

# Variabilidad espacial de los atributos físico-hídricos del suelo y de la productividad del cultivo de fréjol (*Phaseolus vulgaris L*) irrigado bajo un sistema de siembra directa

**Spatial variability of soil physical and hydrological characteristics in relation to the productivity of bean (*Phaseolus vulgaris L*) irrigated under no-tillage system.**

R. M. Mestas<sup>1</sup>, M. W. Roque<sup>2</sup>, E. E. Matura<sup>2</sup>, D. R. Bizary<sup>2</sup> & A. Paz<sup>1</sup>

---

## RESUMEN

Se estudió la variabilidad espacial del suelo con una producción de fréjol irrigado bajo un sistema de siembra directa, el objetivo fue evaluar la dependencia espacial de los atributos físico-hídricos del suelo relacionándolos con la variabilidad espacial de la producción del fréjol. Fue sembrada una parcela y demarcados 60 puntos muestrales en una malla de 3 x 3 m. Fueron colectadas muestras sin disturbar para determinación de la densidad del suelo, en el campo se determinaron la resistencia del suelo a la penetración y la conductividad hidráulica saturada. La dependencia espacial fue evaluada por el método geoestadístico del kriging puntual. Los resultados obtenidos mostraron que las regresiones obtenidas entre mapas fueron significativas, siendo que la densidad del suelo y la resistencia del suelo a la penetración se correlacionaron negativamente con la producción y la conductividad hidráulica saturada se correlacionó positivamente.

**Palabras-clave:** agricultura de precisión, Fréjol, geoestadística, variabilidad espacial,

## ABSTRACT

The spatial variability of a soil used for bean production under an irrigated no-tillage system was studied. This study aimed to evaluate the spatial dependence of soil physical and hydrological characteristics in relation to the spatial variability of the irrigated bean yield. For that reason, 60 sampling points were planted and demarcated in a 3 x 3 m grid. Disturbed samples were collected for determining soil density. In the field, soil resistance to penetration and saturated hydraulic conductivity were determined. The spatial dependence was analyzed by geostatistics using punctual kriging. According to the results, it is possible to observe that the obtained regressions among maps were significant; soil density and resistance to penetration were negatively related to the yield, while the satu-

---

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias, Universidad de La Coruña, , A Zapateira s/n, CP: 15071, La Coruña, España, e-mail: roger.mestas@udc.es; <sup>2</sup>Dep. de Água e solos UNICAMP, FEAGRI, Cidade Universitária Zeferino Vaz s/n, 13083-970 Barão Geraldo-Campinas, SP-Brasil

rated hydraulic conductivity was related positively.

**Key-words:** precision agriculture, Beans, geostatistics, spatial variability.

## INTRODUCCIÓN

La variabilidad del suelo, dentro de un campo de producción, es la causa de muchas fuentes de variabilidad de la producción, más allá de influenciar directamente diversos parámetros, como la disponibilidad de nutrientes, la disponibilidad de agua y las condiciones relacionadas al crecimiento de las raíces en las plantas.

Conceptos como agricultura de precisión, el manejo localizado de un cultivo (Fixen, 1994; Reetz, Jr., 1994) y la preocupación por la contaminación de manantiales subterráneos han llevado a la búsqueda del conocimiento de la variabilidad espacial de los suelos.

De esta forma, el mapeo de algunos factores de producción puede permitir que el campo sea subdividido, siendo el manejo de los insumos hecho de forma diferenciada en las sub-áreas (Evans *et al.*, 1995). Aún en un área de suelo homogéneo, la medida de un atributo en algunos puntos puede revelar grandes variaciones de valores, pues el suelo es producto de la acción de diversos factores de formación y varía continuamente, principalmente en la superficie.

Según Gonçalves *et al.* (2001), una vez cuantificada la dependencia espacial de las propiedades del suelo, esta puede utilizarse para la interpolación entre observaciones, permitiendo el mapeo de la propiedad del suelo dentro del área, por medio de el krigado. Basado en lo expuesto, este trabajo tuvo como objetivo estudiar la relación de la variabilidad espacial de atributos físico-hídricos del suelo y de la producción del

fréjol irrigado bajo el sistema de siembra directa.

## MATERIALES Y METODOS

El experimento fue conducido en el campo experimental de la Facultad de Ingeniería Agrícola de la UNICAMP (FEA-GRI/UNICAMP), en el municipio de Campinas-SP, cuyas coordenadas geográficas son: 22°48'57" sur, 47°03'33" oeste y una altitud media de 640 msnm.

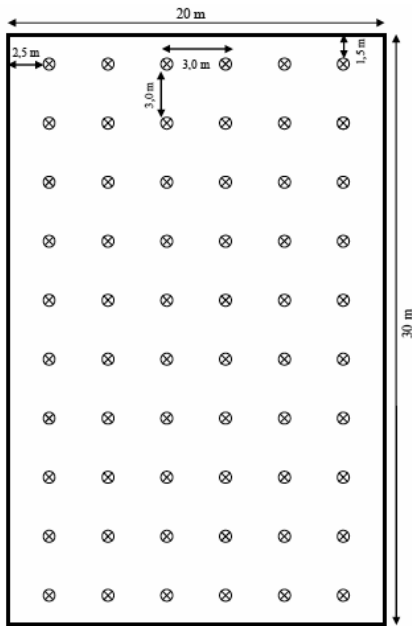
El suelo del campo experimental está desarrollado sobre materiales de naturaleza basáltica y se incluye dentro del grupo de los ferralsoles específicamente "Rhodic ferralsole", de acuerdo con la clasificación de la FAO (FAO, 2006) y según el sistema Brasileiro de clasificación de suelos fue clasificado como Latossolo Vermelho Distroférico (EMBRAPA, 1999). El fréjol fue sembrado el día 24 de junio de 2006, utilizando la variedad Carioca precoz, en una parcela experimental de 30 m de largo por 20 m de ancho (Figura 1), bajo sistema de siembra directa.

El sistema de irrigación fue montado a un espaciamiento de 9 m x 12 m, utilizándose tres líneas laterales con tres aspersores cada uno, totalizando 9 aspersores, con una intensidad media de precipitación de 7,6 mm h<sup>-1</sup>. Los parámetros evaluados del suelo fueron: resistencia del suelo a la penetración (RP) MPa, densidad del suelo (Ds) kg dm<sup>-3</sup> y la conductividad hidráulica saturada (Ko) m día<sup>-1</sup>. La resistencia del suelo a la penetración fue determinada utilizándose de un penetrometro de impacto (Stolf, 1991) y la densidad del suelo por medio de muestras de suelo sin disturbar (tomadas en anillos volumétricos metálicos de 5 cm de alto x 5 cm de diámetro).

Las mediciones de Ko fueron hechas con un permeámetro de carga constante desarro-

llado por el Instituto Agronómico de Campinas (IAC), a 0,20 m de profundidad. El permeámetro de carga constante esta basado en el principio de Mariotte, siendo descrita su operatividad por Viera (1998), usando los datos de campo obtenidas con el permeámetro, fueron determinadas las tasas constantes de infiltración ( $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ), corresponde a una carga hidráulica de 0,05 m. Con los datos de infiltración fue utilizado el programa "Onehead" para calcular la  $K_0$  de acuerdo con lo descrito por Reynolds *et al.* (1992)

Todos los atributos del suelo fueron determinados en la capa 0 – 0,20 m cuando el fréjol se encontraba en la fase de floración, en una malla regular de muestreo de 3 x 3 m, totalizando 60 puntos muestrales (Figura 1).



**Figura 1.** Croquis del área experimental y el respectivo esquema del muestreo dentro del área en estudio, con unidades en metros ( $\otimes$  = puntos muestrales)

La producción del fréjol, fue expresado a través del peso de la producción de granos

(semillas) por planta ( $\text{g planta}^{-1}$ ) y se determino colectando 3 plantas, las más próximas a cada punto muestral totalizando 180 plantas en la parcela, y obteniéndose la media para representar la producción por planta en cada punto muestral. Los análisis estadísticos fueron verificados por medio de medidas de posición (media y mediana) y dispersión (mínimo, máximo, varianza, asimetría y curtosis) y la distribución de los datos mediante la prueba de Shapiro & Wilk (1965) a un 95% de significancia. El análisis y modelaje de la estructura espacial fue evaluada por medio de las técnicas de geoestadística, en la cual el estimador usual del semivariograma es el presentado por Journel (1989). Los ajustes del modelo del semivariograma fueron hechos conforme Vieira *et al.* (1983), utilizando el programa computacional GS+. Con los semivariogramas ajustados fue utilizado el programa Surfer versión 8.0 para la interpolación mediante el krigado puntual, generando mapas de isocurvas de la distribución espacial de las variables en el área en estudio.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 esta presentada la estadística descriptiva para los atributos físico-hídricos del suelo y la producción del fréjol, obtenidos para los 60 puntos muestrales en la parcela experimental. En los cuatro atributos estudiados (Tabla 1), se observa que los valores de la media y mediana son apreciablemente próximos, mostrándonos que los datos no presentan una asimetría acentuada y, de acuerdo con Little & Hills (1978) cuando los valores de la media, mediana y moda presentan valores semejares, los dados se aproximan a la distribución normal. Esto puede ser un indicativo de que las medidas de tendencia central no son dominadas por valores atípicos

**Tabla 1.** Estadística descriptiva para los datos de resistencia del suelo a la penetración (MPa), conductividad hidráulica saturada ( $\text{m día}^{-1}$ ), densidad del suelo ( $\text{kg dm}^{-3}$ ) y producción ( $\text{g planta}^{-1}$ ).

Parámetros Estadísticos	RP (MPa)	Ko ( $\text{m día}^{-1}$ )	Ds ( $\text{kg dm}^{-3}$ )	Producción ( $\text{g planta}^{-1}$ )
N° Muestras	60	60	60	60
Media	5,32	2,70	1,31	14,62
Mediana	4,61	2,46	1,32	13,68
Mínimo	2,05	0,34	1,08	7,35
Máximo	11,47	6,15	1,54	22,54
Cuartil <sub>inferior</sub>	3,57	1,57	1,26	12,09
Cuartil <sub>superior</sub>	6,82	3,98	1,39	17,07
Variancia	5,12	2,06	0,009	13,19
Asimetría	0,807	0,46	-0,300	0,666
Curtosis	0,085	-0,61	0,250	-0,224
<sup>(1)</sup> C.V. (%)	43	53	6	25
Límite inferior	0	0	1,06	4,63
Límite superior	11,70	7,6	1,59	24,53
<sup>(2)</sup> S.W (p-valor)	< 0,010 *	> 0,100	> 0,100	< 0,010 *

<sup>(1)</sup>C.V - coeficiente de variación; <sup>(2)</sup>S.W – valores de probabilidad de Shapiro-Wilk; p-valor < 0,05 (\*) no normalidad de los datos.

de la distribución (Cambardella *et al.*, 1994), demostrando que todos los atributos involucrados en el estudio están próximos a una distribución normal e indicando que los datos están adecuados para el uso de la geoestadística.

Según la clasificación del coeficiente de variación propuesta por Warrick & Nielsen (1980), la variable Ds presentó una baja variación, y los demás atributos presentaron una variación media.

Se observa que el valor medio del RP es de 5,32, para condiciones de siembra convencional podría considerarse como un valor relativamente alto, pero, de acuerdo con Ehlers *et al.* (1983) valores superiores a 5,0 MPa son admitidos en sistemas de siembra directa.

Por medio del análisis geoestadístico se constató que los atributos estudiados presentaron dependencia espacial, debido a que ninguno de ellos presentó efecto pepita puro (Tabla 2; Figura 2).

Así, tanto los atributos del suelo cuanto la producción de granos en condiciones de

siembra directa, mostraron que la distribución de los atributos en el espacio no es aleatoria, una vez que el grado de dependencia espacial (GD) según Cambardella *et al.* (1994) variaron de fuerte para Ko y moderada para los demás atributos.

Con relación al alcance de la dependencia espacial los atributos presentaron alcances de 16,96 m, 9,39 m, 20,67 m y 14,22 m, para RP, Ko, Ds y Producción respectivamente. Para visualizar la distribución espacial de los atributos en estudio, se realizó el krigado y se construyeron mapas de isoclinas (Figura 3).

En la figura 3 se puede observar en los mapas de isoclinas en el caso de RP la mayor parte del área de la parcela se encuentra en la clase por encima de 2,7 MPa, y que según Silva *et al.* (1994), a partir de 2 MPa el crecimiento radicular de los cultivos comienza a ser comprometido.

Para el caso de Ko de acuerdo con la clasificación propuesta por el Soil Survey Staff (1993), la conductividad hidráulica

**Tabla 2.** Parámetros de los semivariogramas ajustados a los datos experimentales de resistencia del suelo a la penetración (RP), conductividad hidráulica saturada (Ko), densidad del suelo (Ds) y producción.

Propiedades del Suelo	Parámetros de los Semivariogramas Ajustados					
	Modelo	C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> +C <sub>1</sub>	a	GD (%)	R <sup>2</sup> (%)
RP	Esférico	1,50	4,74	16,96	32	98
Ko (m dia <sup>-1</sup> )	Esférico	0,02	0,68	9,39	3	99
Ds (kg dm <sup>-3</sup> )	Esférico	0,003	0,007	20,67	42	93
Producción (g planta <sup>-1</sup> )	Exponencial	3,41	10,17	14,22	34	98

C<sub>0</sub> – efecto pepita; C<sub>0</sub>+ C<sub>1</sub> –Meseta; a – alcance (m); GD = C<sub>0</sub>/(C<sub>0</sub>+ C<sub>1</sub>) – grado de dependencia (%); R<sup>2</sup> – coef. Determinación

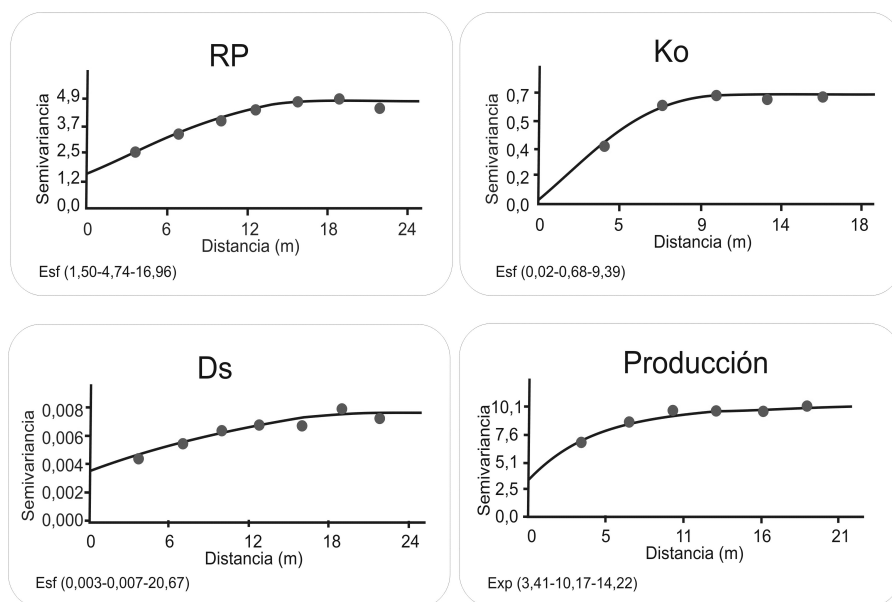
en la parcela estudiada se encuentra distribuida entre las clases lenta a moderada y moderada.

Los ferralesoles arcillosos poseen una microagregación muy acentuada debido al alto contenido de hierro. En este sentido, aunque haya un elevado contenido de arcilla, y por lo tanto, textura fina, la microagregación le confiere un comportamiento parecido al de

un suelo arenoso en lo que se refiere a la conductividad hidráulica (Resende *et al.*, 1997).

Se observa también en los mapas de distribución espacial de los atributos estudiados que las áreas de mayor productividad coincidieron con las áreas de menores valores de RP y Ds y mayores valores de Ko.

En la Tabla 3 son presentadas las ecuaciones

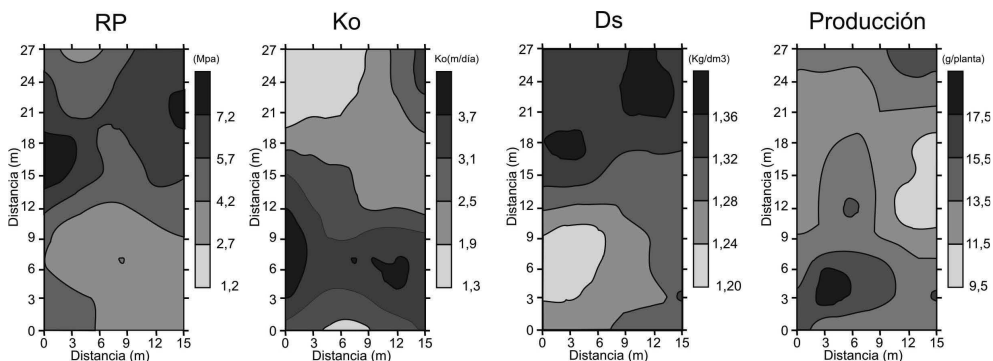


**Figura 2.** Semivariogramas de los atributos físico-hídricos del suelo (Rhodic ferralsol) y de la producción del fréjol bajo un sistema de siembra directa. Esf = modelo esférico; Exp = modelo exponencial.

**Tabla 3.** Regresión lineal entre la producción de granos del fréjol en función de los atributos físico-hídricos del suelo.

Regresión Lineal	R <sup>2</sup> (%)	Regresión Lineal - Mapas	R <sup>2</sup> (%)
Producción = 18,5-0,145 RP	0,1 <sup>ns</sup>	Producción = 35,42-2,235 RP	7,06 <sup>*</sup>
Producción = 14,8-0,052 Ko	0,0 <sup>ns</sup>	Producción = 10,26-1,110 Ko	18,43 <sup>*</sup>
Producción = 7,26-5,61 Ds	1,6 <sup>ns</sup>	Producción = 36,77-17,52 Ds	18,41 <sup>*</sup>

R<sup>2</sup> = coeficiente de determinación, \* significativo a 5 % de probabilidad por el test F; <sup>ns</sup> no-significativo.



**Figura 3.** Mapas de krigeados de la distribución espacial de los atributos físico-hídricos del suelo y la producción del fréjol bajo un sistema de siembra directa, RP = (resistencia del suelo a la penetración), Ko = (conductividad hidráulica saturada), Ds = (densidad del suelo) y producción

de las regresiones lineales simples por medio de la estadística clásica y el análisis de regresión lineal simple espacial entre mapas (pixel-a-pixel). Se nota que todas las regresiones por medio de la estadística clásica no fueron significativas, y que todas las regresiones entre mapas sí fueron significativas, observándose que los mayores R<sup>2</sup> fueron obtenidos entre los mapas de Ds y producción, y entre Ko y producción, lo que permite afirmar que cada modelo ajustado presenta en torno de 18 % de la variación de la productividad, quedando el restante por cuenta de otros factores que no vendrían a ser la densidad del suelo y la conductividad hidráulica saturada.

### CONCLUSIONES

La producción del fréjol bajo condiciones de siembra directa y los atributos fi-

sico hídricos del suelo estudiados en este trabajo presentan una estructura de dependencia espacial con grado de dependencia moderado

Todas las regresiones obtenidas entre mapas fueron significativas, siendo que la densidad del suelo y la resistencia del suelo a la penetración correlacionaron negativamente con la producción mientras que la conductividad hidráulica saturada correlacionó positivamente. Se puede observar que existe una mayor correlación de la producción con la densidad de suelo y la conductividad hidráulica saturada.

### REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Cambardella, C. A. 1994. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils. Soil Science Society of America Journal, 58(5): 1501-1511.

- Ehlers, W., Kopke, V., Hesse, F., Bohm, W. 1983. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. *Soil & Tillage Research*, 3(3): 261-275.
- EMBRAPA 1999. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária -. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 412p. Rio de Janeiro, Brasil.
- Evans, R.G., Han, S. & Kroeger, M. W. 1995. Spatial distribution and uniformity evaluations for chemigation with center pivots. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 38: 85-92.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) 2006. World Reference Base for Soil Resources. World Soil Resources Report 103. Rome, Italy.
- Fixen, P. E. 1994. Site-specific management impacts on P and K use and productivity. *Better Crops With Plant Food*, 78: 3-4.
- Gonçalves, A. C. A., Folegatti, M. V. & Mata, J. D. V. 2001. Análises exploratória e geoestatística da variabilidade de propriedades físicas de um Argissolo Vermelho. *Acta Scientiarum*, 23 (5): 1149-1157.
- Journel, A. G. 1989. Fundamentals of Geostatistics in Five Lessons. Washington: American Geophysical Union., 40.
- Little, T. M. & Hills, F. J. *Agricultural experimentation: design and analysis*. New York: J. Wiley, 1978. 350 p.
- Reetz Jr., H. F. 1994. Site-specific nutrient management system for the 1990. *Better Crops/Fall*. 78: 14-19.
- Resende, M., Curi, N., Rezende, S. B. & Corrêa, G. F. 1997. *Pedologia: base para distinção de ambientes*. 2ed. Viçosa: NEPUT.
- Reynolds, W. D., Vieira, S. R., Topp, G. C. 1992. An assessment of the singlehead analysis for the constant head well permeameter. *Canadian Journal of Soil Science*, Ottawa, 72: 489-501.
- Shapiro, S. S. & Wilk, M. B. 1965. An analysis of variance test for normality: complete samples. *Biometrika*, 52 (5):591-611.
- Silva, A.P., Kay, B.D. & Perfect, E. 1994. Characterization of the leaf limiting water range. *Soil Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:1775-1781.
- Soil Survey Staff. 1993. *Soil survey manual*. Washington, USDA-SCS. U.S. Gov. Print. Office, 437.
- Stolf, R. 1991. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 15(3):229-235.
- Viera, S. R. 1998. Permeâmetro: novo aliado na avaliação de manejo do solo. *O Agrônomo*, 47-50: 32-33.
- Vieira S. R., Hatfield, J. L., Nielsen, D. R. & Biggar, J. W. 1983. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. *Hilgardia*, Berkeley. 51 3:1-75.
- Warrick, A.W. & Nielsen, D.R. 1980. Spatial variability of soil physical properties in the field. In Hillel, D. (Ed.). *Applications of soil physics*, Cap. 2, pp.319-344. New York.