

## DISTRIBUCION ESPACIAL DE LA HUMEDAD DEL SUELO EN UNA MICROCUENCA DE CÓRDOBA, ARGENTINA<sup>1 2</sup>

### Spatial distribution of soil moisture in a small watershed of Córdoba, Argentina

H.P. Apezteguía<sup>3</sup>, R. Sereno<sup>3</sup>, A.M. Aoki<sup>3</sup>, M.R. Ateca<sup>3</sup>, L.E. Romero<sup>3</sup>,  
R.I. Mendoza<sup>3</sup>, G.F. Esmoriz<sup>3</sup>, C.W. Robledo<sup>3</sup>

#### ABSTRACT

This study aimed to describe the spatial variability of soil moisture in 8 hectares watershed from the Córdoba province, Argentina (31°29' South, 64°13' West). Soil moisture was measured by gravimetry on 57 points at 3 different depths across 6 sampling dates. Geostatistic methods were used to describe spatial variability, and exponential semivariogram models without "nugget" effect were fitted. The models were cross validated. A clear spatial association between ranges of 70 and 145 m was observed.

**Key words:** Soil moisture, spatial variability, geostatistic.

#### INTRODUCCIÓN

El fenómeno de la erosión hídrica reviste gravedad en una franja de 40 a 60 km de ancho, que se ubica al este del cordón montañoso de las Sierras Chicas, desde el norte hasta el sur de la provincia de Córdoba, República Argentina. Desde la ciudad de Córdoba (31°24' Latitud Sur, 64°11' Longitud Oeste) hacia el sur el aumento del área sembrada con soja (*Glycine max* (L) Merrill) ha producido un incremento de la erosión. En los últimos años los perjuicios en obras de infraestructura en las propias ciudades y pueblos han llamado la atención de toda la comunidad, pero la pérdida de productividad de los suelos es aún más grave. Apezteguía *et*

*al.* (1987) estimaron una disminución de rendimientos en soja de 2.832.000 kg año<sup>-1</sup> para una superficie de 8.000 ha en esa zona.

El primer factor limitante de la producción en la zona es la deficiencia de humedad edáfica, por lo que mejorar la captación del agua de lluvia disminuiría la erosión y aumentaría la disponibilidad del recurso hídrico para los cultivos.

Para controlar la erosión hídrica producida por escurrimiento superficial, es necesario considerar a la cuenca agrícola como una unidad de estudio, donde se pueda investigar la influencia de distintas prácticas en la conservación de suelos y aguas (Saxton *et al.*, 1971; Johnson *et al.*, 1979).

Dado que uno de los factores que determina la dinámica del agua en una cuenca es su mayor o menor absorción, se hace necesario contar con una metodología que analice la distribución espacial del agua retenida por el suelo en cuencas con las características de relieve de la zona.

<sup>1</sup>Recepción de originales: 25 de mayo de 1998.

<sup>2</sup>Trabajo financiado por Secyt U.N. Córdoba, CONICOR y CONICET.

<sup>3</sup>Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Grupo de Gestión Ambiental de Suelo y Agua. CC 509, 5000 Córdoba, Argentina.  
E-mail: hapezte@agro.uncor.edu

No obstante que características no permanentes del suelo, como es la humedad, son función del tiempo además del espacio (Burrough *et al.*, 1994), una herramienta posible de utilizar para el análisis de la distribución del agua es la geoestadística (Trangmar *et al.*, 1985), analizando la variabilidad espacial en fechas sucesivas. Al respecto en un trabajo realizado en suelo volcánico (Comegna y Basile, 1994) se encontró que la estructura espacial para el contenido de agua volumétrica almacenada en el suelo era estable en el tiempo.

En el presente trabajo se postula que la cantidad de agua infiltrada y retenida no es homogénea dentro de la cuenca. Si se conociera la cantidad y la distribución espacial del agua edáfica en cultivos de soja sembrados en forma convencional, se podrían realizar prácticas de conservación con la finalidad de estudiar de que forma modifican la cantidad y la distribución del agua acumulada.

De acuerdo con la hipótesis planteada, el trabajo tiene como objetivo caracterizar la distribución espacial del agua del suelo en una microcuenca, en diferentes fechas, con diferentes condiciones de humedad, y en diferentes estados de un cultivo de soja.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se eligió una microcuenca de 8 ha (31°29' Latitud Sur, 64°13' Longitud Oeste), ubicada 25 km al sur de la ciudad de Córdoba, Argentina, considerada representativa de unas 20.000 ha afectadas por erosión hídrica (Zamora y Jarsun, 1985). La pendiente del terreno oscila entre 0,8 y 1,2%.

El suelo es un Haplustol típico de textura franco limosa, con un perfil modal Ap (0-14 cm), A12 (14-20 cm), B2 (20-40 cm), B3 (40-60 cm), C1 (60-84 cm), C2Ca (+ 84 cm); con pH y porcentaje de materia orgánica del horizonte superficial de 6,7 y 2,5%, respectivamente. Con barreno se determinó el espesor del horizonte superficial y

la profundidad del horizonte C2Ca en toda la microcuenca, con variaciones de profundidad entre 18 y 31 cm el primero, y 67 a 115 cm el segundo.

Se sembró soja (*Glycine max* (L) Merrill) con labranza convencional, en sentido perpendicular a la pendiente. En la temporada 1991/92 la variedad sembrada fue Agripo (grupo VII), y en la temporada 1992/93 Asgrow (grupo VI). Se realizó un relevamiento altimétrico en cuadrícula a 20,83 x 20,83 m. De ella fueron elegidos la mitad de los puntos, resultando 57 en una cuadrícula más laxa de 41,66 x 41,66 m. En los puntos así determinados se tomaron muestras de suelo para determinar humedad por gravimetría. Las muestras se extrajeron con barreno, con dos repeticiones en las profundidades 10-20, 40-50, y 80-90 cm. Estos muestreos se realizaron en las fechas: 07.02.92, 24.02.92, 20.03.92, 25.01.93, y 26.03.93; en otras fechas se realizaron muestreos de menor número de puntos. En todas las fechas y puntos se determinó la altura de las plantas, y posteriormente se cosechó a mano 1,43 m en la hilera de soja (representativo de 1 m<sup>2</sup>) con dos repeticiones en las dos temporadas.

Los datos de humedad de cada fecha fueron trabajados considerando el porcentaje de humedad de cada estrato independientemente, y transformados en lámina de agua en un metro de espesor. Ambos casos han sido analizados mediante la metodología geoestadística (Burgess y Webster, 1980; Trangmar *et al.*, 1985; Robledo, 1994), la que consiste en caracterizar la variabilidad espacial sobre la base de la función conocida como "semivariograma", para luego utilizarla en el proceso de interpolación estocástico conocido como "kriging". Este último posibilitaría para nuestro trabajo estimar la lámina total de agua almacenada en cada fecha en la microcuenca en estudio.

La justificación formal de la elección de la metodología geoestadística para estimar y caracterizar la distribución del agua edáfica en una

cuenca dada es la siguiente: si bien cualquier fenómeno físico puede considerarse como un proceso determinístico, siempre es posible asumir los datos (en nuestro caso, el agua acumulada en cada punto de la microcuenca), como la realización de un proceso estocástico, ya que existe la variación aleatoria por la incertidumbre causada por no poder registrar el fenómeno en las infinitas localizaciones en el dominio en estudio (la microcuenca), y la incertidumbre debida a la imperfecta comprensión física del proceso (Cressie *et al.*, 1990). Así se asumirá que el agua almacenada en cada fecha, y para cada uno de los puntos que conforman la microcuenca de 8 ha en estudio, es un proceso intrínsecamente estacionario en los errores, y en base a ello, poder realizar el proceso de estimación antes indicado como "kriging".

Claramente la estimación depende de la calidad del modelo de "semivariograma ajustado", siendo éste el que se toma como "verdadero". Entre los modelos de funciones de semivariograma estudiados, se consideraron el modelo lineal, exponencial (Figura 1), y esférico, entre otros (Vieira *et al.*, 1983).

Debido a que el semivariograma es en el modelo la función que caracteriza la variabilidad espacial de la variable en estudio, es necesario verificar de alguna forma cuan bien esta función explica la variabilidad espacial de nuestro interés. Por ello se ajustó un modelo para cada fecha y cada profundidad, y se validó siguiendo la técnica de "validación cruzada". Este procedimiento consiste en estimar el valor de la variable, en cada punto de la grilla, considerando el modelo ajustado y los valores de los restantes puntos, pero sin considerar el valor medido en ese punto. Se obtiene un valor estimado para cada valor medido y se establece una comparación gráfica de valores estimados vs observados (Figura 2). La situación ideal sería que los puntos coincidieran sobre la diagonal que divide el cuadro. En la práctica resulta aceptable cuando la línea divide la nube de puntos por la mitad, y las dos mitades se acercan a imágenes especulares (Isaacs y Srivastara, 1989).

Además este análisis cualitativo se validó mediante el examen de los "errores reducidos", definidos como el valor estimado menos el valor medido, dividido por la desviación estándar de

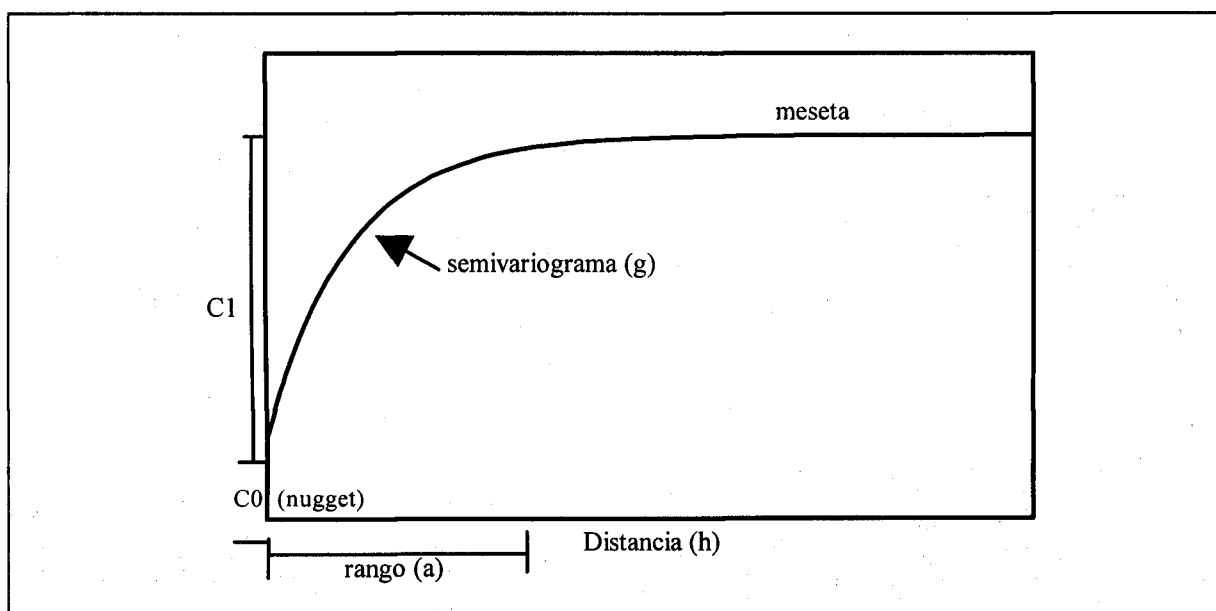


Figura 1. Modelo teórico de semivariograma exponencial.  
Figure 1. Exponential theoretical model of semivariogram.

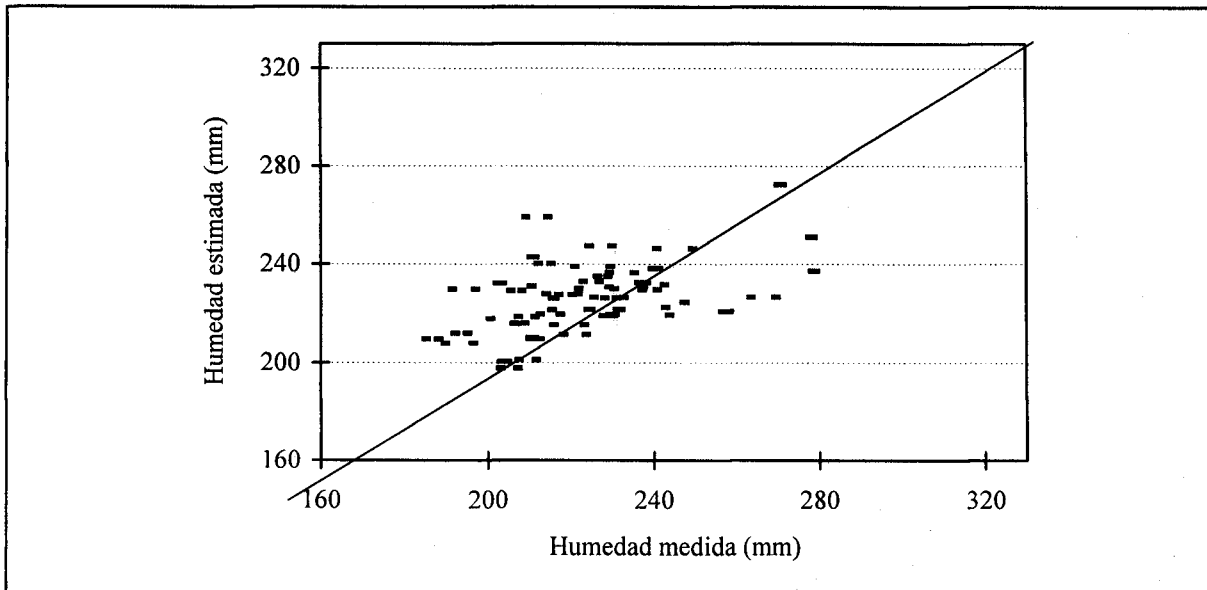


Figura 2. Validación cruzada. Valores estimados vs valores observados de humedad edáfica.  
Figure 2. Cross validation. Soil water values fitted vs observed.

la estimación (Vieira *et al.*, 1983). Estos errores reducidos deben tener una distribución normal con media cero y varianza uno, para asegurar que no haya sobre o subestimaciones sistemáticas. La hipótesis de igualdad de la media con el cero es verificada mediante un test de chi cuadrado.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las fechas de muestreo correspondieron con condiciones de alta y baja humedad. Así el 20.03.92 la lámina total hasta 1 m de profundidad osciló entre 337 y 187 mm, y el 26.03.93 osciló entre 223 y 130 mm.

El análisis geoestadístico se realizó tanto por estrato medido, como por lámina hasta 1 m que integra los tres estratos, para cada fecha de muestreo. Se estimaron los semivariogramas y se ajustaron gráficamente los correspondientes modelos. El modelo exponencial (Figura 1) fue el que mejor ajustó en cada situación:

$$\gamma(h, \theta) = C_0 + C_1 \cdot [1 - \exp(-h/a_0)]$$

donde  $a_0 = a/3$ , siendo  $a$  el rango "en la práctica", distancia dentro de la cual los pares de valores de la variable poseen asociación espacial.

$\gamma = f(C_0, C_1, a_0)$ , con  $C_0 \geq 0$  (efecto "nugget", discontinuidad del semivariograma producida por variaciones a una escala menor que la distancia de muestreo),  $C_1 > 0$  y  $a > 0$  y  $C_0 + C_1$  la "meseta" o varianza estructural (varianza de los datos sin asociación espacial).

En el ejemplo (Figura 3), las estimaciones de los parámetros geoestadísticos fueron: "nugget" igual a cero, la varianza estructural igual a 650, y el rango igual a 130 m. A partir de este valor de rango, se puede considerar que la variable medida (humedad) deja de tener asociación espacial.

No se ha podido ajustar una ecuación exponencial única que explique todas las situaciones de humedad de suelo. Esto se debe al desarrollo de las raíces de soja en el perfil, el cual no es homogéneo en los distintos puntos del terreno, y a la succión diferencial que ello implica.

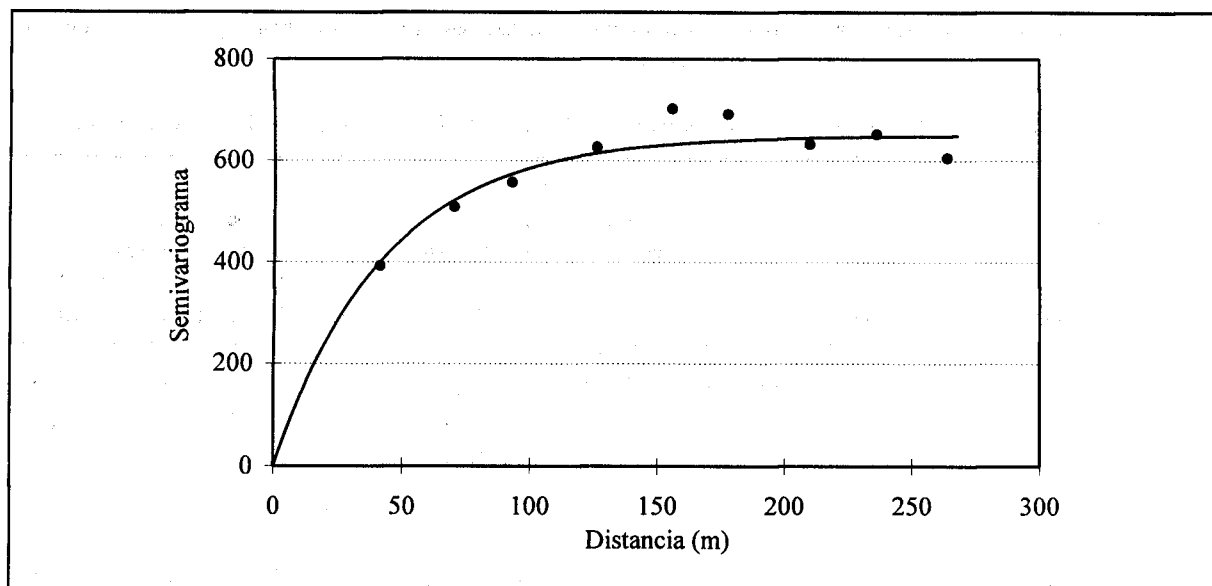


Figura 3. Semivariograma de lámina del 24.02.92. Los puntos representan los semivariogramas calculados, la línea continua el modelo ajustado.

Figure 3. Semivariogram from lamina (24.02.92). Data points derived from calculated semivariograms, the continuous line represents the fitted model.

Todos los modelos ajustados para las diferentes fechas fueron exponenciales y sin “nugget” (Cuadro 1), a excepción de la segunda y tercera profundidad del 20.03.92. La variabilidad de estos datos fue máxima, con una desviación estándar de 2,64 y 3,74 para medias de 20 y 17,8% en estas dos profundidades, respectivamente. Los modelos ajustados, exponenciales con “nugget”, estarían indicando la necesidad de una grilla más densa para una mejor caracterización de tales condiciones de variabilidad. Como se observa en el Cuadro 1, en los diez días precedentes a la observación había llovido copiosamente; en la primera profundidad el suelo se había humedecido con relativa uniformidad, en cambio en la segunda, y más aún en la tercera profundidad, el suelo variaba de muy húmedo a muy seco. Esto sólo puede explicarse mediante una capacidad de infiltración muy variable entre puntos, y orienta la investigación hacia la búsqueda de prácticas que mejoren la infiltración.

En términos generales los valores de la varianza estructural fueron mayores en la primera profundidad (Cuadro 1). La superficie del suelo

está más expuesta a las condiciones climáticas, a variaciones de laboreo, de microrrelieve y de cobertura que las partes más profundas del suelo. Ello justifica que la primera capa presente una mayor variación en el contenido de humedad que las más profundas.

El estudio de la distribución de los errores reducidos indicó que la media fue muy cercana a cero en todas las fechas y profundidades, y la varianza fue aproximadamente igual a 1; en este último caso se realizó un test chi cuadrado ( $P < 0,05$ ), para verificar esa hipótesis de igualdad. La distribución de los errores reducidos de las láminas de una fecha puede observarse en el histograma (Figura 4).

Con el modelo validado se estimó para cada fecha el contenido de humedad en toda la microcuenca mediante “kriging”, cuya representación gráfica se puede ver en la (Figura 5).

El hecho de que pudieran ajustarse modelos sin “nugget” indicaría que el tamaño de la grilla elegida ha permitido estimar adecuadamente la

**Cuadro 1. Modelos de semivariogramas, precipitación antecedente, estadio fenológico y contenido de humedad****Table 1. Semivariogram models, antecedent rainfall, phenological stage and water content**

Precipitación antecedente		Estado fenológico	Fecha	Humedad por profundidad (%), Lámina 0-100 cm (mm)		Modelos exponenciales		
Fecha	mm			Prof. cm	Media	Nugget <sup>1</sup>	Meseta <sup>2</sup>	Rango <sup>3</sup>
Enero 92	160	V4	7-2-92	10-20	18,8%	0	6,6	75
1.02.92	28	cuarto nudo		40-50	16,3%	0	3,35	145
5.02.92	23	sobre tallo principal		80-90	16,5%	0	3,4	115
				0-100	217 mm	0	520	110
10.02.92	21	V6	24-2-92	10-20	19,2%	0	6,3	105
13.02.92	16	sexto nudo		40-50	17,4%	2,5	4,5	140
21.02.92	24	sobre tallo principal		80-90	17,6%	5	4,5	90
				0-100	228 mm	0	650	130
9.03.92	26	R5	20-3-92	10-20	22,7%	0	6	135
12.03.92	106	comienzo		40-50	20,0%	0	5	250
14.03.92	23	formación		80-90	17,8%	0	10	275
16.03.92	20	grano		0-100	253 mm	0	1115	130
Dic. 92	275	R2	25-1-93	10-20	15,80%	0	2,7	115
7.01.93	22	plena		40-50	14,40%	0	2,5	120
8.01.93	10	floración		80-90	16,10%	0	1,85	100
				0-100	196 mm	0	270	135
28.02.93	18	R7	26-3-93	10-20	13,0%	0	3	200
		comienzo		40-50	11,7%	0	0,84	160
		maduración		80-90	11,1%	0	0,42	120
				0-100	151 mm	0	255	110
13.12.93	18	siembra	23-12-93	10-20	21,5%	0	4,5	100
14.12.93	12			40-50	18,2%	0	6,8	120
15.12.93	15			80-90	15,8%	0	4,7	120
22.12.93	4			0-100	234 mm	0	320	100

<sup>1</sup>Nugget: discontinuidad del semivariograma cerca del origen, producido por variaciones a distancias menores que las del muestreo.

<sup>2</sup>Meseta: varianza estructural de los datos sin asociación espacial.

<sup>3</sup>Rango: intervalo de distancia donde los datos tienen asociación espacial.

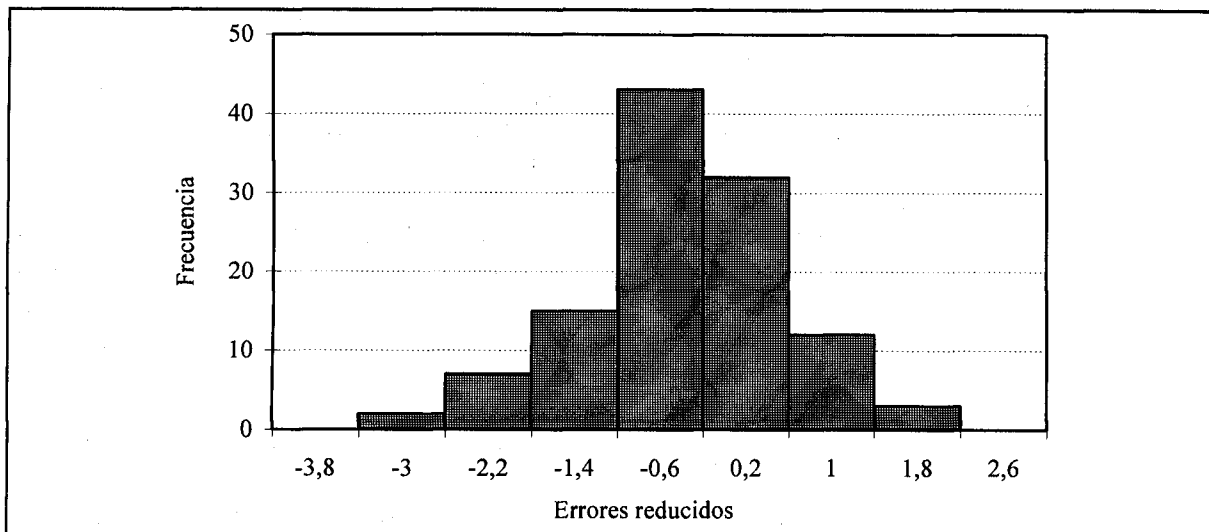


Figura 4. Errores reducidos. Distribución de frecuencias.  
 Figure 4. Reduced errors. Frequency distribution.

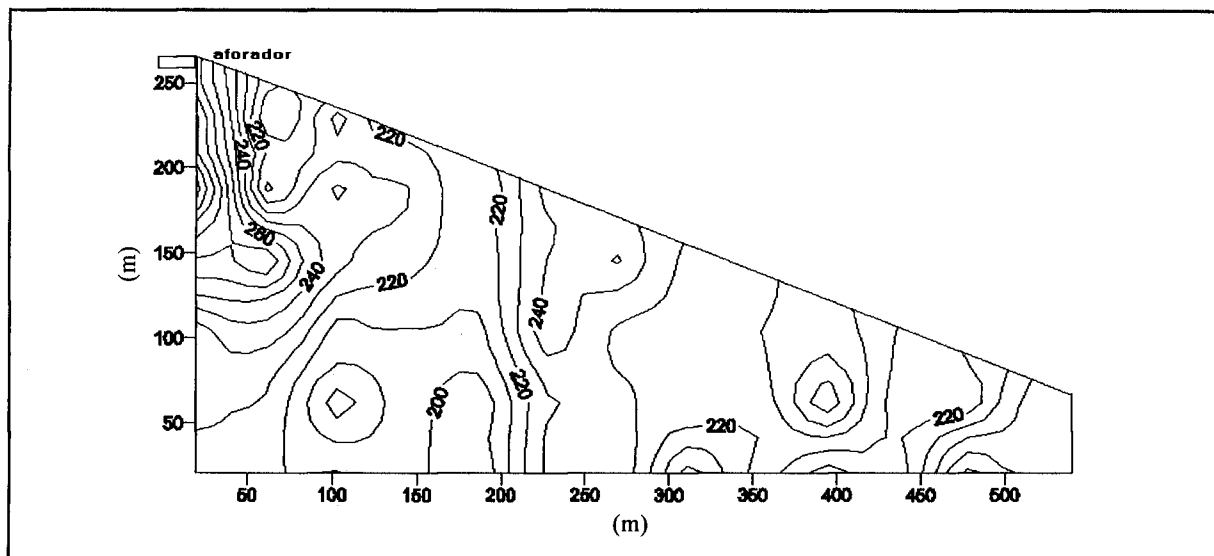


Figura 5. Isolíneas de humedad del suelo (mm) del 24.02.92  
 Figure 5. Soil moisture (mm) isolines (24.02.92).

distribución y la cantidad de agua, para las condiciones de la cuenca.

Los valores de la varianza estructural de los modelos sin “nugget” oscilaron entre 0,45 y 6,6, sus correspondientes valores de desviación estandar fueron entre 1,36 y 2,57% de humedad, y representan el 8,4 y el 13,7% del valor de las medias, respectivamente. De los dos modelos

con “nugget”, la máxima variabilidad no alcanzó al 22% del valor de la media. Ello está indicando que la dispersión fue baja considerando que se trata de mediciones a campo, y que los modelos pueden ser utilizados para estimar la humedad. Los mayores errores que se producen son por subestimación, y siempre se ubican en el sector más bajo de la microcuenca, donde predomina la acumulación de agua en superficie sobre el

escurrimiento, que no es el fenómeno físico que se desea medir. Los rangos donde la variable presenta asociación espacial oscilan entre 75 y 145 m, para las distintas profundidades y fechas. Ello implica que realizando ensayos en parcelas para determinar la influencia de diferentes tratamientos en el contenido de humedad edáfica a distancias menores que las indicadas, se está introduciendo un factor de error debido a la asociación espacial. Esto confirma la conveniencia de trabajar en una superficie mayor (microcuenca) para validar los resultados obtenidos en parcelas experimentales.

La observación del plano de isolíneas de humedad de cada fecha, con diferentes condiciones meteorológicas, de cultivo, y de humedad edáfica, indica que aunque los parámetros del modelo exponencial varían, las zonas secas y húmedas de la microcuenca se mantienen estables.

## CONCLUSIONES

Existe una clara asociación espacial en la distribución de la humedad del suelo en la microcuenca.

No se pudo ajustar un solo modelo de semivariograma para todas las situaciones de humedad y cultivo; pero para cada fecha, modelos de semivariograma exponenciales describieron adecuadamente las situaciones observadas.

La amplitud de los rangos donde la variable presenta asociación espacial, confirma la conveniencia de trabajar en superficies mayores para validar los resultados obtenidos en parcelas.

Los modelos ajustados permiten estimar la humedad del suelo de la microcuenca.

## RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue describir la variabilidad espacial del contenido de humedad del suelo (Haplustol), en una microcuenca de 8 ha (31°29' Latitud Sur, 64°13' Longitud Oeste), de la provincia de Córdoba, Argentina. Se determinó la humedad por gravimetría en 57 puntos, a 3 profundidades, en 6 fechas. Se adoptó la metodología geoestadística para describir la

variabilidad espacial. Se ajustaron modelos de semivariograma exponenciales y sin "nugget". Los modelos fueron validados (validación cruzada). Se encontró una clara asociación espacial en rangos de 70 a 145 m.

**Palabras claves:** Humedad del suelo, variabilidad espacial, geoestadística.

## LITERATURA CITADA

- APEZTEGUÍA, H. P.; AMAYA, H. E. Y CRUSTA, L. 1987. Medición de pérdidas de suelo y disminución de los rendimientos de soja debidos a la erosión hídrica en la región semiárida central de Córdoba. *Ciencia del Suelo* 5 (1): 51-55.
- BURROUGH, P. A.; BOUMA, J. AND YATES, S. R. 1994. The state of the art in pedometrics. *Geoderma* 62: 311-326.
- BURGESS, T. M AND WEBSTER, R. 1980. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semivariogram and punctual kriging. *Journal of Soil Science* 31: 315-331.
- COMEGNA, V. AND BASILE, A. 1994. Temporal stability of spatial patterns of soil water storage in a cultivated Vesubian soil. *Geoderma* 62: 299-310.



- CRESSIE, N.; GOTWAY, C. A. AND GRONDONA M.O. 1990. Spatial prediction from networks. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 7: 251-271.
- ISAACKS, E. H. AND SRIVASTARA, R. M. 1989. *Applied Geostatistics*. Oxford University Press. New York. U.S.A. 561 p.
- JOHNSON, H. P.; BAKER, J. L.; SHRADER, W. D. AND LAFLEN, J. M. 1979. Tillage system effects on sediment and nutrients in runoff from small watershed. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 22: 1110-1117.
- JOURNEL, A. G. AND HUIJBREGTS, CH. J. 1978. *Mining Geostatistics*. Academic Press. London. 600 p.
- MATHERON, G. 1971. *The Theory of Regionalized Variables and Its Application*. Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathematique 5: Cap. 6. Fontainebleau, Francia. 212 p.
- ROBLEDO, C. W. 1994. *Aplicación de Métodos Geoestadísticos en el Diseño de una Red Agrometeorológica*. Tesis de Magister Scientiae. Universidad de Buenos Aires e Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Facultad de Agronomía, Escuela de Graduados. 108 p.
- TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S. Y UEHARA, G. 1985. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Advances in Agronomy* 38: 45-93.
- SAXTON, K. E.; ASCE, A. M.; SPOMER, R. G. AND KRAMER, L. A. 1971. Hidrology and erosion of loessial watersheds. *Journal of the Hydraulics Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers* 97 (HY11) 1835-1851.
- VIEIRA, S. R.; HATFIELD, J. L.; NIELSEN, D. R. AND BIGGAR, J. W. 1983. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. *Hilgardia* 51(3): 1-75.
- ZAMORA, E.M. Y JARSUN B. 1985. Mapa de erosión de la provincia de Córdoba. Plan Mapa de Suelos de la Provincia de Córdoba. Convenio Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria - Secretaría Ministerio Agricultura Ganadería y Recursos Renovables de la Provincia de Córdoba. Córdoba, Argentina. 46 p.