and O. P. Engelstad. 1972. Concentrations of N and P in young corn plants as affected by various growth-limiting factors. *Agron. J.* 64:384-388.
- Terman, G. L., J. C. Noggle and C. M. Hunt. 1977. Growth rate-nutrient concentration relationships during early growth of corn as affected by applied N, P and K. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41:363-368.
- Tollenaar, M. and A. Aguilera. 1992. Radiation use efficiency of an old and a new maize hybrid. *Agron. J.* 84:536-541.
- Trangmar, B. B., R. S. Yost and G. Uehara. 1985. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Adv. Agron.* 38:45-94.

- Trangmar, B. B., R. S. Yost and G. Uehara. 1986. Spatial dependence and interpolation of soil properties in West Sumatra, Indonesia: I. Anisotropic variation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50:1391-1395.
- Trangmar, B. B., R. S. Yost, M. K. Wade, G. Uehara and M. Sudjadi. 1987. Spatial variation of soil properties and rice yield on recently cleared land. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51:668-674.
- Valdez-Cepeda, R. D. 1991. Estimación del agua en el suelo. *TERRA* 9(2):114-121.
- Valdez-Cepeda, R. D., M. R. Almeida-Martínez and S. Rubio-Díaz. 1992. Seasonal variation of rainfall water in soil. In: Raynal, J. A. (Editor). *Hydrology and water resources education, training and management*. Water Res. Pub. Littleton, CO, USA. pp. 141-146.
- Valdez-Cepeda, R. D. y E. Olivares-Sáenz. 1996. Dimensión fractal de los rendimientos medios anuales de maíz, frijol, trigo y arroz. *Memorias del XVI Congreso Nacional de la SOMEFL, A. C. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.* p. 254.
- van Es, H. M., C. L. van Es and D. K. Cassel. 1989. Application of regionalized variable theory to large-plot field experiments. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53:1178-1183.
- Vauclin, M., S. R. Vieira, G. Vachaud and D. R. Nielsen. 1983. The use of cokriging with limited field soil observations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47:175-184.
- Vieira, S. R., J. L. Hatfield, D. R. Nielsen and J. W. Biggar. 1982. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. *Hilgardia* 51(3):1-75.
- Vieira, S. R., D. R. Nielsen and J. W. Biggar. 1981. Spatial variability of field-measured infiltration rate. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45:1040-1048.
- Walworth, J. L. and M. E. Sumner. 1987. The diagnosis and recommendation integrated system (DRIS). *Adv. Soil Sci.* 6:149-188.
- Warren, J. A. and I. Méndez. 1982. Methods for estimating background variation in field experiments. *Agron. J.* 74:1004-1009.
- Webster, R. 1985. Quantitative spatial analysis of soil in the field. *Adv. Soil Sci.* 3:1-70.
- Wendroth, O., A. M. Al-Omran, C. Kirda, K. Reichardt and D. R. Nielsen. 1992. State-space approach to spatial variability of crop yield. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:801-807.
- West, C. I., A. P. Mallarino, W. F. Wedin and D. B. Marx. 1989. Spatial variability of soil chemical properties in grazed pastures. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53:784-789.
- Yates, S. R., A. W. Warrick, A. D. Matthias and S. Musil. 1988. Spatial variability of remotely sensed surface temperatures at field scale. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52:40-45.
- Yevjevich, V. 1972. *Probability and statistics in hydrology*. Water Res. Publ. Littleton, CO, USA. 302 p.
- Yost, R. S., G. Uehara and R. L. Fox. 1982. Geostatistical analysis of soil chemical properties of large land areas: I. Semi-variograms. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46:1028-1032.

7. APENDICE

Cuadro A1 . Matriz de correlación (r de Pearson) entre variables estandarizadas. Ciclo OI 1993-94.

	X	Y	ARE	LIMO	ARC	pH	MO	CE	NS	lnPS	KS	OLO	MAZ
X	1.00												
Y	-.07	1.00											
ARE	.00	-.41	1.00										
LIMO	.11	.30	-.74	1.00									
ARC	-.16	.15	-.34	-.38	1.00								
pH	.30	-.05	.16	.00	-.23	1.00							
MO	-.19	.02	.10	-.16	.09	-.10	1.00						
CE	.01	-.02	.05	.05	-.14	.40	.07	1.00					
NS	-.19	.02	.10	-.16	.09	-.10	1.00	.07	1.00				
lnPS	.23	-.07	.03	.00	-.04	.25	.11	-.05	.11	1.00			
KS	.03	-.19	.06	.06	-.17	.24	.15	.27	.15	.12	1.00		
OLO	.14	.00	-.21	.19	.03	-.08	.03	-.07	.03	.21	.03	1.00	
MAZ	.15	.01	-.12	.16	-.05	-.10	-.01	-.08	-.01	.17	-.01	.84	1.00
REN	.15	.01	-.10	.14	-.07	-.10	-.01	-.08	-.01	.15	-.02	.78	.99
B	.15	-.04	-.13	.16	-.04	-.10	.00	-.08	.00	.19	-.01	.92	.96
BA	.14	-.05	-.13	.15	-.03	-.11	.00	-.06	.00	.16	-.01	.91	.95
AM	.25	.16	-.01	.10	-.12	-.07	-.08	-.05	-.08	-.01	-.09	.04	.13
AP	.13	.14	-.03	.12	-.13	-.13	-.01	-.11	-.01	.11	.03	.55	.59
Nf	-.18	.00	-.04	.01	.04	.01	.14	-.00	.14	-.22	.03	.09	.05
lnPf	-.68	-.07	.06	-.13	.10	-.17	.22	-.02	.22	-.19	.06	-.02	.04
lnKf	.42	.01	-.03	.09	-.08	.20	-.20	.10	-.20	.20	-.06	.08	.14
Caf	-.07	.17	-.06	.03	.03	.04	-.05	.20	-.05	.03	-.02	.08	.11
Mgf	-.01	-.06	.07	.01	-.11	-.02	-.10	-.01	-.10	.23	-.06	.12	.21
N/P	.59	.07	-.08	.12	-.06	.17	-.17	.02	-.17	.08	-.04	.05	-.02
N/K	-.44	.02	.01	-.08	.10	-.21	.23	-.13	.23	-.25	.05	-.04	-.08
P/K	-.65	-.01	.04	-.12	.12	-.28	.27	-.12	.27	-.24	.04	-.06	-.04
Ca/N	-.01	.17	-.04	.03	.01	.05	-.09	.20	-.09	.10	-.02	.04	.09
lnCa/P	.39	.20	-.08	.11	-.04	.13	-.18	.17	-.18	.16	-.04	.08	.07
lnCa/K	-.36	.11	-.03	-.04	.09	-.12	.12	.06	.12	-.11	.02	.01	-.01
Mg/N	.04	-.05	.08	.01	-.12	-.01	-.14	.00	-.14	.29	-.05	.08	.17
lnMg/P	.47	-.00	.03	.09	-.17	.13	-.22	.02	-.22	.31	-.10	.09	.10
Mg/K	-.46	-.05	.08	-.09	.02	-.22	.14	-.10	.14	-.01	-.01	.01	.02
lnMg/Ca	.04	-.22	.10	-.03	-.10	-.03	-.03	-.16	-.03	.11	-.06	-.01	.02
IN	.12	-.01	-.05	.02	.04	.01	.10	-.09	.10	-.20	.03	-.05	-.17
IP	-.65	-.10	.06	-.14	.11	-.17	.25	-.06	.25	-.20	.09	-.07	-.04
IK	.55	.00	-.03	.10	-.09	.21	-.23	.06	-.23	.17	-.05	.03	.06
ICa	-.02	.21	-.07	.03	.05	.02	-.05	.17	-.05	.01	-.00	.03	.03
IMg	.06	-.09	.09	.00	-.13	-.05	-.12	-.07	-.12	.26	-.08	.07	.14
IBN	-.20	.07	.02	-.02	.01	-.14	-.06	.01	-.06	.08	-.08	.08	.17

$r \geq 0.22$ o $r \leq -0.22$ son significativos ($p < 0.05$)

...Continuación Cuadro A1.

	REN	B	BA	AM	AP	Nf	lnPf	lnKf	Ca _f	Mg _f	N/P	N/K	P/K
REN	1.00												
B	.93	1.00											
BA	.92	.99	1.00										
AM	.15	.08	.06	1.00									
AP	.58	.59	.56	.49	1.00								
Nf	.04	.05	.06	.06	.04	1.00							
lnPf	.06	.03	.05	-.22	.02	.16	1.00						
lnKf	.14	.08	.08	.15	-.03	-.12	-.31	1.00					
Ca _f	.11	.11	.12	.20	.25	.03	.05	.05	1.00				
Mg _f	.22	.15	.15	-.00	.10	-.05	.15	.41	.20	1.00			
N/P	-.04	-.01	-.03	.22	-.02	.25	-.90	.27	-.02	-.18	1.00		
N/K	-.08	-.03	-.04	-.10	.05	.41	.34	-.94	-.02	-.38	-.18	1.00	
P/K	-.03	-.02	-.02	-.20	.04	.19	.76	-.83	-.01	-.16	-.67	.83	1.00
Ca/N	.09	.09	.09	.17	.23	-.29	-.00	.10	.95	.21	-.10	-.16	-.07
lnCa/P	.06	.08	.07	.29	.20	-.10	-.59	.25	.76	.07	.55	-.25	-.50
lnCa/K	-.01	.04	.04	.03	.20	.13	.26	-.69	.67	-.16	-.21	.68	.61
Mg/N	.18	.12	.12	-.03	.08	-.37	.09	.42	.18	.94	-.26	-.49	-.20
lnMg/P	.10	.07	.05	.14	.05	-.16	-.59	.57	.14	.70	.50	-.56	-.68
Mg/K	.03	.04	.03	-.17	.11	.07	.47	-.63	.10	.43	-.46	.60	.70
lnMg/Ca	.02	-.02	-.02	-.17	-.17	-.02	.05	.26	-.67	.54	-.08	-.25	-.11
IN	-.19	-.12	-.13	.01	-.12	.48	-.35	-.40	-.47	-.71	.53	.50	.06
IP	-.03	-.03	-.01	-.28	-.04	.01	.90	-.56	-.19	-.18	-.87	.51	.86
IK	.06	.01	.01	.15	-.10	-.23	-.53	.92	-.18	.12	.44	-.90	-.91
ICa	.03	.06	.06	.20	.23	-.09	-.09	-.14	.93	-.08	.07	.12	.03
IMg	.15	.09	.08	-.05	.04	-.21	.01	.29	-.02	.93	-.11	-.32	-.15
IBN	.18	.13	.12	.02	.16	-.21	.30	.11	.58	.72	-.35	-.12	.16

r ≥ 0.22 o r ≤ -0.22 son significativos (p < 0.05)

...Continuación Cuadro A1.

	Ca/N	ln Ca/P	ln Ca/K	Mg/N	ln Mg/P	Mg/K	ln Mg/Ca	IN	IP	IK	ICa	IMg	IBN
Ca/N	1.00												
lnCa/P	.76	1.00											
lnCa/K	.60	.36	1.00										
Mg/N	.29	.10	-.18	1.00									
lnMg/P	.18	.49	-.31	.70	1.00								
Mg/K	.07	-.21	.54	.38	.01	1.00							
lnMg/Ca	-.64	-.59	-.66	.51	.40	.22	1.00						
IN	-.61	-.17	-.03	-.83	-.33	-.22	-.10	1.00					
IP	-.19	-.73	.27	-.17	-.79	.44	.01	-.08	1.00				
IK	-.09	.20	-.81	.18	.48	-.81	.24	-.13	-.63	1.00			
ICa	.92	.81	.77	-.04	.01	.06	-.84	-.27	-.20	-.26	1.00		
IMg	.05	-.01	-.22	.94	.75	.50	.69	-.60	-.21	.10	-.22	1.00	
IBN	.62	.26	.35	.74	.38	.51	.07	-.81	.02	-.18	.40	.65	1.00

r ≥ 0.22 o r ≤ -0.22 son significativos (p < 0.05)

Cuadro A2. Valores propios o eigen valores de los tres primeros componentes principales (CP) extraídos de 34 variables. Ciclo OI 1993-94.

CP	Valor propio	% Varianza total	Valor propio acumulado	% Varianza acumulada
1	7.500358	22.05988	7.50036	22.05988
2	5.565511	16.36915	13.06587	38.42903
3	4.974483	14.63083	18.04035	53.05986

Cuadro A3. Coeficientes de los tres primeros componentes principales (CP) o vectores propios extraídos de 34 variables. Ciclo OI 1993-94.

Variable	CP 1	CP 2	CP 3
X	.087675	.045448	.038781
Y	.002771	-.015920	.055236
ARE	-.003965	-.003787	-.036845
LIMO	.021065	.002501	.028134
ARC	-.024128	.001731	.011505
pH	.034350	.021463	.019205
MO	-.040738	.005044	-.010406
CE	.011813	-.011242	.034830
lnPS	.042345	-.025563	-.017566
KS	-.008124	.008624	.003399
REN	.017036	-.038562	-.005277
AM	.030029	-.009742	.061359
AP	.004902	-.049749	.040302
Nf	-.034665	.041721	.021813
lnPf	-.089986	-.061110	-.077059
lnKf	.111469	.003225	-.030407
Caf	.009019	-.126804	.123511
Mgf	.053331	-.115843	-.105681
N/P	.074188	.076299	.086972
N/K	-.112461	.005540	.035155
P/K	-.123410	-.040731	-.026486
Ca/N	.020625	-.134433	.111379
lnCa/P	.065772	-.063783	.147612
lnCa/K	-.075315	-.093266	.109614
Mg/N	.060241	-.122495	-.105020
lnMg/P	.108200	-.051041	-.029493
Mg/K	-.067622	-.101409	-.064003
lnMg/Ca	.030841	.023734	-.179100
IN	-.035999	.144484	.054670
IP	-.110782	-.015597	-.067993
IK	.112323	.058091	-.016016
ICa	-.003099	-.101481	.158119
IMg	.053417	-.096579	-.124277
IBN	.013173	-.161328	-.030033
CS	.182569	.211942	.224179

Cuadro A4. Correlaciones entre los tres primeros componentes principales (CP) y las variables. Ciclo OI 1993-94.

Variable	CP 1	CP 2	CP 3
X	.657596	.252939	.192914
Y	.020785	-.088606	.274769
ARE	-.029737	-.021075	-.183284
LIMO	.157999	.013919	.139953
ARC	-.180965	.009636	.057234
pH	.257639	.119453	.095533
MO	-.305552	.028072	-.051765
CE	.088604	-.062569	.173260
lnPS	.317605	-.142269	-.087382
KS	-.060934	.047998	.016909
REN	.127774	-.214615	-.026252
AM	.225227	-.054221	.305227
AP	.036764	-.276877	.200484
Nf	-.260003	.232198	.108507
lnPf	-.674925	-.340107	-.383330
lnKf	.836061	.017951	-.151261
Caf	.067643	-.705730	.614402
Mgf	.400004	-.644723	-.525709
N/P	.556434	.424641	.432639
N/K	-.843498	.030836	.174878
P/K	-.925617	-.226686	-.131754
Ca/N	.154691	-.748190	.554051
lnCa/P	.493311	-.354988	.734292
lnCa/K	-.564888	-.519072	.545272
Mg/N	.451832	-.681749	-.522421
lnMg/P	.811540	-.284072	-.146712
Mg/K	-.507192	-.564394	-.318381
lnMg/Ca	.231315	.132093	-.890932
IN	-.270003	.804129	.271953
IP	-.830902	-.086808	-.338231
IK	.842459	.323306	-.079673
ICa	-.023241	-.564794	.786562
IMg	.400648	-.537512	-.618215
IBN	.098801	-.897875	-.149398
Varianza Explicada	7.500358	5.565511	4.974483

BIBLIOTECA Agronomía U.A.N.L.

Cuadro A5. Coeficientes de los tres primeros componentes principales (CP) o vectores propios extraídos de 34 variables después de una rotación (maximización de la varianza de las combinaciones lineales). Ciclo OI 1993-94.

Variable	CP 1	CP 2	CP 3
X	-.104882	-.011261	.011375
Y	-.008485	-.012393	.055557
ARE	.013417	.018116	-.029654
LIMO	-.026032	-.005115	.023189
ARC	.018010	-.017917	.008493
pH	-.043496	-.009027	.006000
MO	.036315	-.017987	-.012289
CE	-.013757	-.002208	.035846
lnPS	-.023001	.047170	-.001018
KS	.002886	-.011862	-.001702
REN	.001895	.039419	.015736
AM	-.036496	-.007155	.058124
AP	.006844	.020990	.060298
Nf	.008645	-.057713	-.003551
lnPf	.122015	.039750	-.036088
lnKf	-.092956	.063764	-.025570
Caf	.015797	.042222	.171415
Mgf	.024181	.161161	-.029572
N/P	-.116505	-.063161	.036422
N/K	.089173	-.073028	.025085
P/K	.131753	-.014691	-.003970
Ca/N	.011409	.059020	.165195
lnCa/P	-.065596	.010120	.160556
lnCa/K	.079802	-.015940	.140583
Mg/N	.020641	.169087	-.025437
lnMg/P	-.068100	.102638	.003194
Mg/K	.115747	.074446	-.003661
lnMg/Ca	.003702	.079764	-.164971
IN	-.039625	-.150912	-.028561
IP	.119744	-.008415	-.052245
IK	-.119395	.016200	-.041590
ICa	.008305	.001432	.187720
IMg	.020456	.155350	-.055442
IBN	.061092	.141477	.057917
CS	.186086	.210583	.219620

Cuadro A6. Proporción de la varianza de cada variable explicada por diferente número de componentes principales (CP). Ciclo OI 1993-94.

Variable	Con 1 CP	Con 2 CP	Con 3 CP	R ²
X	.452432	.496411	.533626	.576740
Y	.000432	.008283	.083781	.307313
ARE	.000884	.001328	.034921	.885655
LIMO	.024964	.025157	.044744	.887814
ARC	.032748	.032841	.036117	.802148
pH	.066378	.080647	.089773	.399811
MO	.093362	.094150	.096829	.209130
CE	.007851	.011765	.041785	.286003
lnPS	.100873	.121113	.128749	.299904
KS	.003713	.006017	.006303	.208328
REN	.016326	.062386	.063075	.418909
AM	.050727	.053667	.146831	.355207
AP	.001352	.078013	.118206	.540989
Nf	.067601	.121517	.133291	.817208
lnPf	.455524	.571197	.718139	.928436
lnKf	.698998	.699320	.722200	.930072
Caf	.004576	.502630	.880120	.930489
Mgf	.160003	.575671	.852041	.929938
N/P	.309618	.489938	.677114	.913034
N/K	.711488	.712439	.743021	.928518
P/K	.856767	.908154	.925513	.933704
Ca/N	.023929	.583718	.890690	.934826
lnCa/P	.243355	.369372	.908557	.936406
lnCa/K	.319099	.588534	.885855	.929616
Mg/N	.204152	.668934	.941858	.938218
lnMg/P	.658597	.739294	.760818	.933812
Mg/K	.257243	.575783	.677150	.921184
lnMg/Ca	.053507	.070955	.864716	.916955
IN	.072902	.719525	.793484	.935962
IP	.690398	.697934	.812334	.936904
IK	.709738	.814264	.820612	.937344
ICa	.000540	.319532	.938211	.939487
IMg	.160519	.449438	.831627	.937997
IBN	.009762	.815942	.838261	.851970

Cuadro A7. Matriz de correlación (r de Pearson) entre variables estandarizadas. Ciclo OI 1994-95.

	X	Y	Pw	ARE	LIMO	ARC	pH	MO	CO	lnCE	lnCaS	lnMgS	NaS
X	1.00												
Y	.00	1.00											
Pw	-.04	.10	1.00										
ARE	.11	-.08	-.17	1.00									
LIMO	-.23	.16	.04	-.40	1.00								
ARC	.15	-.11	.08	-.33	-.73	1.00							
pH	-.41	.02	-.28	-.07	.31	-.26	1.00						
MO	-.24	.07	-.03	-.04	.03	.00	-.06	1.00					
CO	-.22	-.09	-.19	-.05	.01	.03	.36	-.04	1.00				
lnCE	.08	-.02	-.15	.20	-.12	-.02	-.03	.23	-.18	1.00			
lnCaS	.38	.02	-.09	.22	-.17	.02	-.11	.13	-.18	.89	1.00		
lnMgS	-.29	.03	-.08	.13	-.03	-.06	-.03	.31	-.08	.85	.61	1.00	
NaS	-.14	-.08	-.36	.20	.00	-.14	.25	.12	.00	.68	.47	.61	1.00
KSS	-.12	.05	-.19	.00	.07	-.07	.33	.30	.32	.64	.56	.57	.46
HCO ₃	.13	-.23	-.34	.05	.11	-.15	.27	-.24	.33	-.27	-.22	-.35	-.02
SO ₄	.43	-.04	-.04	.25	-.24	.07	-.40	.14	-.49	.74	.77	.55	.32
lnCIS	-.34	.11	-.13	.12	.05	-.13	.27	.20	.26	.50	.33	.52	.60
PSI	-.32	-.14	-.25	-.02	.17	-.15	.39	-.13	.14	-.30	-.53	-.26	.42
NS	-.48	-.11	-.04	.05	.10	-.13	.24	.26	.01	.53	.40	.62	.37
PS	-.09	-.06	.03	-.15	-.06	.17	.16	.10	.37	-.20	-.16	-.12	-.20
KS	-.25	.18	-.05	-.07	-.01	.07	-.02	.44	-.12	.31	.16	.38	.18
OLO	-.22	-.02	.07	-.07	.08	-.03	.17	.12	.09	-.00	-.05	.03	.13
MAZ	-.18	-.04	.06	-.12	.10	-.02	.22	.09	.16	-.01	-.03	-.01	.11
REN	-.18	-.04	.06	-.13	.11	-.01	.22	.08	.16	-.01	-.03	-.01	.11
AP	-.07	.21	.03	-.08	.05	.01	.11	.12	.00	.08	-.02	.07	.21
DT	-.06	-.19	.01	-.13	.04	.05	.16	-.05	.13	.03	.02	-.02	.12
AF	-.11	-.18	.17	-.18	.12	.01	-.02	-.01	.01	.02	.01	.02	-.06
RFA	.20	.15	-.00	-.04	-.04	.07	.01	-.24	.14	-.16	-.09	-.25	-.12
FOTO	.00	.18	.13	-.07	.18	-.13	-.09	-.10	-.01	-.03	-.05	.01	.02
COND	-.06	.10	.50	-.22	.10	.06	-.34	.04	-.13	-.22	-.21	-.13	-.28
CO ₂	-.19	-.03	-.07	-.09	.06	.00	.16	-.23	.05	-.30	-.39	-.21	-.17
lnTRAN	-.25	.18	.22	-.18	.25	-.12	.01	-.09	.02	-.28	-.34	-.14	-.19
Nf	.08	.12	-.43	.06	.22	-.27	.26	-.18	.09	-.04	-.05	.00	.26
Pf	-.02	-.17	.15	-.00	-.14	.14	-.24	.04	-.24	-.01	.03	.00	-.13
Kf	-.55	-.02	-.13	-.10	.18	-.11	.21	.19	-.07	.08	-.10	.27	.15
Ca _f	-.69	-.05	.23	.01	.11	-.11	.24	.13	.21	-.37	-.56	-.11	-.09
Mg _f	-.58	-.07	.13	-.18	.18	-.04	.08	.12	.07	-.08	-.28	.15	.05
N/P	.03	.18	-.21	.01	.21	-.22	.30	-.10	.22	.02	-.01	.02	.18
lnN/K	.49	.07	.00	.10	-.09	.02	-.10	-.22	.10	-.10	.05	-.24	-.06
P/K	.46	-.10	.30	.05	-.30	.26	-.44	-.11	-.13	-.11	.08	-.26	-.27
Ca/N	-.62	-.09	.36	-.02	.00	.01	.10	.19	.14	-.28	-.44	-.07	-.16
lnCa/P	-.42	.10	.04	.02	.18	-.20	.36	.04	.34	-.23	-.37	-.07	.05
Ca/K	.02	.01	.30	.09	-.10	.04	-.04	-.09	.20	-.32	-.29	-.31	-.19
Mg/N	-.58	-.09	.21	-.20	.12	.02	.02	.16	.05	-.06	-.25	.15	.00
Mg/P	-.55	.03	.05	-.17	.24	-.11	.23	.08	.22	-.06	-.29	.17	.14
Mg/K	-.21	-.06	.28	-.12	.05	.04	-.10	-.02	.13	-.18	-.25	-.06	-.07
Mg/Ca	-.20	-.06	.01	-.21	.14	.02	-.07	.05	-.07	.14	.04	.22	.11
IN	.46	.15	-.24	.10	.02	-.10	.07	-.19	.08	.05	.17	-.10	.10
IP	.36	-.15	.17	.04	-.29	.26	-.42	-.01	-.28	.04	.20	-.10	-.21
IK	-.24	.02	-.29	-.04	.14	-.12	.22	.14	-.10	.23	.14	.28	.19
ICa	-.27	.03	.22	.09	-.01	-.06	.18	-.00	.25	-.32	-.38	-.23	-.14
IMg	-.45	-.06	.18	-.19	.14	.00	.00	.10	.09	-.06	-.22	.13	.04
IBN	-.40	-.04	.39	-.11	.09	-.01	.07	-.01	.19	-.22	-.35	-.05	-.12

r ≥ 0.24 o r ≤ -0.24 son significativos (p < 0.05)

...Continuación Cuadro A7.

	KSS	HCO ₃	SO ₄	InCIS	PSI	NS	PS	KS	OLO	MAZ	REN	AP	DT
KSS	1.00												
HCO ₃	-.05	1.00											
SO ₄	.22	-.35	1.00										
InCIS	.54	-.17	-.08	1.00									
PSI	-.19	.32	-.48	.16	1.00								
NS	.43	-.21	.25	.32	-.18	1.00							
PS	.04	.10	-.24	-.08	-.04	-.02	1.00						
KS	.40	-.28	.15	.17	-.11	.25	.02	1.00					
OLO	.06	-.19	-.15	.20	.13	.19	-.14	-.01	1.00				
MAZ	.07	-.13	-.20	.25	.12	.18	-.16	-.08	.93	1.00			
REN	.06	-.12	-.21	.25	.12	.18	-.16	-.09	.91	1.00	1.00		
AP	.25	-.04	-.05	.19	.18	-.07	.06	.36	.15	.13	.12	1.00	
DT	-.03	.06	-.10	.15	.15	-.02	-.03	-.07	.30	.36	.37	.15	1.00
AF	-.01	.02	-.05	.04	-.06	.13	.03	-.11	.27	.32	.32	.03	.49
RFA	-.06	.22	-.12	-.09	.04	-.25	.09	-.12	-.07	-.09	-.09	.05	.03
FOTO	.06	.17	-.01	-.05	.09	-.06	-.05	-.06	-.01	-.03	-.03	-.04	-.05
COND	-.18	-.18	-.07	-.16	-.07	-.13	.01	-.09	.23	.15	.14	-.02	-.05
CO ₂	-.21	-.09	-.32	-.15	.21	-.07	.08	.05	.22	.24	.23	-.01	.05
InTRAN	-.07	.04	-.30	-.04	.17	-.12	-.00	-.02	.13	.12	.12	-.00	-.05
Nf	.06	.34	-.19	.16	.27	-.21	-.01	.07	-.08	-.04	-.04	.10	.13
Pf	-.18	-.21	.31	-.40	-.18	.25	-.08	.04	.16	.07	.06	-.14	.00
Kf	.05	-.25	.06	-.07	.11	.39	.08	.41	.15	.05	.04	-.03	-.05
CaI	-.17	-.11	-.49	.12	.38	.20	.05	-.00	.20	.15	.14	.02	-.01
Mgf	-.07	-.14	-.16	.02	.21	.24	.05	.21	.12	.04	.02	.00	.16
N/P	.19	.27	-.31	.40	.21	-.23	.07	-.04	-.14	-.06	-.05	.16	.03
InN/K	-.04	.33	-.15	.13	-.00	-.41	-.07	-.37	-.16	-.06	-.05	.09	.09
P/K	-.23	.01	.20	-.29	-.25	-.15	-.16	-.37	.00	.02	.02	-.05	.08
Ca/N	-.15	-.24	-.33	.04	.21	.26	.05	-.01	.20	.14	.13	-.03	-.06
InCa/P	.04	.10	-.58	.41	.39	-.06	.10	-.06	.02	.06	.06	.14	-.01
Ca/K	-.18	.12	-.40	.16	.17	-.20	-.04	-.40	-.07	.04	.03	.08	.05
Mg/N	-.08	-.22	-.11	-.00	.15	.29	.04	.19	.15	.06	.04	-.02	.12
Mg/P	.05	.00	-.35	.28	.32	.08	.11	.19	.02	-.01	-.01	.12	.18
Mg/K	-.15	.06	-.23	.06	.16	-.05	-.02	-.11	.03	.01	.00	.06	.24
Mg/Ca	.01	-.06	.14	-.07	.00	.14	.02	.23	-.01	-.08	-.08	-.02	.18
IN	.12	.33	-.08	.21	.01	-.36	-.02	-.17	-.19	-.09	-.08	.11	.02
IP	-.18	-.16	.44	-.45	-.36	.07	-.13	-.13	.06	.02	.02	-.16	-.04
IK	.20	-.17	.21	-.04	-.03	.26	.10	.42	.04	-.01	-.01	-.07	-.15
ICa	-.10	.03	-.49	.23	.26	-.06	.02	-.26	.04	.08	.08	.07	-.07
IMg	-.05	-.08	-.16	.08	.18	.14	.05	.14	.08	.02	.01	.04	.20
IBN	-.10	-.07	-.38	.20	.21	.07	-.02	-.21	.08	.08	.08	.08	.13

r≥0.24 o r≤-0.24 son significativos (p<0.05)

...Continuación Cuadro A7.

	AF	RFA	FOTO	COND	CO ₂	lnTRAN	Nf	Pf	Kf	Ca _f	Mg _f	N/P	lnN/K
AF	1.00												
RFA	.15	1.00											
FOTO	.01	.03	1.00										
COND	.12	-.08	.62	1.00									
CO ₂	-.03	-.01	-.36	-.09	1.00								
lnTRAN	.02	.01	.78	.78	.07	1.00							
Nf	-.09	-.02	.10	-.35	.00	-.08	1.00						
Pf	.12	-.26	-.06	.21	-.03	-.11	-.36	1.00					
Kf	.03	-.31	.02	.10	.10	.11	-.03	.49	1.00				
Ca _f	.04	-.13	.05	.28	.21	.32	-.24	.15	.35	1.00			
Mg _f	.05	-.07	.13	.23	.03	.25	-.15	.37	.55	.50	1.00		
N/P	-.09	.24	.09	-.25	.03	.09	.54	-.97	-.45	-.18	-.37	1.00	
lnN/K	-.05	.27	-.01	-.19	-.09	-.12	.32	-.58	-.95	-.36	-.54	.60	1.00
P/K	.08	.05	-.12	.13	-.13	-.21	-.34	.45	-.53	-.16	-.16	-.48	.41
Ca/N	.06	-.11	-.00	.37	.18	.29	-.59	.26	.32	.93	.48	-.36	-.44
lnCa/P	-.06	.15	.08	.01	.17	.30	.11	-.75	-.22	.54	-.00	.71	.27
Ca/K	.00	.20	-.03	.09	.05	.09	-.17	-.37	-.73	.36	-.18	.31	.68
Mg/N	.07	-.08	.09	.30	.03	.25	-.36	.42	.54	.53	.98	-.47	-.59
Mg/P	-.02	.10	.18	.11	.05	.33	.08	-.28	.21	.40	.78	.26	-.15
Mg/K	.04	.14	.11	.20	-.06	.18	-.16	.05	-.20	.28	.69	-.09	.18
Mg/Ca	.02	-.01	.14	.10	-.12	.09	-.00	.33	.41	-.08	.82	-.32	-.38
IN	-.09	.22	-.00	-.35	-.06	-.14	.58	-.77	-.70	-.54	-.73	.82	.83
IP	.09	-.17	-.15	.13	-.11	-.26	-.42	.86	.07	-.19	-.06	-.87	-.21
IK	-.02	-.22	.03	-.07	.07	.02	.12	.17	.80	-.05	.07	-.15	-.76
ICa	-.01	.12	-.03	.10	.18	.20	-.21	-.44	-.39	.62	-.20	.37	.34
IMg	.04	.03	.15	.23	-.03	.24	-.16	.18	.28	.35	.94	-.21	-.28
IBN	.09	.16	.05	.27	.10	.30	-.40	-.19	-.26	.62	.43	.11	.17

r ≥ .24 o r ≤ -.24 son significativos (p < .05)

...Continuación Cuadro A7.

	P/K	Ca/N	lnCa/P	Ca/K	Mg/N	Mg/P	Mg/K	Mg/Ca	IN	IP	IK	ICa	IMg	IBN
P/K	1.00													
Ca/N	-.01	1.00												
lnCa/P	-.46	.40	1.00											
Ca/K	.44	.35	.59	1.00										
Mg/N	-.09	.58	-.03	-.14	1.00									
Mg/P	-.43	.31	.49	.09	.71	1.00								
Mg/K	.32	.29	.14	.42	.68	.71	1.00							
Mg/Ca	-.08	-.06	-.37	-.44	.77	.63	.61	1.00						
IN	-.05	-.68	.30	.30	-.82	-.23	-.27	-.48	1.00					
IP	.74	.01	-.84	-.19	.03	-.62	-.08	.06	-.44	1.00				
IK	-.72	-.07	-.20	-.87	.05	-.07	-.64	.11	-.28	-.07	1.00			
ICa	.02	.59	.82	.83	-.14	.09	.09	-.64	.18	-.39	-.45	1.00		
IMg	-.06	.36	.06	-.01	.92	.86	.86	.85	-.55	-.15	-.16	-.16	1.00	
IBN	.16	.66	.60	.73	.48	.59	.72	.08	-.21	-.30	-.61	.67	.54	1.00

r ≥ .24 o r ≤ -.24 son significativos (p < .05)

Cuadro A8. Valores propios o eigen valores de los siete primeros componentes principales (CP) extraídos de 53 variables. Ciclo 1994-95.

CP	Valor propio	% Varianza total	Valor propio acumulado	% Varianza acumulada
1	8.231594	16.14038	8.23159	16.14038
2	7.698117	15.09435	15.92971	31.23473
3	6.004989	11.77449	21.93470	43.00922
4	3.922912	7.69198	25.85761	50.70120
5	3.365148	6.59833	29.22276	57.29953
6	2.715289	5.32410	31.93805	62.62362
7	2.085134	4.08850	34.02318	66.71212

Cuadro A9. Coeficientes de los siete primeros componentes principales (CP) o vectores propios extraídos de 53 variables. Ciclo OI 1994-95.

Variable	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	CP 6	CP 7
X	-.088848	-.009528	.066074	-.016201	-.080682	-.035145	-.005319
Y	-.006937	.010725	-.019308	.003113	-.006541	-.175415	-.072997
Pw	.033254	.008297	.071571	-.073151	.039072	-.136463	.025700
ARE	-.028939	-.005070	-.010277	-.038568	.060273	.044531	-.044316
LIMO	.026830	.018677	-.047414	.063657	-.051074	-.085802	.195172
ARC	-.005908	-.015701	.054979	-.037653	.007750	.054229	-.167720
pH	.018216	.032502	-.087409	.063845	.031575	.115094	.095758
MO	.019535	-.029973	-.037167	-.051846	.075753	-.037084	-.085631
CO	.016352	.047540	-.035580	.007370	.006742	.115687	.003683
lnCE	-.030441	-.068831	-.083488	-.139480	.015538	-.015780	.033139
lnCaS	-.056963	-.068179	-.047439	-.129387	.001109	-.027816	.045893
lnMgS	.003859	-.060907	-.094416	-.122566	.029988	-.033743	-.007562
NaS	-.009290	-.025634	-.107769	-.077401	-.007048	.070439	.093474
KSS	-.014591	-.025859	-.101055	-.087365	.032025	-.014418	.027643
HCO ₃	-.021999	.047618	-.003288	.066562	-.102065	.093083	.086312
SO ₄	-.043727	-.091904	.001229	-.092303	-.004841	-.056990	-.016500
lnCIS	.004358	.019752	-.107420	-.118895	.048612	.018907	.058275
PSI	.034786	.053166	-.037591	.067031	-.025159	.103155	.077775
NS	.031088	-.053074	-.062571	-.072452	.101046	.047508	.082892
PS	.011607	.013366	-.005323	.052366	-.002032	.030323	-.145483
KS	.018174	-.047253	-.069265	.002331	.012427	-.058038	-.171093
REN	.017451	.007745	-.011444	-.011902	.057694	.058228	.281803
AP	.002524	.013502	-.036875	-.035038	-.008081	-.010031	-.013683
DT	.013438	.010003	-.008284	-.037482	-.072438	.131586	.224825
AF	.012814	-.003000	.012417	-.021856	-.001639	.046014	.260866
RFA	-.012755	.040810	.015538	-.011759	-.078242	.007265	-.057792
FOTO	.018791	.010465	-.004457	.005752	-.083862	-.247291	.155221
COND	.047977	.001618	.060200	-.007573	.002725	-.242905	.125469
CO ₂	-.018528	.024947	.006113	.088833	.060982	.091721	-.034127
lnTRAN	.050416	.033287	.005056	.037107	-.027754	-.240946	.125544
Nf	-.039872	.027138	-.075693	.081056	-.121389	.029581	.041362
Pf	.035525	-.089223	.081357	.023584	.025487	.068470	.082502
Kf	.064723	-.074551	-.048514	.116414	.038360	.000164	.000879
Caf	.090532	.038071	.003623	.011822	.135049	.018147	.005980
Mgf	.106748	-.025204	-.009460	-.017981	-.097414	.037523	-.036533
N/P	-.040906	.086480	-.091357	-.006314	-.044669	-.059471	-.042938
lnN/K	-.068780	.082272	.021925	-.091590	-.068707	.013413	.010675
P/K	-.023969	-.005493	.127894	-.107676	-.010508	.069618	.069489
Ca/N	.091374	.019320	.030125	-.021408	.160978	.002682	-.014033
lnCa/P	.028162	.102527	-.063869	-.018482	.075150	-.046095	-.057782
Ca/K	.002246	.099264	.050358	-.116611	.060220	.021527	-.004126
Mg/N	.109707	-.030611	.005528	-.033906	-.061993	.029578	-.041617
Mg/P	.084839	.033594	-.061286	-.043783	-.122429	-.005331	-.092248
Mg/K	.069503	.032278	.035916	-.122394	-.147173	.050955	-.032500
Mg/Ca	.062934	-.053884	-.011012	-.025783	-.204114	.027294	-.042902
IN	-.091851	.066519	-.041634	-.011794	-.052343	-.027759	-.001013
IP	-.014899	-.077724	.112759	-.013412	.034408	.059677	.079265
IK	.006717	-.071553	-.076812	.147777	.049740	-.052187	-.013168
lCa	.017092	.097548	.008018	-.047536	.165195	-.017400	-.012363
lMg	.095738	-.006674	-.004520	-.067153	-.143844	.030066	-.055951
lBN	.070818	.069564	.023086	-.123072	.023386	.003768	-.014860
CS	.174272	.180209	.204039	.252444	.272564	.303432	.346260

Cuadro A10. Correlaciones entre los siete primeros componentes principales (CP) y las variables. Ciclo OI 1994-95.

Variable	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	CP 6	CP 7
X	-.731363	-.073346	.396774	-.063556	-.271505	-.095428	-.011092
Y	-.057100	.082566	-.115945	.012213	-.022011	-.476304	-.152209
Pw	.273735	.063870	.429782	-.286967	.131481	-.370535	.053588
ARE	-.238217	-.039030	-.061713	-.151298	.202827	.120914	-.092404
LIMO	.220852	.143780	-.284721	.249720	-.171873	-.232978	.406959
ARC	-.048635	-.120868	.330150	-.147708	.026080	.147247	-.349720
pH	.149943	.250201	-.524888	.250459	.106255	.312514	.199669
MO	.160804	-.230734	-.223185	-.203387	.254921	-.100693	-.178553
CO	.134606	.365966	-.213655	.028911	.022687	.314124	.007679
lnCE	-.250577	-.529871	-.501345	-.547168	.052289	-.042846	.069100
lnCaS	-.468894	-.524847	-.284872	-.507572	.003730	-.075528	.095693
lnMgS	.031765	-.468866	-.566969	-.480815	.100914	-.091621	-.015768
NaS	-.076473	-.197332	-.647149	-.303636	-.023718	.191263	.194907
KSS	-.120110	-.199068	-.606833	-.342727	.107770	-.039149	.057640
HCO ₃	-.181087	.366566	-.019742	.261119	-.343463	.252748	.179973
SO ₄	-.359945	-.707489	.007380	-.362098	-.016289	-.154744	-.034405
lnCIS	.035870	.152053	-.645055	-.466415	.163588	.051337	.121511
PSI	.286344	.409280	-.225736	.262956	-.084665	.280095	.162170
NS	.255906	-.408370	-.375741	-.284222	.340033	.128999	.172840
PS	.095544	.102890	-.031966	.205427	-.006838	.082335	-.303352
KS	.149399	-.363761	-.415937	.009144	.041819	-.157591	-.356753
REN	.143649	.059619	-.068720	-.046690	.194150	.158105	.587597
AP	.020772	.103944	-.221435	-.137453	-.027195	-.027238	-.028530
DT	.110616	.077004	-.049746	-.147039	-.243931	.357293	.468789
AF	.105479	-.023095	.074565	-.085740	-.005514	.124942	.543940
RFA	-.104995	.314159	.093306	-.046129	-.263296	.019726	-.120503
FOTO	.154682	.080561	-.026765	.022564	-.282208	-.671467	.323657
COND	.394930	.012454	.361502	-.029708	.009171	-.659557	.261619
CO ₂	.152515	.192043	.036707	.348483	.205215	.249048	-.071160
lnTRAN	.415005	.256245	.030364	.145567	-.093395	-.654239	.261776
Nf	-.328211	.208914	-.454534	.317977	-.408493	.080321	.086246
Pf	.292431	-.686853	.488546	.092518	.085767	.185915	.172029
Kf	.532770	-.573901	-.291328	.456681	.129087	.000446	.001832
Cal	.745225	.293079	.021757	.046375	.454459	.049275	.012470
Mgf	.878708	-.194025	-.056809	-.070536	-.327812	.101887	-.076176
N/P	-.336719	.665737	-.548601	-.024769	-.150317	-.161480	-.089531
lnN/K	-.566165	.633336	.131660	-.359299	-.231208	.036421	.022259
P/K	-.197300	-.042286	.767999	-.422402	-.035361	.189033	.144894
Ca/N	.752153	.148724	.180901	-.083980	.541715	.007281	-.029260
lnCa/P	.231820	.789268	-.383531	-.072503	.252891	-.125160	-.120484
Ca/K	.018488	.764143	.302398	-.457455	.202649	.058451	-.008603
Mg/N	.903060	-.235644	.033193	-.133010	-.208616	.080313	-.086776
Mg/P	.698362	.258607	-.368022	-.171758	-.411990	-.014474	-.192349
Mg/K	.572121	.248482	.215675	-.480140	-.495259	.138358	-.067766
Mg/Cu	.518213	-.414808	-.066127	-.101146	-.686873	.074111	-.089457
IN	-.756078	.512074	-.250012	-.046267	-.176141	-.075373	-.002111
IP	-.122640	-.598327	.677117	-.052613	.115789	.162041	.165279
IK	.055289	-.550820	-.461257	.579715	.167382	-.141704	-.027458
ICa	.140692	.750939	.048151	-.186481	.555905	-.047245	-.025778
IMg	.788074	-.051379	-.027140	-.263435	-.484055	.081638	-.116665
IBN	.582945	.535508	.138632	-.482799	.078697	.010232	-.030985
Variación Explicada	8.231594	7.698117	6.004989	3.922912	3.365148	2.715289	2.085134

Cuadro A11. Coeficientes de los siete primeros componentes principales (CP) o vectores propios extraídos de 53 variables después de una rotación (maximización de la varianza de las combinaciones lineales). Ciclo OI 1994-95.

Variable	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	CP 6	CP 7
X	-.018995	-.017357	-.057462	.072252	-.098573	.029039	-.025334
Y	-.019641	.022826	.014478	.000543	.001654	.132486	-.134222
Pw	-.010873	.027129	-.071570	.052725	.077061	.131819	-.019652
ARE	-.032561	.038642	-.005869	.014725	.035528	-.072949	-.025446
LIMO	-.011868	-.014534	.055441	-.050132	-.048082	.160676	.146165
ARC	.036611	-.012194	-.051967	.040424	.023114	-.110269	-.131665
pH	-.018320	-.016043	.099687	-.065099	.007232	-.070349	.129415
MO	-.006659	.076908	-.006362	-.019067	.072266	-.012058	-.089804
CO	.020347	-.020458	.064056	.006622	.017031	-.097921	.049315
lnCE	.001419	.179903	-.012169	.022003	-.006546	.002712	.025070
lnCaS	-.016632	.156354	-.037668	.039132	-.029999	.017753	.029614
lnMgS	.017203	.168871	.004646	-.000205	.023841	.009122	-.016424
NaS	.016202	.119355	.050917	-.001477	-.022986	-.041000	.113071
KSS	-.011727	.136281	.037491	.000203	.013022	.004800	.020389
HCO ₃	.024985	-.082327	.055429	.014150	-.098375	-.033619	.110643
SO ₄	-.004940	.111444	-.080658	.017953	-.029997	.026803	-.039154
lnCIS	-.004695	.140104	.065444	.034478	.051063	-.011310	.065900
PSI	.024277	-.064030	.081544	-.029119	-.012483	-.049522	.111673
NS	-.019015	.114662	-.007159	-.042334	.078046	-.035487	.097893
PS	.025131	-.051731	.028260	-.023885	.005772	-.072665	-.123217
KS	.030230	.053870	.023225	-.056349	.010944	-.013529	-.179802
REN	-.055500	.024726	.003287	-.019706	.034229	.039193	.282791
AP	.014467	.038048	.029874	.018519	.003264	.004352	-.014399
DT	.045120	.008982	.013440	.033641	-.055877	-.026405	.260041
AF	-.019590	.015216	-.018535	.004158	-.008043	.051550	.259380
RFA	.045382	-.030707	.019621	.060903	-.045529	-.012011	-.049077
FOTO	-.005211	.019587	.002047	.004462	-.053223	.294803	.051172
COND	-.026528	.002932	-.059120	.002235	.037577	.272474	.029527
CO ₂	-.024776	-.081627	.029562	-.055518	.043214	-.095334	.001204
lnTRAN	-.019006	-.014926	.013178	-.019785	.008369	.278580	.028508
Nf	.020465	-.038417	.097745	-.021684	-.135376	.003635	.041088
Pf	.011357	-.030461	-.111125	-.057233	.011887	-.034709	.102543
Kf	.006986	-.025532	.011243	-.161627	.013076	.000745	-.001724
Caf	-.018097	-.020100	.017314	-.042183	.157602	-.016950	.021572
Mgf	.154603	-.006997	.003800	-.014114	-.014797	-.015251	-.007685
N/P	-.012434	.024167	.120997	.046178	-.037802	.042699	-.064423
lnN/K	.002282	.015168	.020937	.149560	-.045584	-.004005	.015731
P/K	.011449	.001454	-.117534	.116729	.009722	-.040188	.095177
Ca/N	-.022946	.000143	-.023025	-.029101	.184505	-.016105	-.001116
lnCa/P	-.027287	.016375	.102613	.024953	.100347	.019632	-.064939
Ca/K	-.014558	.017005	-.000956	.134446	.103690	-.023878	.014129
Mg/N	.139359	.003257	-.016922	-.011236	.017452	-.015752	-.014344
Mg/P	.155960	.017374	.074652	.032189	-.025389	.006410	-.074873
Mg/K	.175017	.012247	-.010715	.123410	-.029251	-.021078	.005414
Mg Ca	.189617	.002266	-.008116	.011355	-.123567	-.001092	-.021826
IN	-.044408	.012207	.069241	.071208	-.073860	.021305	-.018707
IP	-.025107	-.018320	-.137840	-.003521	.005761	-.037235	.093744
IK	-.055417	-.017294	.034085	-.175016	-.017964	.031342	-.042502
ICa	-.085333	.011559	.032747	.046329	.170516	-.005820	-.011540
IMg	.184982	.011128	.005848	.043861	-.037387	-.009547	-.026009
IBN	.061330	.036013	.005059	.099700	.106169	.002238	.003876
CS	.204129	.218711	.194991	.207174	.217708	.295132	.333145

U.A.N.L

211

Cuadro A12. Proporción de la varianza de cada variable explicada por diferente número de componentes principales (CP). Ciclo OI 1994-95.

Variable	Con 3 CP	Con 4 CP	Con 5 CP	Con 6 CP	Con 7 CP	R ²
X	.283538	.455412	.771818	.771881	.784685	.849533
Y	.028785	.029158	.029470	.168055	.274187	.415825
Pw	.136947	.196337	.349988	.501947	.503528	.562258
ARE	.086275	.092728	.093806	.145776	.149268	.812599
LIMO	.138250	.184752	.190323	.374778	.462309	.889945
ARC	.123001	.148452	.151195	.224314	.292457	.881881
pH	.367552	.436183	.443606	.480570	.572144	.680839
MO	.145545	.180951	.241851	.242455	.277279	.549719
CO	.192689	.199578	.221384	.276494	.297782	.634104
lnCE	.852040	.858811	.896605	.902983	.903636	.923669
lnCaS	.731984	.734081	.845117	.848702	.848983	.903573
lnMgS	.748164	.789951	.789952	.790330	.792308	.860995
NaS	.505029	.520504	.542936	.571829	.630918	.874374
KSS	.540819	.551632	.553884	.555489	.556233	.761534
HCO ₃	.239148	.270610	.382650	.391849	.449975	.610597
SO ₄	.661998	.667802	.769741	.769855	.786666	.877043
lnClS	.628214	.639422	.675855	.678984	.702207	.771898
PSI	.378872	.383619	.394375	.403118	.481526	.853175
NS	.344369	.467742	.546856	.564256	.616518	.721026
PS	.069289	.078046	.080204	.101576	.161785	.425610
KS	.163431	.329437	.329515	.329708	.481646	.649878
REN	.013822	.018178	.056453	.059615	.439053	.534892
AP	.074765	.079813	.080399	.080707	.081458	.417549
DT	.063233	.081016	.094307	.104083	.449185	.479929
AF	.009387	.009717	.010955	.019843	.336082	.452007
RFA	.058267	.175768	.194941	.194953	.204789	.371623
FOTO	.014565	.014906	.026798	.663158	.666904	.816050
COND	.120430	.120495	.202529	.789722	.791235	.821298
CO ₂	.162663	.194551	.240984	.291117	.292131	.609309
lnTRAN	.081650	.084671	.128025	.763937	.765280	.855582
Nf	.316875	.318603	.635861	.636196	.639834	.839064
Pf	.640191	.802022	.806277	.818277	.876033	.930022
Kf	.079159	.911991	.922590	.923190	.923302	.929084
Caf	.130116	.161786	.838732	.840559	.852996	.926999
Mgf	.816634	.890486	.933926	.938200	.941620	.941433
N/P	.719975	.844256	.873863	.887715	.914848	.938623
lnN/K	.123030	.871245	.921832	.923086	.923366	.940294
P/K	.475318	.800591	.801173	.819751	.866939	.929799
Ca/N	.076721	.098571	.916405	.918083	.921995	.937014
lnCa/P	.573250	.635567	.895391	.910202	.923173	.938822
Ca/K	.051722	.672066	.924597	.925077	.929523	.936174
Mg/N	.767513	.835658	.941271	.945235	.947339	.942084
Mg/P	.871618	.872251	.898499	.917172	.926471	.934752
Mg/K	.681316	.901543	.925256	.927357	.935132	.934568
Mg/Ca	.802294	.839912	.936712	.940480	.940503	.930404
IN	.478651	.737852	.926401	.926401	.935232	.942622
IP	.828343	.834314	.838539	.863189	.901271	.938867
IK	.041444	.855373	.884887	.887707	.904138	.935976
ICa	.219462	.381459	.931905	.932715	.932725	.937012
IMg	.923653	.923707	.940557	.948022	.948420	.939764
IBN	.219210	.442283	.869284	.879941	.886166	.912358

12771

