

ISSN 0104-1347

Zonificación de una superficie cultivada con soja según aspectos fenométricos y consumo de agua del suelo

A soybean cultivated area's zoning by fenometric parameters and consumption of soil water

María Rosa Ateca¹, Roberto Sereno² y Hernán Apezteguía³

Resumen - El objetivo del trabajo fue agrupar los distintos puntos de muestreo según las respuestas que presentan en el desarrollo y rendimiento del cultivo y en el consumo de agua, zonificando de este modo la superficie de una microcuenca de 8 ha en la región central de la provincia de Córdoba cultivada con soja. Se ha observado variabilidad espacial que se manifiesta por el comportamiento diferencial de los puntos de muestreo dentro de la misma. Se aplicó la técnica estadística de clusterización y se pudo agrupar los puntos de observación en 4 clusters diferenciados, permitiendo zonificar la microcuenca.

Palabras claves: clustering, componentes del rendimiento, soja, humedad del suelo, variabilidad espacial.

Abstract - Spatial variability was observed in a small watershed (8 ha) located in the central region of Cordoba, Argentina. It was showed that by the differential behaviour of measured points in the late, sowing of soybean. The goal was to group the measured points by development and yield's responses and soil water waste. Thus, the small watershed's area should be zoning. Clustering statistic was applied and the measured points were gruppued in four different clusters and then the watershed was zoning.

Key words: clustering, yield components, soybean, soil water, spatial variability.

Introducción

En general, los estudios de comportamiento de los cultivos agrícolas se realizan a nivel de parcelas. Raramente se presentan ensayos realizados a escala de lote (APEZTEGUÍA et al. 1997) manteniendo las condiciones de variabilidad espacial del suelo y condiciones de manejo similares a las aplicadas por los productores.

Se ha observado variabilidad espacial que se manifiesta por el comportamiento diferencial de los

puntos de muestreo dentro de una microcuenca de 8 ha en la región central de la provincia de Córdoba cultivada con soja (*Glycine max* (L.) Merr.) (ATECA et al. 1999). Muchas propiedades del suelo se correlacionan espacialmente (GAJEN et al. 1981; BURROUGH, 1992), y los parámetros de suelo de sitios cercanos se asemejan más que los de sitios lejanos. MILLER et al. (1988) reportaron un rango de correlación espacial para el rendimiento del trigo de 80 m aproximadamente. Existen, además, mapas detallados de rendimientos de cultivos que muestran

¹ Ingeniera Agrónoma. Profesor Adjunto de Climatología y Fenología Agrícolas.

² Doctor en Físico Química del Suelo. Profesor Asociado de Química General e Inorgánica.

³ Ingeniero Agrónomo. Profesor Adjunto de Manejo de Suelos.

^{1, 2 y 3}. Grupo Gestión Ambiental de Suelo y Agua Fac. Ciencias Agropecuarias.UNCba. CC 509. 5000, Córdoba, Argentina. Email: marateca@agro.uncor.edu; rsereno@agro.uncor.edu.

variabilidad del suelo y técnicas para interpretarlos, desarrollando prácticas de manejo basadas en aquella variabilidad (MULLA, 1991). El advenimiento de la agricultura de precisión requiere un método más preciso y objetivo para mejorar y complementar los mapas de suelo existentes (INDORANTE *et al.*, 1996).

La información recabada durante varios años de ensayos en la microcuenca debe ser ordenada de acuerdo a la variabilidad espacial observada, a los fines de implementar modelos matemáticos de rendimientos con los parámetros ajustados a cada situación. Existen técnicas estadísticas dentro del análisis multivariado que permiten la clasificación de los datos (ARABIE & HUBERT, 1995). Los valores de los componentes principales encontrados en los datos puntuales son planteados no en un espacio geográfico, sino en el espacio definido por los ejes de los componentes principales. Este diagrama de dispersión puede mostrar agrupamientos aparentes o clusters de datos puntuales que tienen valores similares en ambos ejes. Estos agrupamientos que derivan totalmente de un análisis de datos originales, representarían agrupamientos “naturales” que podrían ser más representativos de la realidad que otras formas de clasificación (BURROUGH, 1985). Son técnicas estadísticas utilizadas en clasificación de suelos (Webster, 1977; Gruijter, 1977; mencionados en BURROUGH, 1985) vegetales (Lieth & Moore, 1970; Stearn, 1971; mencionados en HARTIGAN, 1975), sistemas de información geográfica (BURROUGH *et al.* 1992; MANUAL DE APLICACIÓN IDRISI, 1997).

El objetivo del trabajo fue agrupar los distintos puntos de muestreo según las respuestas que presentan en el desarrollo y rendimiento del cultivo y en el consumo de agua, zonificando de este modo la superficie de la microcuenca en la región central de la provincia de Córdoba, Argentina.

Materiales y métodos

Se utilizaron los datos de medición semanal de humedad del suelo con sonda de neutrones hasta 2,60 m de profundidad (en intervalos de 0,20m) en 11 puntos seleccionados por análisis geoestadístico en una microcuenca de 8 ha, (APEZTEGUÍA *et al.* 1997) ubicada 25 km al sur de la ciudad de Córdoba (31°29' S, 64°13' W), República Argentina, durante la campaña 1993-94. La microcuenca (Figura 1) está delimitada mediante la construcción de bordos y tiene una pendiente en sentido oeste-este. El suelo se clasificó como un Haplustol típico de textura franco

limosa y el perfil modal presentó los siguientes horizontes: Ap 0-14 cm, A2 14-20 cm, Bw 20-40, BC 40-60 cm, C1 60-84 cm, Ck +84 cm, con 2,5% de materia orgánica, pH 6,7 y 1,28 gr/cm³ de densidad aparente en Ap (ROMERO *et al.* 1995).

Se cultivó soja bajo labranza convencional para la zona. Se realizaron las observaciones de las variables meteorológicas con una estación automática instalada en el lugar del ensayo. Con observaciones semanales, se siguió el comportamiento fenológico (FEHR & CAVINESS, 1977) y fenométrico del cultivo. Se obtuvieron los componentes del rendimiento en el momento de la cosecha (producción de biomasa y de granos) de una superficie de 1 m² alrededor de cada punto con una repetición.

Se estimó la evapotranspiración potencial (ETp) según la metodología de PENMAN (1948). La evapotranspiración real (ETr) se calculó teniendo en cuenta la variación del almacenaje entre fechas de medición y la precipitación efectiva (DARDANELLI *et al.* 1991) ocurrida en el mismo período.

Se analizó la variación espacial de aspectos fenométricos del cultivo: altura de planta (cm), biomasa producida (g/m²) y rendimiento en granos (g/m²) y el consumo de agua durante el período reproductivo, expresado a través de ETr y la evapotranspiración relativa (ETr/ETp) durante el período reproductivo. Se agruparon los resultados de los distintos puntos mediante la técnica estadística denominada “clustering”.

Este método es útil si produce una partición suficientemente representativa de un principio de clasificación de las variables, que es la hipótesis de trabajo (ANDERBERG, 1973). Se utilizó un método de agrupamiento no jerárquico, denominado “k-means” de MACQUEENS (1967) que asigna a cada dato un cluster (de k clusters) con el centroide más próximo (media). En este proceso el centroide se calcula sobre la base de los miembros del cluster.

Los cálculos de este método estadístico pueden ser asemejados a un análisis de varianza “invertida”. El programa de computación comienza con k clusters aleatorios, y luego mueve los objetos entre aquellos clusters con el objetivo de: 1) minimizar la variabilidad dentro de los clusters y, 2) maximizar la variabilidad entre los clusters. Esto es análogo a la “ANAVA invertida” en el sentido que la prueba de significancia en ANAVA evalúa la variabilidad entre grupos contra la variabilidad dentro del grupo cuando el cálculo de

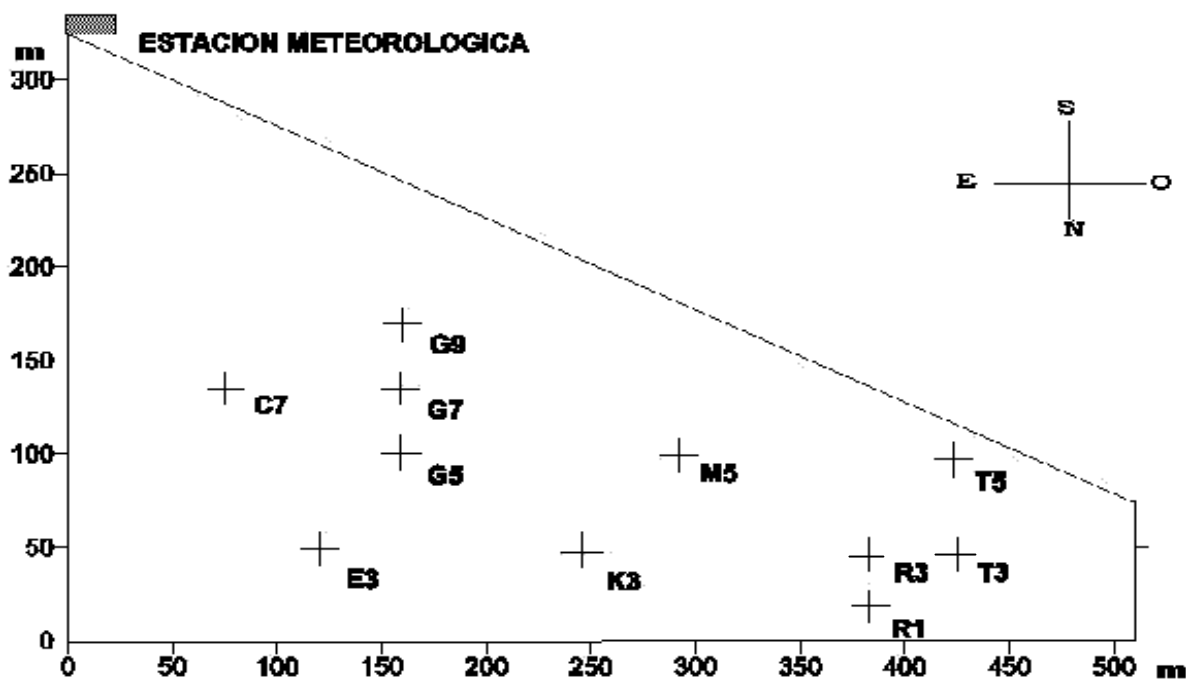


Figura 1.-Esquema de la microcuenca mostrando la distribución de los 11 puntos de muestreo en la microcuenca.

la prueba de significancia para la hipótesis es que las medias en los grupos son diferentes unos de otros. En el agrupamiento “k-means”, el programa mueve las variables dentro y fuera de los grupos (clusters) para obtener los resultados más significativos en ANAVA.

El resultado de un análisis clustering tipo “k-means” es examinado para observar las medias para cada cluster en cada dimensión, para asegurar que la distinción entre los grupos sea notable. Lo ideal es obtener medias muy diferentes para la mayoría, sino en todas las dimensiones (variables) utilizadas en el análisis. La magnitud de los valores de F del análisis de varianza es otro de los indicadores de cuán bien la respectiva dimensión discrimina entre los clusters.

Se graficó mediante un interpolador espacial para visualizar la zonificación lograda.

Resultados y discusión

El análisis del grado de correlación y la significancia estadística (p-level 0.05) de las variables estudiadas para los distintos puntos durante la campaña 1993-94 puede ser observado en la Tabla 1. Estos coeficientes son elevados.

La ET_p calculada es notablemente superior a la ET_p estimada para los distintos puntos de la microcuenca, observándose un comportamiento diferencial de esta última en cada uno de ellos. La ET_r más elevada fue la del punto M5, y la más baja la del punto E3. De este modo, el consumo en el punto M5 fue un 40,0 % superior a la del punto E3 (107,8 mm). Considerando estos puntos extremos, la variación de los puntos restantes osciló entre 6,4 y 32,0 %. La evapotranspiración relativa (ET_r/ET_p) indica

Tabla 1. Comparación de coeficiente de correlación (R de Spearman), función de probabilidad [t(N-2)], y significancia estadística (p-level), entre las variables Biomasa (B), Rendimiento en grano (G), Altura de plantas (H), Evapotranspiración Real (ET_r) y Evapotranspiración Relativa (ET_r/ET_p) de los distintos puntos de muestreo.

Variables	Spearman R	t(N-2)	p-level
B-G	0,954	9,607	0,000005
B-H	0,754	3,449	0,007282
B-ET _r /ET _p	0,909	6,546	0,000106
G-H	0,736	3,265	0,009760
G-ET _r /ET _p	0,854	4,936	0,000807
H-ET _r /ET _p	0,700	2,940	0,016471

porcentualmente el grado en que la demanda atmosférica (ETp) ha sido satisfecha por la disponibilidad de agua del suelo y presenta la misma distribución entre los puntos. Se puede mencionar además que la diferencia entre los puntos de menor ETr/ETp, E3, T3 y T5 oscila entre 4,2 y 7,9 %.

El comportamiento de estas variables junto con la respuesta biológica del cultivo en los distintos puntos medidos puede ser observado en la Tabla 2. La producción de biomasa en el punto M5 fue un 47,0 % mayor que en el punto T3, siendo la diferencia de 196,4 gr/m². La disparidad del rendimiento en grano entre los puntos extremos, G5 y T5 fue de 272,6 gr/m², indicando que T5 tuvo un rendimiento 50,0 % menor que G5; la diferencia entre G5 y M5 fue de 3,34% y entre T5 y T3 del 16,25%. En cuanto a la altura de las plantas en el lote, el punto C7 tuvo las plantas más altas, un 33,0 % mayor que las plantas del punto E3. La diferencia fue de 37,8 cm. Se puede decir que las diferencias en las variables fenométricas entre los puntos de mayor producción son más reducidas que en los de menor producción.

A su vez, la Figura 2 muestra simultáneamente el comportamiento biológico y consumo de agua en los distintos puntos de muestreo en la microcuencia, complementando la secuencia de la Tabla 2.

Se aplicó la técnica de clusterización mencionada y se pudo agrupar los puntos de observación en 4 y 5 clusters diferenciados. Se realizó el análisis de la varianza de estos agrupamientos y finalmente se decidió que 4 clusters permitían zonificar adecuadamente la microcuencia, teniendo en cuenta la distancia entre los clusters y el valor medio de cada cluster. El análisis de la varianza de la clusterización es mostrada en la Tabla 3. Se observa que de acuerdo al «p-value» (0,05) es altamente significativa la diferencia entre los clusters obtenidos en la

Tabla 2. Ordenamiento en grado ascendente de la respuesta de cada uno de los puntos de la microcuencia a las distintas variables analizadas.

Biomasa (gr/m ²)	Peso grano (gr/m ²)	Altura Planta (cm)	ETr/ETp (%)
T3	T5	E3	E3
T5	T3	T5	T3
E3	E3	T3	T5
R3	R3	R1	R3
K3	K3	G7	C7
R1	R1	R3	R1
C7	G9	K3	G9
G9	C7	G9	K3
G7	M5	G5	G7
G5	G7	M5	G5
M5	G5	C7	M5

primera iteración. La composición de cada cluster y la distancia al centro de cada grupo se muestra en la Tabla 4.

Esta técnica estadística permitió agrupar los puntos con propiedades afines. En primer lugar se debe decir que el número de cluster no indica ninguna característica particular, sino que es sólo la denominación que reúne a un grupo de puntos (C7, G5, G7, G9 y M5) como en cluster 1 o a un individuo (R3) en el cluster 3. En segundo lugar, cuando se realizó el agrupamiento en 5 y también en 6 clusters,

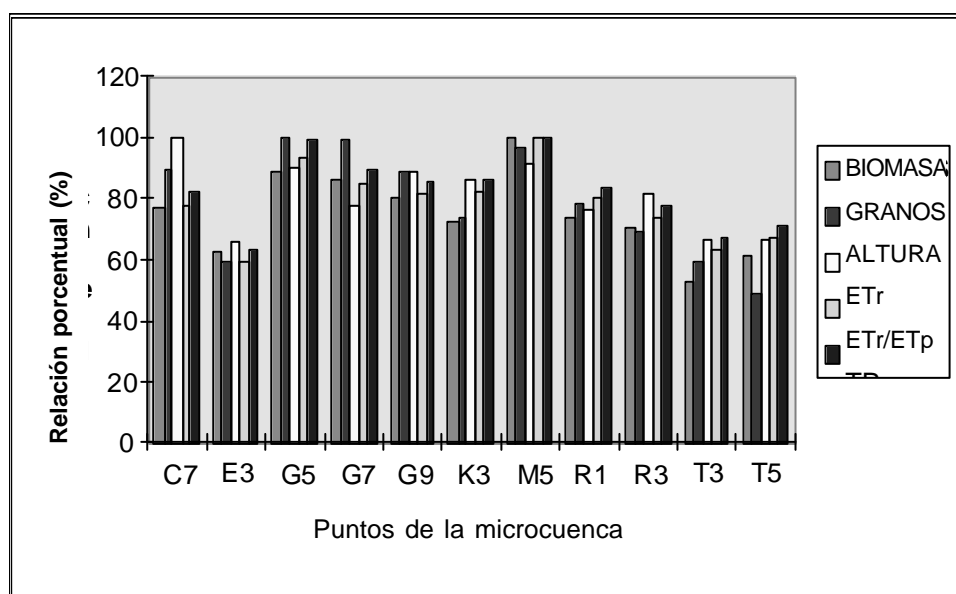


Figura 2. Relación porcentual de los componentes fenométricos y del consumo de agua en los distintos puntos de la microcuencia.

Tabla 3. Análisis de la varianza para el agrupamiento en 4 clusters de los puntos de la microcuenca.

Variables	Entre clusters		Dentro Clusters		F	Significancia (p)
	SS	GL	SS	GL		
Biomasa	25608,05	3	6542,693	7	9,133	0,008119
Granos	86063,72	3	5252,063	7	38,236	0,000104
Altura planta	1350,72	3	404,373	7	7,794	0,012379
ETr	7997,19	3	2586,42	7	7,215	0,015112
ETr/ETp	1123,56	3	274,844	7	9,539	0,007211

algunos puntos permanecieron constantes en el grupo de pertenencia tales como los puntos R3; E3, T3 y T5; K3 y R1. La escisión ocurrió en el cluster 1 donde algunos de sus integrantes pasaron a formar cluster individuales.

La zonificación lograda mediante un interpolador espacial permite visualizar la asociación de los puntos realizadas mediante el clustering. Se observa en la Figura 3, la zonificación de los mismos y la distribución espacial de uno de los parámetros utilizados en las clusterización.

Se ha logrado a nivel de una escala pequeña la zonificación mencionada (MULLA, 1991; INDORANTE et al.1996) y también la comprobación de lo sostenido por distintos autores (GAJEN et al. 1981; BURROUGH, 1985; BURROUGH et al. 1992) con respecto a la distribución espacial de las propiedades del suelo con la certeza de que este procedimiento es adecuado debido a la precisión de las variables medidas en los distintos puntos de muestreo y al tamaño de la superficie cultivada.

Conclusiones

- La técnica estadística denominada clustering resulta adecuada para agrupar los puntos medidos en la microcuenca según el comportamiento de variables físicas, consumo de agua y biológicas y permitió zonificar la microcuenca.

Agradecimientos

A CONICOR, SECyT UNC y CONICET.

Referencias bibliograficas.

- ANDERBERG, M.R.. **Cluster Analysis for Applications**. New York : Academic Press.. 1973. 359 p.
- ARABIE. P., HUBERT,L.J. Clustering from the perspective of combinatorial data análisis. In: **Recent advances in descriptive multivariate analysis**. Krzanowski, W.J (ed.) Oxford : Royal Statistical Society Lecture Note Series 2. Oxford Science Publications. 1995. 362 p.
- APEZTEGUIA, H.P., AOKI, A., ROMERO, L et al. Una metodología para modelar el agua del suelo en una microcuenca (8 ha). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIENCIA DO SOLO, 26., Rio de Janeiro. 1997. CDROM. Río de Janeiro : Sociedade Brasileira de Ciencia do Solo. 1997.
- ATECA, M.R., SERENO, R., APEZTEGUIA H. Proceso de extracción de agua del suelo: variabilidad espacial y temporal en una microcuenca. In: XI CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGÍA Y II REUNIÓN LATINO-AMERICANA DE AGROMETEOROLOGÍA. 1999. **CDROM**, Florianópolis : Sociedade Brasileira de Agrometeorologia. 1999.
- BURROUGH, P.A. Classification Methods. In: **Principles of Geographical Information Systems for Land**

Tabla 4. Composición de cada cluster y distancia al centro del mismo.

Cluster 1	Puntos	C7	G5	G7	G9	M5
	Distancia	25,38	15,09	12,26	19,70	29,16
Cluster 2	Puntos	K3	R1			
	Distancia	6,88	6,88			
Cluster 3	Puntos	R3				
	Distancia	0				
Cluster 4	Puntos	E3	T3	T5		
	Distancia	13,19	13,74	17,15		

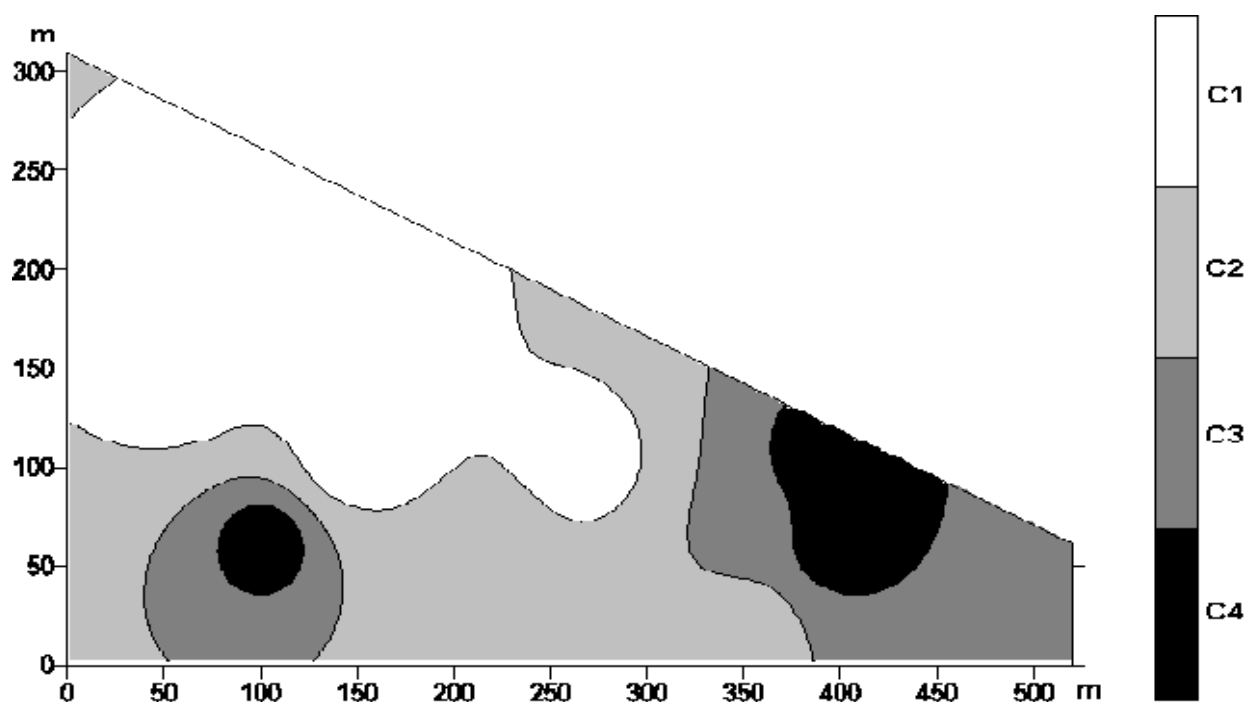


Figura 3 Zonificación de la microcuenca según los valores medios de evapotranspiración relativa (%) de cada cluster.

Resources Assessment. Oxford : Clarendon Press. 1985. 194 p.

BURROUGH, P.A., McMILLAN, R.A., Van DEURSEN, W. The classification methods for determining land suitability from soil profile observations and topography. **Journal Soil Science.** Dorchester, v. 43, n. 2, p. 193-210. 1992.

DARDANELLI, J., DE LA CASA, A.C., ATECA, M.R. et al. Validación del balance hidrológico versátil para la sucesión sorgo-soja bajo dos sistemas de labranza. **Revista Agropecuaria de Manfredi y Marcos Juárez,** Córdoba, v. 7, n. 2, p. 20-29, 1991.

FEHR, W.R., CAVINESS, C.E. **Stages of soybean development.** Ames : Iowa Agric. Exp. Stn. Spec/ Iowa State University, Ames, 1977. 11 p. (Rep. 80).

GAJEN, Y.M., WARRICK, A.W., MYERS, D.E. Spatial dependence of physical properties of a typical torrifluent soil. **Soil Science Society American Journal.** Madison. v. 45, n. 3, p. 709-715. 1981.

HARTIGAN, J.A. **Clustering Algorithms.** Connecticut : John Wiley & Sons, Inc. 1975. 351 p.

INDORANTE, S.J., McLEESE, R.D., HAMMER, B.W. et al. Positioning soil survey for the 21st century. **J Soil Water Conservation,** Ankeny, Iowa. v. 51, n. 1, p. 21-28. 1996.

MACQUEENS, J.B. Some Methods for Classification and Analysis of Multivariate Observations. **Symp. Math. Statist. and Probability, 5., Proceedings...**, Berkeley : University of California Press, Berkeley, v. 1, p. 281-297. 1967.

MANUAL DE APLICACION IDRISI. Versión 2,0. Worcester : Clark University. 1997.

MILLER, P.M., SINGER, M.J., NIELSEN, D.R. Spatial Variability Of Wheat Yield And Soil Properties On Complex Hills. **Soil Science Society American Journal.** Madison. v. 52, n. 4, p. 1133-1141, 1988.

MULLA, D.J. Using geostatistics and GIS to manage ~~spatial patterns in soil fertility~~. **AUTOMATED AGRICULTURE FOR THE 21ST CENTURY.** Chicago. 1991. **Proceedings...**, Chicago : IL. American Society Agricultural Engineering, St. Joseph, MI. IL 16-17 p. 336-345. 1991.

PENMAN, H.L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings Royal Society, Serie A.,** London. v. 193, p. 120-146, 1948.

ROMERO, L., APEZTEGUÍA, H., ESMORIZ, G.F et al. Caracterización de una microcuenca sembrada con soja de la región semiárida central de la provincia de Córdoba (Argentina). **Agriscientia,** Córdoba, v. 12, n. 1, p. 59-66. 1995.

