

Análisis geoestadístico de la microtopografía de la superficie en un suelo de cultivo

Geostatistical analysis of surface microtopography on tilled soil surfaces

VIDAL VÁZQUEZ, E.¹; MENEZES DE SOUZA, Z.²; TABOADA CASTRO, M^a M.¹ & PAZ GONZÁLEZ, A.¹

ABSTRACT

Depressions at the soil surface influence temporal water storage and hence runoff generation. Surface microtopography of tilled soils is subject to spatial and temporal changes. The objective of this study was to evaluate whether elevation data with different resolutions have a comparable patterns of spatial dependence. Point elevation measurements were taken on 25 tilled soil surfaces after mouldboard plough across a range of cumulative precipitation and roughness. Height was measured with a pinmeter. The grid spacing of the experimental surfaces was 2 cm and sample density was diminished by leaving point out to obtain 4 cm x 4 cm and 6 cm x 2 cm grids. The spatial structure of the studied surfaces was modelled by spherical and exponential semivariograms with no or very small nugget components. Changing sample grid spacing didn't influence the adjusted semivariogram type, but could originate small modifications of the sill and/or range values.

Key words: roughness, microrelief, geostatistics, semivariogram, pinmeter.

(1) Facultad de Ciencias. Universidad de A Coruña. A Zapateira, 15.071, A Coruña..

(2) Universidade Estadual de Sao Paulo (UNESP). Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Av. Brasil, 56. CP: 31.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años el estudio de la rugosidad de la superficie del suelo ha cobrado importancia ya que está directamente relacionada con la generación de escorrentía y por tanto con la pérdida de fertilidad de la superficie. La rugosidad superficial es una característica importante del suelo que afecta a sus propiedades hidrológicas siendo además un factor importante para prevenir la erosión hídrica, debido a la formación de microdepresiones en las que se acumula temporalmente el exceso de precipitación (DEXTER, 1977; MOORE & LARSON, 1979). De esta forma, el volumen de las depresiones puede retrasar la formación de escorrentía (ONSTAD, 1984) lo que reduce las pérdidas de suelo.

En los horizontes superficiales de los suelos agrícolas, la estructura natural está sometida a constantes cambios por efecto del laboreo lo que origina la fragmentación de algunos elementos estructurales y la compactación de otros. Por otra parte, muchos suelos de cultivo pueden constituir un medio sensible a la degradación, de tal modo que a partir de un lecho de siembra fragmentado y permeable se desarrolla bajo el impacto de las gotas de lluvia una costra superficial que reduce enormemente la infiltrabilidad (LARSON, 1962; MONTEITH, 1974; TABOADA CASTRO *et al.*, 1998). En efecto, las modificaciones del estado de la superficie del suelo dependen de un conjunto de mecanismos que gobiernan los procesos de desagregación, separación de partículas, transporte y sedimentación. Estas manifestaciones inducidas por la precipitación

se manifiestan por una reducción de la rugosidad superficial, de la porosidad y de la velocidad de infiltración. Debido a la complejidad de estos procesos, la evolución de la superficie del suelo depende de condiciones específicas, difíciles de reproducir.

En los suelos de cultivo, expuestos en estado de fragmentación a la acción de la lluvia durante períodos más o menos largos, no sólo es importante conocer la relación entre infiltrabilidad y estado de la estructura superficial, sino que además conviene evaluar la importancia del agua retenida en las microdepresiones dado su efecto sobre los procesos erosivos. Este almacenamiento depende de la historia reciente de la superficie del suelo, siendo modificado por la acción de la lluvia, viento, laboreo y tipo de cultivo.

Los avances más recientes en la investigación de los procesos erosivos han motivado un interés creciente por la medida y modelización del microrrelieve de la superficie del suelo. Muchos procesos que ocurren en la capa superficial del suelo tales como el impacto de las gotas de lluvia, el patrón de almacenamiento de agua o la deposición de sedimentos están controlados por la microtopografía; por lo tanto, cabe destacar que un modelo estadístico de la rugosidad del suelo facilita el conocimiento de los procesos que ocurren en la superficie. En efecto, el almacenamiento de agua en la superficie del suelo se tiene en cuenta en diversos modelos de erosión como EUROSEM (MORGAN *et al.*, 1993) o LISEM (DE ROO *et al.*, 1996).

Para estudiar la variabilidad espacial de una propiedad diferentes autores proponen

utilizar la geoestadística debido a que presenta diversas ventajas frente a otros métodos de interpolación ya que las estimas obtenidas no tienen sesgo, es un método exacto porque el valor estimado coincide con el muestral en los puntos de interpolación, permite determinar la precisión de las estimas y además los errores de estimación son minimizados (SAMPER y CARRERA, 1990).

El objetivo de este trabajo es el análisis geoestadístico para estudiar la dependencia espacial de datos experimentales de microtopografía. Previa retirada de la tendencia se lleva a cabo el cálculo del semivariograma muestral y el ajuste de un modelo teórico.

MATERIAL Y MÉTODOS

El análisis geoestadístico se efectuó en 25 superficies en una parcela de cultivo situada en la parroquia de Liñares (Culleredo – A Coruña). La toma de datos en el campo comprendió desde diciembre de 1998 hasta mayo de 1999, incluyendo el periodo correspondiente a las labores previas a la siembra del maíz. Para obtener estos datos se utilizó un rugosímetro de agujas, descrito en anteriores trabajos (LADO LIÑARES y TABOADA CASTRO, 1998; LADO LIÑARES, 1999). Este aparato permite realizar medidas puntuales de altura de la superficie del

suelo a lo largo de un perfil. Para registrar los perfiles se usó una cámara fotográfica digital y posteriormente se analizaron las fotografías con el Profile Meter Program (WAGNER y YIMING, 1991). Partiendo de los datos puntuales de altura se obtuvieron redes de muestreo tridimensionales con 4624 puntos en cada superficie. A partir de la red de muestreo de 2 cm x 2 cm se obtuvieron otras dos redes de muestreo: la primera de 4 cm x 4 cm (con 1156 puntos por medida), resulta de eliminar la mitad de los perfiles y la mitad de los puntos en cada perfil y la segunda de 6 cm x 2 cm (con 1564 puntos por medida) se formó eliminando dos de cada tres perfiles (tabla 1).

Previo al tratamiento de los datos, es necesario eliminar la componente de altura debida a la pendiente de la componente aleatoria, que es la empleada para caracterizar la rugosidad (RÖMKENS y WANG, 1986; LADO LIÑARES, 1999). Para ello se ajustó a los datos originales una superficie polinomial de orden uno (lineal) mediante el método de mínimos cuadrados. Los residuos se calcularon como la diferencia entre la superficie original y la ajustada. La expresión matemática utilizada fue la siguiente:

$$Z(x) = a_0 + a_1x + a_2y \tag{1}$$

Tamaño de la red de muestreo	Paso de medida	Nº perfiles	Nº puntos/perfil	Nº puntos/medida
134 cm x 134 cm	2 cm x 2 cm	68	68	4624
132 cm x 132 cm	4 cm x 4 cm	34	34	1156
134 cm x 132 cm	6 cm x 2 cm	23	68	1564

Tabla 1. Parámetros de las redes de muestreo utilizadas en este estudio.

Para analizar la variabilidad espacial de los datos de altura se usaron técnicas geoestadísticas descritas en VIEIRA *et al.* (1983). El primer paso del análisis geostatístico consiste en verificar la existencia de dependencia espacial mediante el cálculo del semivariograma experimental, $\gamma^*(h)$, que puede ser estimado por la siguiente ecuación:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^n [Z(x_i+h) - Z(x_i)]^2 \quad (1)$$

donde $N(h)$ representa el número de pares de valores medidos $[Z(x_i+h), Z(x_i)]$ separados por un vector h . Los valores de x_i y (x_i+h) son definidos de acuerdo con las posiciones de los datos muestrales.

En este trabajo los semivariogramas se han escalonado respecto a la varianza de acuerdo con VIEIRA *et al.* (1983) mediante la siguiente expresión:

$$\gamma^{sc}(h) = \frac{\gamma(h)}{\text{Var}(z)}$$

donde $\gamma^{sc}(h)$ es el semivariograma escalonado, $\gamma(h)$ el semivariograma original y $\text{Var}(z)$ es la varianza muestral de las observaciones.

Dependencia espacial significa autocorrelación, es decir, la dependencia del valor de una variable en un punto respecto al valor de sus vecinos. Esta característica está expresada en la ecuación (1) como la diferencia $[Z(x_i), Z(x_i+h)]$. Asumiendo que la variación es independiente de la dirección, se puede utilizar en los cálculos el módulo del vector h , que equivale a la dis-

tancia de separación entre muestras. Una vez calculado el semivariograma se dispone de pares de valores de semivarianza, $\gamma^*(h)$ y de distancias, h , que se representan gráficamente tomando como ordenadas los valores de la semivarianza y como abscisas las distancias. Al ajustar una ecuación a este gráfico se obtiene un modelo de dependencia espacial. Para propiedades que presentan dependencia espacial se espera que la diferencia entre los valores $[Z(x_i), Z(x_i+h)]$ crezca con la distancia hasta un punto determinado a partir del cual se estabiliza, con un valor denominado meseta, representado por el símbolo $C_0 + C_i$, aproximadamente igual a la varianza de los datos. Esta distancia recibe el nombre de alcance, a , y representa el radio de un círculo, dentro del cual los valores de la propiedad estudiada son tan similares unos a otros que están correlacionados. El valor de la semivarianza en la intersección del eje de ordenadas se denomina efecto pepita; su símbolo es C_0 , y representa la variabilidad de la propiedad estudiada para distancias inferiores a las muestradas. Así, cuanto mayor es el efecto pepita, menor es la dependencia espacial de una propiedad. Los parámetros efecto pepita (C_0), meseta ($C_0 + C_i$) y alcance (a) se usan en las ecuaciones que describen los semivariogramas mediante modelos teóricos; este procedimiento se discute ampliamente por VIEIRA *et al.* (1983).

Existen diversos modelos de semivariograma. Los datos experimentales de este trabajo se han ajustado al modelo esférico y al exponencial:

- Modelo esférico. Su ecuación viene dada por:

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_1 + \frac{C_2}{2} \left[3 \left(\frac{h}{a} \right) - \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] & h \leq a \\ C_1 + C_2 & h \geq a \end{cases} \quad (2)$$

Como este modelo se caracteriza por alcanzar la meseta a una distancia finita, suele indicar fenómenos continuos aunque no derivables, es decir fenómenos que presentan fluctuaciones. Este modelo es el más frecuentemente utilizado en Física de Suelos.

- Modelo exponencial. Viene dado por la ecuación:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 (1 - e^{-\frac{h}{a}}) \quad (3)$$

Los fenómenos descritos por este semivariograma son similares a los considerados por modelo esférico, pero con menores fluctuaciones.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 2 se muestran los parámetros utilizados en el ajuste de los semivariogramas experimentales para superficies con tres densidades de muestreo.

Se encontró un efecto pepita (C_0) igual a 0 en todas las superficies salvo en dos con rejilla de 2 x 2 cm y en una de 4 x 4 cm. El valor de la meseta, expresado con relación a la unidad por tratarse de semivariogramas escalonados, fue bastante variable aunque la mayoría de los semivariogramas poseen un valor de C_1 que oscila entre 0,93

y 1,2 para los tres tipos de superficies. Cabe destacar el alto valor que alcanza la meseta en la superficie dtmsp003 ya que $C_1 = 1,50$ para la red de 6 cm x 2 cm, $C_1 = 1,54$ para la red 4 cm x 4 cm y $C_1 = 1,61$ cm para la rejilla de 6 cm x 2 cm.

Respecto al alcance hay que señalar que en la mayor parte de los casos osciló entre 240 mm y 500 mm. En nueve superficies aumenta el alcance al disminuir el número de puntos. La superficies con mayor alcance poseen también los mayores valores de C_1 . Esto puede deberse al hecho de que el haber retirado la tendencia lineal de los datos no haya sido suficiente para filtrar la componente orientada de la rugosidad por lo que habría que realizar otros tipos de retirada de tendencia como la propuesta por CURRENCE y LOVELY, (1970).

A estos datos experimentales se les ajustó un modelo esférico en 14 ocasiones mientras que el modelo exponencial resultó ser el más adecuado para las 11 superficies restantes. El modelo ajustado fue el mismo dentro de cada superficie para los tres tipos de rejilla utilizados por lo que se deduce que el espaciado utilizado en estas medidas no afecta al tipo de dependencia espacial.

En las figuras 1 y 2 se presentan dos ejemplos de semivariogramas muestrales y modelos teóricos ajustados en la superficie dtmsp005 y en la superficie dtmsp012 para los tres tipos de red estudiados. Se comprueba que al disminuir la densidad de muestreo pasando de una red de 2 cm x 2 cm a una red de 4 cm x 4 cm disminuye la porción lineal del semivariograma debido a que existe pérdida de información, lo que tendrá consecuencias sobre la preci-

código superficie	2x2				6x2				8x2			
	C ₀	C ₁	s	modelo ajustado	C ₀	C ₁	s	modelo ajustado	C ₀	C ₁	s	modelo ajustado
slrnp001	0	1.11	405	Est	0	1.12	376	Est	0	1.06	438	Est
slrnp002	0	1.29	410	Est	0	1.20	380	Est	0	1.17	400	Est
slrnp003	0	1.91	776	Exp	0	1.64	700	Exp	0	1.6	660	Exp
slrnp004	0	1.04	369	Est	0	1.05	366	Est	0	1	360	Est
slrnp005	0	1.05	360	Exp	0	1.02	328	Exp	0	1.02	360	Exp
slrnp006	0	0.93	340	Est	0	0.96	378	Est	0	0.96	400	Est
slrnp007	0	1.64	850	Exp	0	1.22	800	Exp	0	1.25	810	Exp
slrnp008	0	1.34	800	Exp	0	1.33	800	Exp	0	1.38	798	Exp
slrnp009	0	1.01	878	Est	0	1.03	360	Est	0	1	360	Est
slrnp010	0	1.14	860	Est	0	1.11	800	Est	0	1.12	820	Est
slrnp011	0	1.2	360	Est	0	1.18	360	Est	0	1.17	348	Est
slrnp012	0.25	1.01	360	Est	0	1.05	340	Est	0	1.06	378	Est
slrnp013	0.04	1.13	340	Est	0.05	1.13	340	Est	0	1.2	360	Est
slrnp014	0	1.19	410	Est	0	1.15	418	Est	0	1.16	435	Est
slrnp015	0	1.17	400	Est	0	1.11	400	Est	0	1.15	435	Est
slrnp016	0	1.21	780	Exp	0	1.13	780	Exp	0	1.1	678	Exp
slrnp017	0	0.94	360	Est	0	0.93	360	Est	0	0.93	360	Est
slrnp018	0	1.11	880	Exp	0	1.00	870	Exp	0	1.04	880	Exp
slrnp019	0	1.02	340	Est	0	1.00	340	Est	0	1.02	360	Est
slrnp020	0	1.37	880	Exp	0	1.39	850	Exp	0	1.38	880	Exp
slrnp021	0	1.12	870	Est	0	1.14	860	Est	0	1.06	848	Est
slrnp022	0	1.20	800	Exp	0	1.19	448	Exp	0	1.13	448	Exp
slrnp023	0	1.22	686	Exp	0	1.25	490	Exp	0	1.29	498	Exp
slrnp024	0	1.3	880	Exp	0	1.28	880	Exp	0	1.38	855	Exp
slrnp025	0	1.10	480	Exp	0	1.08	400	Exp	0	1.03	360	Exp

Tabla 2. Parámetros de los modelos de semivariograma ajustados a los datos experimentales.

sión de los resultados obtenidos. Por lo tanto, aunque visualmente se mantiene similar el semivariograma a pequeñas distancias disminuye el número de puntos muestrales.

Por el contrario, si se disminuye la densidad de muestreo pasando de una red 2 cm x 2 cm a una red 6 cm x 2 cm se mantienen puntos del semivariograma muestral a cortas distancias aunque se reduce el número de pares de datos con que se calcula cada uno de estos puntos. Además en algunos casos se observa que al reducir la densidad de muestreo en las superficies de 6 cm x 2 cm se genera una cierta anisotropía, que se puede apreciar al comparar el semivariograma de la red 2

cm x 2 cm con el semivariograma de la red 6 cm x 2 cm en la figura 2.

El siguiente paso en el análisis geoestadístico sería trabajar con menor número de puntos por medida, aumentando el espaciado, para poder seguir profundizando en el estudio de la dependencia espacial de los datos de rugosidad. Un posterior análisis de estos resultados incluirá la construcción de modelos de elevación digital y la validación de los resultados mediante krigeado.

Actualmente es posible estudiar con más resolución la microtopografía mediante técnicas como el láser que permite medir con espaciados del orden de 1 a 2 mm. Sin embargo existen numerosas

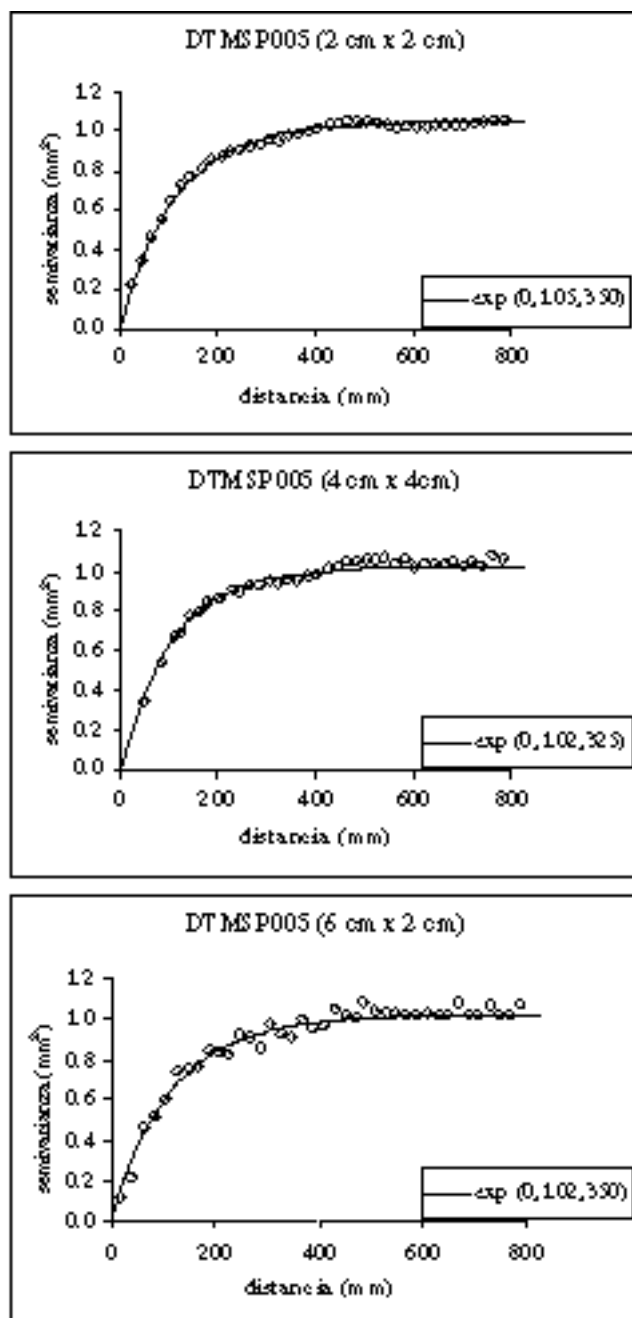


Figura 1. Semivariogramas muestrales y modelos teóricos ajustados en la superficie *dtmsp005* con los tres tipos de red de muestreo.

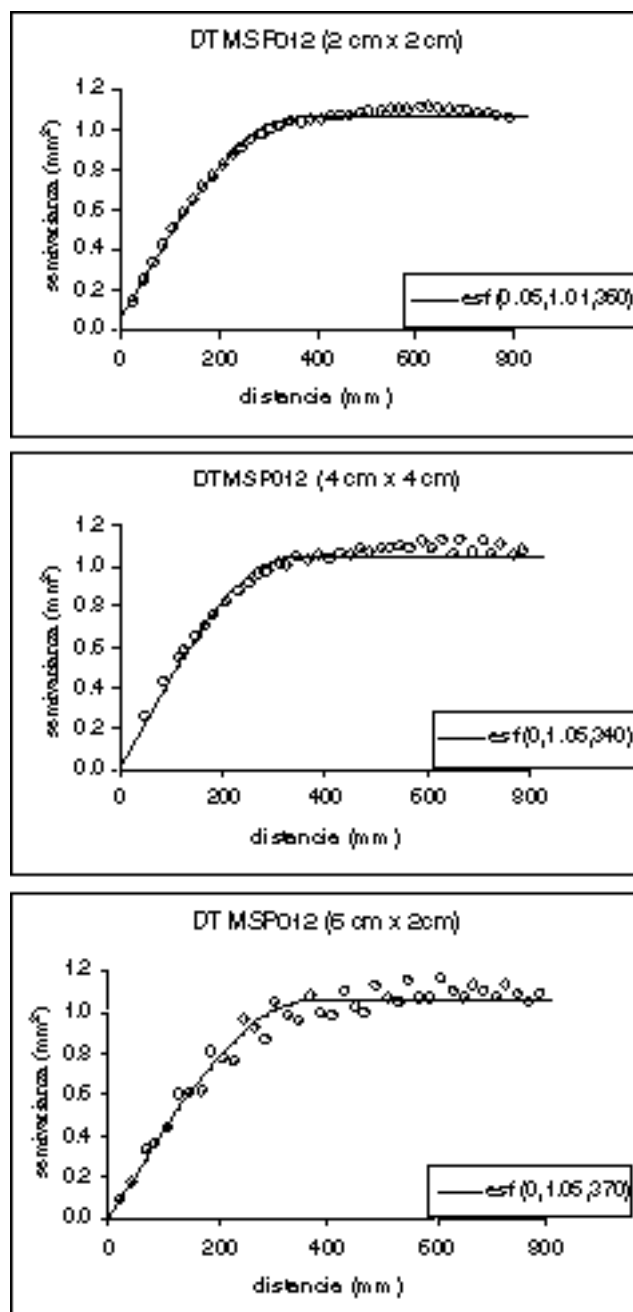


Figura 2. Semivariogramas muestrales y modelos teóricos ajustados en la superficie dtmsp012 con los tres tipos de red de muestreo.

series de datos medidas con rugosímetro de agujas en rejilla rectangular con un espaciado entre puntos de un perfil del orden de 1 a 3 cm y entre perfiles sucesivos del orden de 10 a 15 cm (ALLMARAS *et al.*, 1966; CURRENCE y LOVELY, 1970; ONSTAD, 1984; LADO LIÑARES, 1999). Queda por determinar si la Geoestadística puede relacionar datos de microrrelieve a distinta escala.

CONCLUSIONES

A partir de medidas puntuales de altura se calcularon los semivariogramas experimentales correspondientes a 25 superficies de cultivo. Del total de superficies, 14

se ajustaron a un modelo esférico mientras que las 11 superficies restantes se ajustaron a un modelo exponencial.

Dentro de cada superficie y para tres densidades de muestreo diferentes se ajustó el mismo tipo de modelo por lo que se deduce que el espaciado de las medidas usado en este trabajo no afecta al tipo de dependencia espacial pero tienden a variar parámetros como el alcance y la meseta.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado en el marco de los Proyectos HID 96-1085-C02 y PGIDT99MA10303.

BIBLIOGRAFÍA

- ALLMARAS, R. R.; BURWELL, R. E.; LARSON, W. E. & HOLT, R. F., (1966). Total porosity and random roughness of the interrow zone as influenced by tillage. *USDA Conservation Research Report*, **7**: 1-14.
- CURRENCE, H. D. & LOVELY, W. G., (1970). The analysis of soil surface roughness. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineering*, **13**: 710-714.
- DE ROO, A. P. J.; WESSELING, C. G.; & RITSEMA, C. J., (1996). LISEM: a single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. I: Theory, input and output. *Hydrological Processes*, **10**: 1107-1117.
- DEXTER, A. R., (1977). Effect of rainfall on the surface micro-relief of tilled soil. *Journal of Terramechanics*, **14** (1): 11-22.
- LADO LIÑARES, M., (1999). *Cuantificación de la rugosidad orientada y aleatoria mediante índices y su relación con la degradación del microrrelieve del suelo y el almacenamiento temporal de agua*. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias. Universidad de La Coruña.
- LADO LIÑARES, M. & TABOADA CASTRO, M^a. M., (1998). Medida de la rugosidad del suelo en terrenos de cultivo. V Reunión Nacional de Geomorfología. (Gómez Ortiz y Salvador Franch eds.) pags. 731-734.
- LARSON, W. E., (1962). Tillage requirements for corn. *Journal of Soil and Water Conservation*, **17**: 3-7.
- MONTEITH, N. H., (1974). The role of surface roughness in runoff. *Journal of Soil and Water Conservation*. New South Wales, **30**: 42-45.
- MOORE, I. D. and LARSON, C. L., (1979). Estimating micro-relief surface storage from point data. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineering*, **20**: 1073-1077.
- MORGAN, R.P.C.; QUINTON, J.N. & RICKSON, R. J., (1993). *EUROSEM: A User Guide*. Silsoe College. 84 pp.
- ONSTAD, C.A., (1984). Depressional storage on tilled soil surfaces. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineering*, **27**: 729-732.
- RÖMKENS, M. J. M. & WANG, J. Y., (1986). Effect of tillage on surface roughness. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineering*, **29**: 429-433.
- SAMPER, F. J. & CARRERA, J., (1990). *Geoestadística. Aplicaciones a la hidrología subterránea*. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. Barcelona. 484 pp.
- TABOADA CASTRO, M^a M.; LADO LIÑARES, M.; DIÉGUEZ VILLAR, A. & PAZ GONZÁLEZ, A., (1998). Evolución temporal de la infiltración superficial a escala de parcela. En *Avances sobre el estudio de la erosión hídrica*. Eds: Antonio Paz González y M^a Teresa Taboada Castro. A Coruña. pp.: 101-127.
- VIEIRA, S. R.; HATFIELD, J. L.; NIELSEN, D. R. & BIGGAR, J. W., (1983). Geostatistical theory and application to variability of some agro-nomical properties. *Hilgardia*, Berkeley, **51** (3):1-75.
- WAGNER, L.E. & YIMING YU., (1991). Digitization of profile meter photographs. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, **34**: 412-416.