

Relación entre índices de rugosidad: tortuosidad, pendiente límite, distancia límite y rugosidad aleatoria

Relations between roughness indices: tortuosity, limiting slope, limiting difference and random roughness

LADO LIÑARES, M., TABOADA CASTRO, M^a M. Y DIEGUEZ VILLAR, A.

Soil surface roughness is one of the parameters influencing runoff generation. An amount of 137 roughness measurements under different conditions of tillage and crop were made from March, 1997 to April, 1998. A pinmeter was used for this purpose. After trend removal, four roughness indices: tortuosity, random roughness, limiting slope and limiting difference were calculated. Limiting difference and random roughness showed the highest correlation, followed by tortuosity and limiting slope.

Key words: Microrrelief, pinmeter, random roughness, tortuosity, geostatistical indices.

LADO LIÑARES, M., TABOADA CASTRO, M^a M. Y DIEGUEZ VILLAR, A. (Facultad de Ciencias, Universidade da Coruña, A Zapateira, 15071 A Coruña).

INTRODUCCION

La rugosidad del suelo es un factor importante que condiciona la formación de escorrentía en terrenos de cultivo. Por un lado, la existencia de un microrrelieve bien desarrollado retarda el proceso de sellado y formación de una costra superficial, lo que favorece la capacidad de infiltración del suelo (HELMING et al, 1992). Por otro lado, las microdepresiones de la superficie funcionan como almacén temporal del exceso de agua cuando la intensidad de la precipitación supera la capacidad de infiltración (DEXTER, 1977; MOORE and LARSON, 1979; MITCHELL and JONES, 1976).

Por tanto, para poder estudiar y predecir la formación de la escorrentía (que es uno de los factores claves en los procesos erosivos) es necesario conocer los factores de que depende la configuración de la superficie del suelo y su variación tanto espacial como temporal.

Si bien en un principio la descripción de la rugosidad se realizó de forma cualitativa, la necesidad de una caracterización objetiva y la utilización de este parámetro para predecir la infiltración o la retención de agua en microdepresiones hizo necesaria la elaboración de índices para su cuantificación.

Uno de los primeros índices cuantitativos utilizados fue propuesto por KUIPERS (1957). Posteriormente, ALLMARAS et al. (1966) definió un índice llamado rugosidad aleatoria (RR) como el error estándar de los logaritmos de las alturas tras retirar el efecto del laboreo y la pendiente. Estos primeros índices son puramente estadísticos, por lo que tienen el inconveniente de que no ofre-

cen una interpretación física acerca de la distribución espacial de la rugosidad y dependen de la función de distribución de los datos. Para paliar este defecto han aparecido nuevos índices con base física para la caracterización de la rugosidad (RÖMKENS and WANG, 1986; 1987), entre los que destacan la distancia límite y la pendiente límite propuestos por LINDEN and VAN DOREN (1986).

El objetivo de este trabajo es presentar los resultados de los índices de rugosidad obtenidos a lo largo de un año de estudio. Las medidas se realizaron con un asperímetro en diferentes parcelas sometidas a distintas condiciones de laboreo, cultivo y estado de la superficie.

MATERIAL Y METODOS

En el presente trabajo se realizó un total de 137 medidas de rugosidad superficial repartidas en cuatro zonas diferentes: el Centro de Investigaciones Agrarias de Mabegondo (Abegondo-A Coruña), la explotación agropecuaria El Abelar (Abegondo-A Coruña), la casa grande de Lóngora (Oleiros-A Coruña), y dos parcelas de cultivo situadas en la parroquia de Liñares (Culleredo-A Coruña). El período de estudio comprendió desde marzo de 1997 hasta abril de 1998. Las experiencias se realizaron cubriendo un amplio espectro de condiciones tanto de laboreo y cultivo como de evolución de la superficie del suelo que finalmente fueron agrupadas en tres categorías: superficies cultivadas, superficies de pradera, y superficies sometidas a laboreo primario.

Para la realización de las medidas se empleó un asperímetro, que permite la

toma de un número variable de datos puntuales de altura a lo largo de un perfil con una separación entre ellos de 2 cm (LADO y TABOADA, 1998). De ello resultan redes de muestreo bidimensionales formadas por perfiles paralelos separados entre sí por distancias regulares. El número de perfiles que se tomaron en cada medida comenzó siendo de 14 perfiles espaciados por 10 cm entre sí, pero posteriormente se amplió a 28 perfiles separados por 5 cm.

Previamente al cálculo de los índices se separaron las componentes orientada (debida a la pendiente y el laboreo) y aleatoria (debida a la distribución de los terrones y agregados) de la rugosidad, ya que esta última es la empleada para la caracterización (BERTUZZI et al, 1990). Para separar ambas componentes se filtró la tendencia de los datos, y se consideró que la rugosidad aleatoria está constituida por los residuos resultantes. Las superficies empleadas para el filtrado de los datos originales fueron lineares (orden 1), parabólicas (orden 2) o cúbicas (orden 3).

Los índices de rugosidad calculados a partir de los datos residuales fueron:

Rugosidad aleatoria (RR).- Se ha empleado el criterio de CURRENCY and LOVELY (1970), que la definen como el error estándar de los residuos

$$RR = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_i - \bar{Z})^2}{N-1}}$$

donde Z_i = altura en cada punto.

\bar{Z} = media de las alturas.

N = número de puntos.

Pendiente límite (LS) y distancia límite (LD).- Estos índices parten del cálculo

del semivariograma de primer orden de los datos de altura para sucesivas distancias

$$DZ_h = \sum_{i=1}^n \frac{|Z_i - Z_{i+h}|}{n}$$

donde: Z_i = altura en cada punto.

Z_{i+h} = altura en un punto situado a una distancia h de Z_i .

n = número de datos.

Tras retirar la orientación del microrrelieve debida al laboreo y a la pendiente de la superficie medida, Linden y Van Doren hallan una relación lineal entre las inversas de la distancia y la diferencia media de alturas

$$\frac{1}{DZ_h} = a + b \frac{1}{DX_h}$$

La distancia máxima de comparación de los valores del semivariograma de primer orden se limita a 20 cm, que constituye el rango en que la regresión entre las inversas de la diferencia de alturas y la distancia es mayor (LINDEN and VAN DOREN, 1986). Los parámetros a y b se calculan mediante análisis de regresión y a partir de ellos se definen los índices diferencia límite (LD) y pendiente límite (LS) como

$$LD = \frac{1}{a} \quad \text{y} \quad LS = \frac{1}{b}$$

LD proporciona información acerca de las características del microrrelieve a grandes distancias, y a medida que ésta aumenta, su valor es similar a la desviación típica de los valores de altura. Por su parte, LS caracteriza la rugosidad a cortas distancias, y su valor se aproxima a la relación DZ/DX cuando DX tiende a 0.

Las ventajas de estos índices consisten en que proporcionan una buena descripción de la rugosidad, y no dependen de la función de distribución de los datos. Además poseen un sentido físico y una buena sensibilidad a variaciones en la rugosidad.

Índice de tortuosidad (T).- Para el cálculo de la tortuosidad se ha empleado el índice propuesto por BOIFFIN (1984) para transectos longitudinales:

$$T = \frac{L}{L_0}$$

donde T = tortuosidad

L = longitud del perfil

L₀ = longitud de la proyección horizontal del perfil

RESULTADOS Y DISCUSION

En la tabla 1 se pueden ver las principales características de las medidas de rugosidad realizadas. El número total de parcelas utilizadas en el estudio fue de 26, repartidas de la siguiente forma: 2 en la parroquia de Liñares, 5 en la granja agropecuaria El Abelar, 1 en la Casa Grande de Lóngora, y 18 en el Centro de Investigaciones Agrarias de Mabegondo.

El número total de puntos muestreados en cada medida varió entre 702 y 2212 en función del número de perfiles y el número de puntos por perfil empleados.

Las superficies empleadas para el filtrado de la tendencia fueron en su mayor parte cúbicas, ya que fueron las que mejor se ajustaron a los datos originales. Sin embargo, sería necesario comprobar que el filtrado con este tipo de superficie no genera artificios que distorsionan el valor

real de la rugosidad, ya que el efecto del laboreo puede no ser eliminado, o pueden ser eliminadas características de la rugosidad que no son debidas a la pendiente o el laboreo.

La mayor parte de las medidas se realizaron tomando los perfiles en sentido perpendicular a la dirección del laboreo, aunque en algún caso se realizaron medidas en sentido paralelo y perpendicular para analizar el efecto de esta circunstancia sobre el cálculo de los índices.

Los resultados estadísticos de los distintos índices de rugosidad se muestran en la tabla 2. Los índices RR, T, y LD poseen rangos de valores que siguen de mayor a menor el siguiente orden: laboreo primario > cultivo > pradera. Sin embargo, en el caso de LS el rango mayor lo presentan las superficies cultivadas (1.07), seguido de las superficies sometidas a laboreo primario (0.92) y las de pradera (0.51).

LD es el índice que presenta un rango mayor en todos los tipos de superficie, seguido de RR, LS y T por este orden.

Respecto a los valores medios, en los cuatro índices la secuencia de estados de mayor a menor valor sigue el siguiente orden: laboreo primario > cultivo > pradera. El índice LD posee los valores medios más elevados en todos los estados superficiales, seguido de RR, T y LS.

Los coeficientes de variación muestran que todos los índices excepto la tortuosidad presentan una gran variabilidad. RR y T presentan su mayor variabilidad en las superficies sometidas a un laboreo primario (34.36 y 8.20 % respectivamente), seguidas de las superficies cultivadas (30.77 y 3.10 % respectivamente). La menor variabilidad aparece

TABLA 1. Resumen de las características de las medidas de rugosidad realizadas

Nº de puntos	Lugar	Fecha	Parcela	Estado	Sup. de tendencia	Orientación del cultivo
2072	Liñares	25/03/98	Li-1	Laboreo primario	Cúbica	Perpendicular
2044	Liñares	25/03/98	Li-1	Laboreo primario	Linear	Perpendicular
2072	Liñares	25/03/98	Li-1	Laboreo primario	Linear	Perpendicular
2072	Liñares	25/03/98	Li-2	Laboreo primario	Linear	Perpendicular
2072	Liñares	25/03/98	Li-2	Laboreo primario	Parabólica	Perpendicular
2072	Liñares	25/03/98	Li-2	Laboreo primario	Cúbica	Perpendicular
2072	Liñares	18/03/98	Li-2	Laboreo primario	Cúbica	Perpendicular
1998	Liñares	18/03/98	Li-2	Laboreo primario	Cúbica	Perpendicular
2100	Liñares	18/03/98	Li-1	Laboreo primario	Cúbica	Perpendicular
2100	Liñares	18/03/98	Li-1	Laboreo primario	Cúbica	Perpendicular
2100	Liñares	18/03/98	Li-1	Laboreo primario	Parabólica	Perpendicular
2100	Liñares	18/03/98	Li-1	Laboreo primario	Cúbica	Perpendicular
2044	Liñares	1/04/98	Li-1	Laboreo primario	Cúbica	Perpendicular
2044	Liñares	1/04/98	Li-1	Laboreo primario	Cúbica	Perpendicular
2044	Liñares	1/04/98	Li-1	Laboreo primario	Linear	Perpendicular
2016	Liñares	1/04/98	Li-1	Laboreo primario	Cúbica	Perpendicular
2128	Mabegondo	7/10/97	Ma-29	Laboreo primario	Linear	Perpendicular
2128	Mabegondo	7/10/97	Ma-29	Laboreo primario	Linear	Perpendicular
2128	Mabegondo	13/10/97	Ma-29	Laboreo primario	Cúbica	Perpendicular
2156	Mabegondo	13/10/97	Ma-29	Laboreo primario	Cúbica	Perpendicular
2128	Mabegondo	26/11/97	Ma-29	Laboreo primario	Cúbica	Perpendicular
2128	Mabegondo	26/11/97	Ma-29	Laboreo primario	Cúbica	Perpendicular
2100	Mabegondo	17/03/98	Ma-29	Laboreo primario	Cúbica	Perpendicular
2100	Mabegondo	17/03/98	Ma-29	Laboreo primario	Cúbica	Perpendicular
2100	Mabegondo	17/03/98	Ma-29	Laboreo primario	Cúbica	Perpendicular
2212	Mabegondo	7/10/97	Ma-29	Laboreo primario	Cúbica	Perpendicular
2100	Mabegondo	16/03/98	Ma-7	Laboreo primario	Cúbica	Perpendicular
2100	Mabegondo	16/03/98	Ma-7	Laboreo primario	Cúbica	Perpendicular
2100	Mabegondo	16/03/98	Ma-7	Laboreo primario	Cúbica	Perpendicular
2100	Mabegondo	16/03/98	Ma-7	Laboreo primario	Cúbica	Perpendicular
2100	Mabegondo	17/03/98	Ma-15	Laboreo primario	Cúbica	Perpendicular
2100	Mabegondo	17/03/98	Ma-15	Laboreo primario	Cúbica	Perpendicular
2100	Mabegondo	17/03/98	Ma-15	Laboreo primario	Cúbica	Perpendicular
2100	Mabegondo	17/03/98	Ma-15	Laboreo primario	Cúbica	Perpendicular
2128	Mabegondo	21/10/97	Ma-17	Laboreo primario	Linear	Perpendicular
2128	Mabegondo	21/10/97	Ma-17	Laboreo primario	Linear	Perpendicular
2128	Mabegondo	26/11/97	Ma-17	Laboreo primario	Cúbica	Perpendicular
2128	Mabegondo	27/11/97	Ma-17	Laboreo primario	Cúbica	Perpendicular
2128	Mabegondo	26/11/97	Ma-17	Laboreo primario	Cúbica	Perpendicular
2128	Mabegondo	27/11/97	Ma-17	Laboreo primario	Cúbica	Perpendicular
2128	Mabegondo	7/10/97	Ma-18	Laboreo primario	Linear	Perpendicular
2128	Mabegondo	7/10/97	Ma-18	Laboreo primario	Cúbica	Perpendicular
2128	Mabegondo	15/10/97	Ma-21	Laboreo primario	Cúbica	Perpendicular
2100	Mabegondo	15/10/97	Ma-21	Laboreo primario	Linear	Perpendicular
2128	Mabegondo	16/10/97	Ma-21	Laboreo primario	Cúbica	Perpendicular

TABLA 1. Resumen de las características de las medidas de rugosidad realizadas (continuación).

Nº de puntos	Lugar	Fecha	Parcela	Estado	Sup. de tendencia	Orientación del cultivo
2128	Mabegondo	16/10/97	Ma-21	Laboreo primario	Cúbica	Perpendicular
2212	Mabegondo	1/10/97	Ma-22	Laboreo primario	Cúbica	Perpendicular
2100	Mabegondo	1/10/97	Ma-22	Laboreo primario	Linear	Perpendicular
2100	Mabegondo	1/10/97	Ma-22	Laboreo primario	Linear	Perpendicular
2100	Mabegondo	1/10/97	Ma-22	Laboreo primario	Cúbica	Perpendicular
2128	Mabegondo	20/10/97	Ma-22	Laboreo primario	Cúbica	Perpendicular
2128	Mabegondo	20/10/97	Ma-22	Laboreo primario	Linear	Perpendicular
2128	Mabegondo	20/10/97	Ma-22	Laboreo primario	Cúbica	Perpendicular
2128	Mabegondo	20/10/97	Ma-22	Laboreo primario	Cúbica	Perpendicular
2100	Mabegondo	12/03/98	Ma-7	Laboreo primario	Linear	Perpendicular
2100	Mabegondo	12/03/98	Ma-7	Laboreo primario	Linear	Perpendicular
2100	Mabegondo	12/03/98	Ma-7	Laboreo primario	Linear	Perpendicular
2100	Mabegondo	12/03/98	Ma-7	Laboreo primario	Linear	Perpendicular
2100	Mabegondo	17/02/98	Ma-9	Laboreo primario	Cúbica	Perpendicular
2100	Mabegondo	17/02/98	Ma-9	Laboreo primario	Linear	Perpendicular
2100	Mabegondo	17/02/98	Ma-9	Laboreo primario	Cúbica	Perpendicular
2100	Mabegondo	17/02/98	Ma-9	Laboreo primario	Cúbica	Perpendicular
1078	Abelar	24/04/97	Ab-0	Pradera	Cúbica	Perpendicular
1078	Abelar	24/04/97	Ab-0	Pradera	Cúbica	Perpendicular
1092	Abelar	2/04/97	Ab-0	Pradera	Cúbica	Perpendicular
1096	Abelar	16/04/97	Ab-0	Pradera	Cúbica	Perpendicular
1092	Abelar	23/07/97	Ab-0	Pradera	Linear	Perpendicular
1078	Abelar	23/07/97	Ab-0	Pradera	Linear	Perpendicular
1092	Abelar	28/07/97	Ab-0	Pradera	Cúbica	Perpendicular
1092	Abelar	28/07/97	Ab-0	Pradera	Cúbica	Perpendicular
1078	Abelar	8/04/97	Ab-0	Pradera	Cúbica	Perpendicular
1092	Abelar	23/07/97	Ab-0	Pradera	Parabólica	Perpendicular
1092	Abelar	23/07/97	Ab-0	Pradera	Cúbica	Perpendicular
2128	Mabegondo	16/10/97	Ma-0	Pradera	Cúbica	Perpendicular
1078	Mabegondo	16/10/97	Ma-0	Pradera	Cúbica	Perpendicular
2128	Mabegondo	15/10/97	Ma-30	Pradera	Cúbica	Perpendicular
2128	Mabegondo	15/10/97	Ma-30	Pradera	Cúbica	Perpendicular
2128	Mabegondo	14/10/97	Ma-31	Pradera	Cúbica	Perpendicular
2128	Mabegondo	14/10/97	Ma-31	Pradera	Cúbica	Perpendicular
1064	Abelar	22/07/97	Ab-1	Sup. Cultivada	Linear	Paralelo
1064	Abelar	22/07/97	Ab-1	Sup. Cultivada	Cúbica	Paralelo
1064	Abelar	22/07/97	Ab-1	Sup. Cultivada	Cúbica	Perpendicular
1064	Abelar	22/07/97	Ab-1	Sup. Cultivada	Cúbica	Perpendicular
1078	Abelar	11/06/97	Ab-1	Sup. Cultivada	Parabólica	Perpendicular
1092	Abelar	9/07/97	Ab-2	Sup. Cultivada	Cúbica	Paralelo
1092	Abelar	9/07/97	Ab-2	Sup. Cultivada	Cúbica	Perpendicular
2128	Abelar	15/12/97	Ab-2	Sup. Cultivada	Linear	Perpendicular
2128	Abelar	15/12/97	Ab-2	Sup. Cultivada	Cúbica	Perpendicular
2128	Abelar	15/12/97	Ab-2	Sup. Cultivada	Parabólica	Perpendicular
2128	Abelar	15/12/97	Ab-2	Sup. Cultivada	Parabólica	Perpendicular
1078	Abelar	9/07/97	Ab-3	Sup. Cultivada	Linear	Perpendicular

TABLA 1. Resumen de las características de las medidas de rugosidad realizadas (continuación).

Nº de puntos	Lugar	Fecha	Parcela	Estado	Sup. de tendencia	Orientación del cultivo
1092	Abelar	9/07/97	Ab-3	Sup. Cultivada	Linear	Perpendicular
1092	Abelar	11/06/97	Ab-3	Sup. Cultivada	Cúbica	Perpendicular
2128	Abelar	5/12/97	Ab-3	Sup. Cultivada	Linear	Perpendicular
2128	Abelar	5/12/97	Ab-3	Sup. Cultivada	Cúbica	Perpendicular
2128	Abelar	5/12/97	Ab-3	Sup. Cultivada	Linear	Perpendicular
2128	Abelar	5/12/97	Ab-3	Sup. Cultivada	Linear	Perpendicular
1078	Abelar	9/07/97	Ab-4	Sup. Cultivada	Cúbica	Perpendicular
1078	Abelar	9/07/97	Ab-4	Sup. Cultivada	Cúbica	Perpendicular
1092	Lóngora	29/07/97	Lo-1	Sup. Cultivada	Linear	Perpendicular
994	Lóngora	9/04/97	Lo-1	Sup. Cultivada	Linear	Perpendicular
1106	Lóngora	19/03/97	Lo-1	Sup. Cultivada	Linear	Perpendicular
2128	Mabegondo	8/10/97	Ma-13	Sup. Cultivada	Cúbica	Perpendicular
2128	Mabegondo	8/10/97	Ma-13	Sup. Cultivada	Cúbica	Perpendicular
2128	Mabegondo	8/10/97	Ma-13	Sup. Cultivada	Linear	Perpendicular
1050	Mabegondo	23/06/97	Ma-13	Sup. Cultivada	Cúbica	Perpendicular
2128	Mabegondo	14/10/97	Ma-14	Sup. Cultivada	Cúbica	Perpendicular
2128	Mabegondo	14/10/97	Ma-14	Sup. Cultivada	Cúbica	Perpendicular
2128	Mabegondo	14/10/97	Ma-14	Sup. Cultivada	Cúbica	Perpendicular
2184	Mabegondo	8/10/97	Ma-14	Sup. Cultivada	Cúbica	Perpendicular
1050	Mabegondo	23/06/97	Ma-14	Sup. Cultivada	Cúbica	Perpendicular
1050	Mabegondo	25/06/97	Ma-16	Sup. Cultivada	Linear	Paralelo
1050	Mabegondo	25/06/97	Ma-16	Sup. Cultivada	Parabólica	Perpendicular
2184	Mabegondo	2/10/97	Ma-17	Sup. Cultivada	Cúbica	Perpendicular
2184	Mabegondo	2/10/97	Ma-17	Sup. Cultivada	Parabólica	Perpendicular
1050	Mabegondo	25/06/97	Ma-17	Sup. Cultivada	Linear	Paralelo
1064	Mabegondo	30/06/97	Ma-17	Sup. Cultivada	Cúbica	Paralelo
1050	Mabegondo	23/06/97	Ma-17	Sup. Cultivada	Cúbica	Perpendicular
1064	Mabegondo	30/06/97	Ma-17	Sup. Cultivada	Cúbica	Perpendicular
2100	Mabegondo	2/10/97	Ma-19	Sup. Cultivada	Cúbica	Perpendicular
2212	Mabegondo	2/10/97	Ma-19	Sup. Cultivada	Cúbica	Perpendicular
2128	Mabegondo	27/11/97	Ma-19	Sup. Cultivada	Cúbica	Perpendicular
2128	Mabegondo	27/11/97	Ma-19	Sup. Cultivada	Linear	Perpendicular
1106	Mabegondo	7/07/97	Ma-2	Sup. Cultivada	Linear	Perpendicular
1078	Mabegondo	20/03/97	Ma-2	Sup. Cultivada	Linear	Perpendicular
2128	Mabegondo	6/11/97	Ma-22	Sup. Cultivada	Cúbica	Perpendicular
2128	Mabegondo	6/11/97	Ma-22	Sup. Cultivada	Cúbica	Perpendicular
2128	Mabegondo	6/11/97	Ma-22	Sup. Cultivada	Cúbica	Perpendicular
2128	Mabegondo	6/11/97	Ma-22	Sup. Cultivada	Cúbica	Perpendicular
2128	Mabegondo	24/11/97	Ma-23	Sup. Cultivada	Parabólica	Perpendicular
2128	Mabegondo	24/11/97	Ma-23	Sup. Cultivada	Cúbica	Perpendicular
1092	Mabegondo	8/07/97	Ma-3	Sup. Cultivada	Cúbica	Paralelo
1106	Mabegondo	7/07/97	Ma-3	Sup. Cultivada	Cúbica	Perpendicular
948	Mabegondo	8/07/97	Ma-6	Sup. Cultivada	Parabólica	Perpendicular
1050	Mabegondo	25/06/97	Ma-6	Sup. Cultivada	Cúbica	Perpendicular
1078	Mabegondo	8/07/97	Ma-9	Sup. Cultivada	Cúbica	Perpendicular
702	Mabegondo	8/07/97	Ma-7	Sup. Cultivada	Cúbica	Perpendicular

TABLA 2. Datos estadísticos de los índices calculados.

		MAX	MIN	RANGO	MEDIA	STD	CV (%)
T	Cultivo	1.16	1.02	0.14	1.07	0.03	3.10
	Pradera	1.11	1.02	0.09	1.04	0.02	1.97
	Laboreo primario	1.49	1.08	0.41	1.25	0.10	8.20
LD (cm)	Cultivo	4.63	0.58	4.04	1.78	0.75	42.13
	Pradera	1.55	0.86	0.69	1.11	0.21	19.19
	Laboreo primario	8.84	1.28	7.56	4.44	1.56	35.03
LS	Cultivo	1.29	0.23	1.07	0.41	0.17	40.96
	Pradera	0.73	0.23	0.51	0.38	0.13	33.57
	Laboreo primario	1.32	0.39	0.92	0.83	0.21	25.48
RR (cm)	Cultivo	2.48	0.54	1.94	1.44	0.44	30.77
	Pradera	1.24	0.63	0.61	0.89	0.16	17.99
	Laboreo primario	5.95	1.08	4.87	3.28	1.14	34.66

en las superficies de pradera (17.99 y 1.97 %). LD posee mayor variabilidad en las superficies de cultivo (42.13%), seguidas de las superficies de laboreo (35.03 %) y las de pradera (19.19 %). LS posee también la mayor variabilidad en las superficies de cultivo (40.96 %) seguidas de las de pradera (33.57 %). En este caso las superficies con menor variabilidad son las sometidas a laboreo primario (25.48 %).

Las superficies de pradera aparecen como las más homogéneas. Su rango de valores es el menor en todos los índices (0.09 para T, 0.69 para LD, 0.38 para LS y 0.61 para RR), así como sus valores medios (1.04 para T, 0.21 para LD, 0.38 para LS y 0.16 para RR). También los coeficientes de variación menores se alcanzan

en este tipo de superficie (excepto en el caso de LS, donde éste presenta un valor mayor que las superficies de laboreo).

En cuanto a los índices, LD presenta un rango de valores mayor en todas las superficies (7.56 en superficies de laboreo primario, 4.04 en superficies de cultivo, y 0.69 en superficies de pradera). Además, sus valores medios son mayores que los del resto de los índices, así como sus coeficientes de variación (excepto en el caso de las superficies de pradera, donde LS posee un coeficiente de variación mayor). Esto lo convierte en el índice con mayor capacidad de discriminación entre distintos estados superficiales, y por tanto el más adecuado para la caracterización de la rugosidad.

TABLA 3. Coeficientes de correlación calculados entre los índices de rugosidad.

	T-LD	T-LS	T-RR	LD-LS	LD-RR	LS-RR
Cultivo	0.51	0.83	0.58	0.10	0.90	0.14
Pradera	0.47	0.90	-0.21	0.11	0.87	0.42
Laboreo	0.82	0.86	0.80	0.47	0.94	0.47

LS muestra un comportamiento diferente al del resto de los índices: el rango mayor de valores aparece en las superficies de cultivo (1.07). Además, muestra una elevada variabilidad en superficies de pradera en comparación con los otros índices (33.57 %), mientras que las superficies sometidas a laboreo primario aparecen como las más homogéneas (25.48 %). Esto pone en duda su idoneidad como caracterizador único de estados superficiales, al margen de su posible significado físico.

Los bajos valores de tortuosidad deben tomarse con precaución, ya que por definición, el valor más bajo que puede tener la tortuosidad es 1, mientras que los otros índices parten de valores mínimos de 0. Si consideramos el coeficiente de variación de la tortuosidad como la relación entre su desviación típica y la proporción en que el perfil real supera su proyección, entonces se produce un aumento de los coeficientes de variación. El valor mayor se obtiene en las superficies de cultivo (48.96 %), seguido de las superficies de pradera (48.40 %) y finalmente las superficies de laboreo son las de menor coeficiente de variación (40.71 %).

Los coeficientes de correlación calculados entre los diferentes índices y para los diferentes tipos de superficie pueden verse en la tabla 3. La mejor correlación la pre-

sentan RR y LD, ya que poseen coeficientes de correlación elevados en todos los tipos de superficie (0.90 en superficies cultivadas, 0.87 en superficies de pradera y 0.94 en superficies con laboreo primario). Esto concuerda con lo encontrado por otros autores (BERTUZZI et al, 1990), y es debido a que poseen una significación similar (LINDEN and VAN DOREN, 1986), ya que ambos caracterizan la rugosidad a largas distancias. La relación entre ambos es lineal (fig. 1).

La tortuosidad y la pendiente límite (fig. 5) poseen también una buena correlación en los tres estados (0.83 en superficies de cultivo, 0.90 en superficies de pradera y 0.86 en superficies con laboreo primario). Nuevamente esto es debido a que las características de ambos índices presentan similitudes (BERTUZZI et al, 1990).

Hay que señalar también las altas correlaciones que posee la tortuosidad con todos los otros índices en las superficies sometidas a laboreo primario. Esto puede deberse a que en estas superficies el aumento de la tortuosidad esté provocado por un aumento generalizado de la rugosidad tanto a pequeñas como a grandes distancias.

Finalmente, se han comparado los resultados de los índices con los obtenidos por otros autores (BERTUZZI et al, 1990)

que fueron calculados empleando un rugosímetro basado en la desfocalización de un haz de rayos láser al entrar en contacto con la superficie del suelo. Este tipo de rugosímetro permite realizar medidas con una resolución de 2mm, muy superior a la que se consigue con el asperímetro. Los valores de los índices RR y LD de estos autores suponen una pequeña porción del amplio rango de valores que se han obtenido en el presente trabajo. Sin embargo, los valores de LS y T poseen un rango mayor. Es probable que estos índices tengan una fuerte dependencia de la escala de medida. Sin embargo, superficies con rango total de altura tan elevado como son algunas de las que se han analizado exceden el rango en que las medidas realizadas con el rugosímetro láser son precisas. Sería necesario un estudio más profundo para encontrar una relación entre los índices calculados por los dos métodos.

CONCLUSIONES

Las superficies sometidas a laboreo primario muestran los mayores rangos de valores en los índices RR, T y LD, así como los mayores valores medios en todos los índices. Las superficies de pradera aparecen como las más homogéneas, con el rango y los valores medios menores en todos los índices.

LD aparece como el índice de mayor capacidad de discriminación entre distintos estados de la superficie del suelo, ya que posee los rangos, valores medios y coeficientes de variación más elevados.

Con los resultados obtenidos se puede señalar la existencia de dos tipos de índices. Por un lado están los índices RR y LD, que caracterizan la rugosidad a largas distancias y nos dan una idea de la magnitud de la rugosidad, y por otro se encuentran T y LS, que presentan similitudes funcionales. Dentro de cada grupo, la correlación existente entre los índices es elevada.

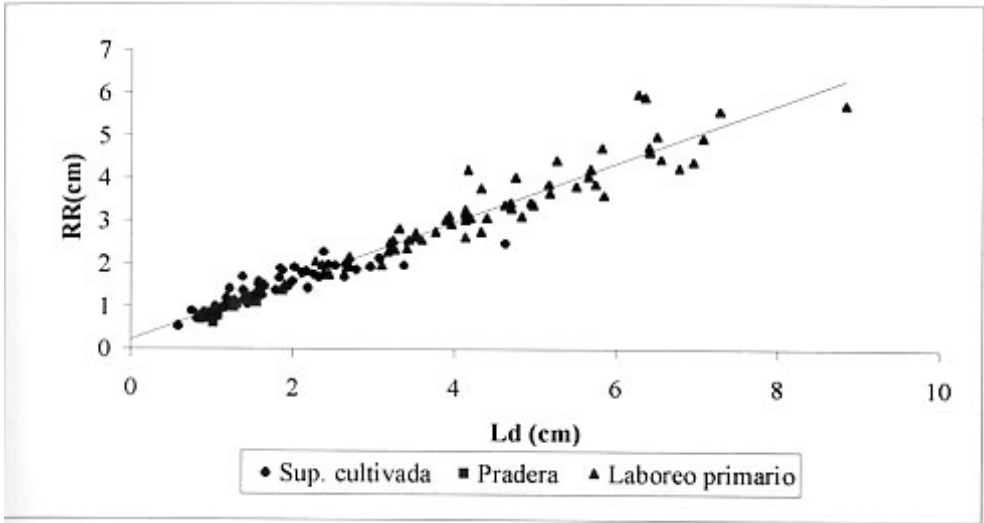


Fig. 1. Relación entre la rugosidad aleatoria y la distancia límite.

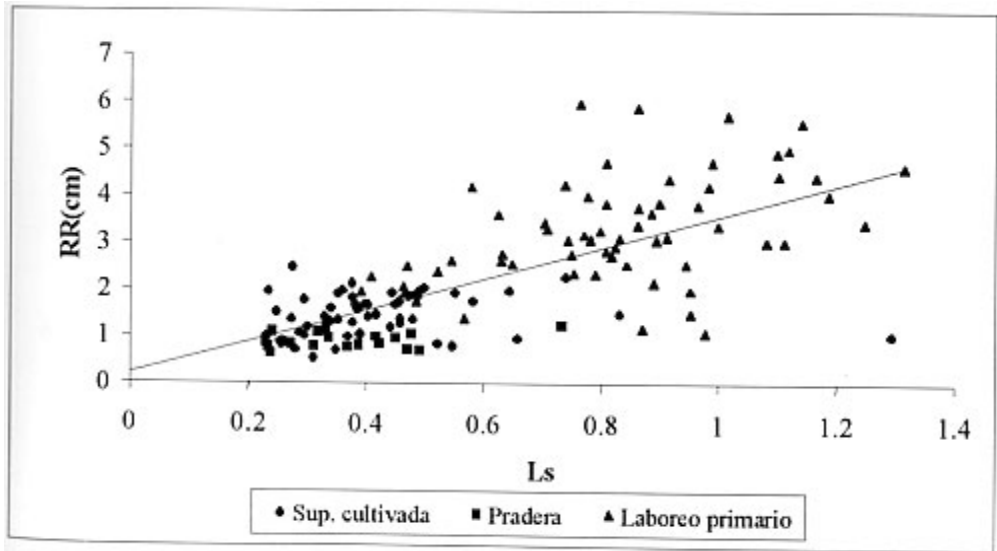


Fig. 2. Relación entre la rugosidad aleatoria y la pendiente límite.

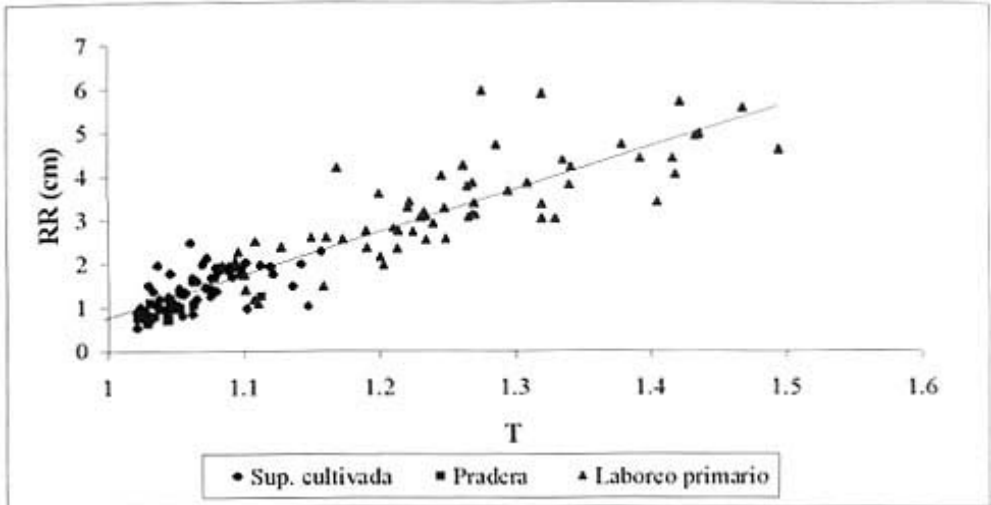


Fig. 3. Relación entre la rugosidad aleatoria y la tortuosidad.

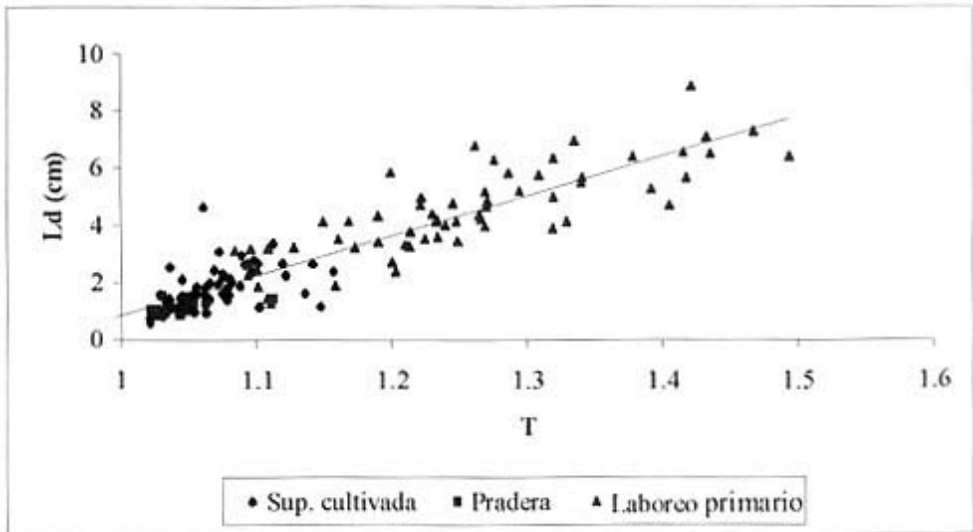


Fig. 4. Relación entre la distancia límite y la tortuosidad.

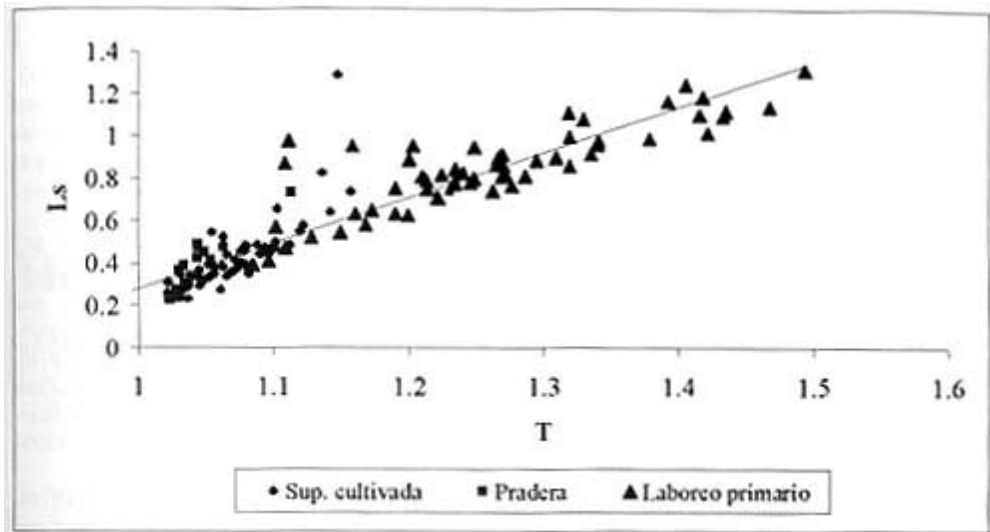


Fig. 5. Relación entre pendiente límite y tortuosidad.

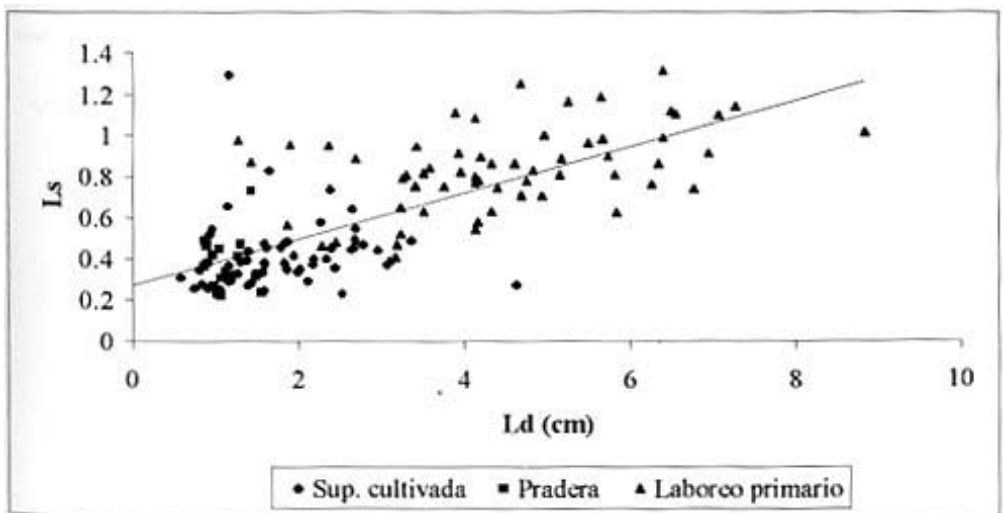


Fig. 6. Relación entre pendiente límite y distancia límite.

BIBLIOGRAFIA

- ALLMARAS, R. R., BRUWELL, R. E., LARSON, W. E., and HOLT, R. F., (1966). Total porosity and random roughness of the interrow zone as influenced by tillage. *USDA Conserv. Res. Rep.*, 7. 22 pp.
- BERTUZZI, P., RAUWS, G. and COURAULT, D., (1990). Testing roughness indices to estimate soil surface roughness changes due to simulated rainfall. *Soil and Tillage Research*, 17: 8 -99.
- BOIFFIN, J., (1984). *La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies*. Thèse docteur-ingénieur, Paris INA-PG. 320 pp + annexes.
- CURRENCE, H. D. and LOVELY, W. G., (1970). The analysis of soil surface roughness. *Trans. ASAE* 13: 710-714.
- DEXTER, A. R., (1977). Effect of rainfall on the surface micro-relief of tilled soil. *J. of Terramech.*, 1977, Vol. 14, No. 1, pp. 11-22.
- HELMING, K., JESCHKE, W., and STORL, J., (1992). Surface reconstruction and change detection for agricultural purposes by close range photogrammetry. *Int. Arch. of Phot. and Rem. Sens.* 29 (B5): 610-617.
- KUIPERS, H., (1957). A relief meter for soil cultivation studies. *Neth. J. Agric. Sci.*, 5: 255-262.
- LADO LIÑARES, M. Y TABOADA CASTRO, M^a M. (1998). Medida de la rugosidad del suelo en terrenos de cultivo. V *Reunión Nacional de Geomorfología*. A. Gómez Ortiz y F. Salvador Franch (editores). Barcelona, pp. 731-734.
- LINDEN, D. R. and Van DOREN Jr., D. M., (1986). Parameters for characterizing tillage-induced soil surface roughness. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50: 1550-1565.
- MITCHELL, J. K. and JONES Jr., B. A., (1976). Micro-relief surface depression storage: analysis of models to describe the depth-storage function. *AWRA Water Resources Bull.*, 12: 1205-222.
- MOORE, I. D., and LARSON C. L., (1979). Estimating micro-relief surface storage from point data. *Trans. ASAE* No. 10478. pp. 1073-1077.
- RÖMKENS, M. J. M. and WANG, J. Y., (1986). The effect of tillage on surface roughness. *Trans. ASAE* 29: 429-433.
- RÖMKENS, M. J. M. and WANG, J. Y., (1987). Soil roughness changes from rainfall. *Trans. ASAE* 30: 101-107.