

Relación entre índices de rugosidad: resultados de dos años de experiencias

Relations between roughness indices: results of two years of experiences

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

ABSTRACT:

Tillage-induced soil surface roughness is an important factor in preventing runoff generation and soil erosion, because of depressions storing water and the effect of surface shape protecting soil from splash and detachment. Microrelief characterization is made by means of roughness indices calculated from surface heights collected with pinmeters or with the more accurate optical rugosimeters.

When analyzing surface roughness, the selection of a measurable parameter describing roughness is critical. As a continuation of a previous work, 157 microrelief measurements have been made, under a wide range of tillage and soil surface evolution conditions. Study period was from April, 1998 to October, 1998. Four roughness indices were calculated after trend removal, including random roughness, limiting difference, limiting slope, and tortuosity.

Relation between roughness indices has been studied. Like in previous work, limiting difference and random roughness showed a strong correlation, due to their similar meaning. A good correlation was also found between tortuosity and limiting slope.

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

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

INTRODUCCIÓN

La rugosidad de la superficie del suelo ha cobrado importancia en los últimos tiempos en los estudios de erosión, ya que interviene en la generación de escorrentía almacenando el exceso de agua cuando el aporte debido a la precipitación es superior a la capacidad de infiltración del suelo.

La reducción de la escorrentía se atribuye generalmente a una reducción en la tendencia de sellado de las superficies más rugosas y con terrones más estables, y a la mayor superficie específica que reduce la energía cinética de la lluvia por unidad de superficie (LINDEN *et al.*, 1988; HELMING *et al.*, 1993). Además, el volumen de las depresiones puede retrasar la formación de escorrentía, almacenando el exceso de agua (HUANG y BRADFORD, 1990; ONSTAD, 1984). La reducción de las pérdidas de suelo al aumentar la rugosidad se atribuye al efecto protector del agua retenida en las microdepresiones frente al impacto de la gota de lluvia (HAIRSINE *et al.*, 1992), y a la retención de una gran proporción del material arrancado en los charcos entre terrones (COGO *et al.*, 1983).

Sin embargo, enfoques más recientes sugieren que si bien en superficies con un microrrelieve más desarrollado que otras se produce un retardo en la generación de escorrentía, estos efectos beneficiosos sólo se producen antes de la formación de flujo superficial, en los primeros estados de los episodios lluviosos. Una vez que se genera flujo, el microrrelieve actúa concentrándolo, lo que intensifica su velocidad y con ello la capacidad de desprendimiento y

transporte. Como consecuencia de esto se pueden incrementar las pérdidas de suelo en superficies rugosas respecto a otras con una rugosidad menor (HELMING *et al.*, 1998).

BURWELL *et al.* (1963) distinguen dos componentes de la rugosidad: Por un lado, parte de las diferencias de altura de la superficie son debidas a la pendiente de la parcela y a las marcas del laboreo, las cuales son orientadas, y cuya capacidad de almacenamiento de agua dependerá de su orientación con respecto a la pendiente de la parcela. Otra parte es independiente de la dirección considerada, conformando la denominada rugosidad aleatoria. Esta componente es la utilizada habitualmente en la caracterización del microrrelieve, para lo cual se elimina previamente el efecto de la pendiente y de las marcas debidas al paso de la maquinaria agrícola (BURWELL *et al.*, 1963; CURRENCE y LOVELY, 1970; RÖMKENS y WANG, 1986).

Para la caracterización de la rugosidad han sido propuestos diversos índices cuantitativos. Uno de los primeros, y a la vez uno de los más utilizados, es la rugosidad aleatoria (ALLMARAS *et al.*, 1966). Este índice se basa en el cálculo de la desviación estándar de los datos de altura. Su ventaja es su facilidad de cálculo y la posibilidad de aplicarlo a diseños de muestreo diversos. En su contra se encuentra el hecho de ser un índice estadístico que no considera la distribución espacial de los valores de altura, con lo que sus resultados no pueden ser considerados en términos físicos.

Otros autores propusieron índices con base física, como RÖMKENS y WANG

(1986) o LINDEN y VAN DOREN (1986). Estos últimos autores caracterizan la rugosidad empleando dos índices, uno que la explica a cortas distancias (la pendiente límite) y otro que lo hace a grandes distancias (la diferencia límite).

Otro índice ampliamente utilizado es la tortuosidad (BOIFFIN, 1984), definida como la relación entre la longitud real de un perfil y la longitud de su proyección horizontal.

El objetivo de este trabajo es el de caracterizar un amplio rango de superficies de cultivo, empleando para ello diversos índices de rugosidad. Además, se estudian las relaciones existentes entre ellos. Los primeros resultados han sido ya publicados en un trabajo previo (LADO LIÑARES *et al.*, 1998).

MATERIAL Y MÉTODOS

El presente trabajo comprende las medidas de rugosidad realizadas entre el 2 de abril y el 29 de octubre de 1998, que suponen la continuación del trabajo previo iniciado en 1997. En este período del estudio se realizaron 157 medidas, las cuales se localizaron en dos zonas diferentes:

-La parroquia de Liñares (Culleredo-A Coruña), en la que se utilizó para las experiencias una parcela de propiedad particular, destinada al cultivo de maíz forrajero. El período de estudio comprendió las labores preparatorias del suelo previas a la siembra, y el cultivo posterior de maíz.

-El Centro de Investigaciones Agrarias de Mabegondo (Abegondo-A Coruña), dependiente de la Xunta de Galicia, en la que se muestrearon un total de 11 parce-

las, las cuales se dedicaron a cultivos forrajeros, fundamentalmente maíz o pradera. En esta zona se realizaron la mayor parte de las experiencias, debido a la gran variedad de labores agrícolas que sobre las parcelas se realizaron. Esto nos permitió caracterizar la rugosidad del suelo sobre una amplia gama de condiciones tanto de laboreo como de estado de evolución de la superficie del suelo.

El dispositivo experimental empleado fue un asperímetro, el cual se ha descrito ya en anteriores trabajos (LADO LIÑARES y TABOADA CASTRO, 1998; LADO LIÑARES, 1999) y que permite realizar medidas puntuales de altura de la superficie del suelo a lo largo de un perfil. La separación entre puntos consecutivos de un perfil es de 2 cm. En cada medida se incluyeron sucesivos perfiles paralelos separados entre sí por 5 cm.

Los perfiles se registraron por medio de fotografías, para lo que se empleó una cámara digital. Posteriormente, cada fotografía se analizó con el Profile Meter Program elaborado por la USDA-ARS Wind Erosion Research Unit de la Kansas State University (WAGNER y YIMING, 1991; WAGNER, 1992) desarrollado para este fin, y con el que se obtienen los valores de altura de la superficie del suelo. A cada medida puntual se le dieron coordenadas, y se utilizaron los distintos perfiles de cada medida para elaborar una superficie.

Previamente al cálculo de los índices, es necesario eliminar de los datos originales la componente de altura debida a la topografía de la componente aleatoria, que es la empleada en la caracterización de la

rugosidad (RÖMKENS y WANG, 1986). Para ello se ajusta a los datos originales una superficie polinomial de orden 1 (lineales), de orden 2 (parabólicas) o de orden 3 (cúbicas). El ajuste se realiza uti-

lizando el método de mínimos cuadrados. Los residuos se obtienen como la diferencia entre la superficie original y ajustada. Las expresiones matemáticas de las superficies ajustadas son:

-Lineal

$$m(x) = a_0 + a_1x + a_2y \quad (1)$$

-Parabólica

$$m(x) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4y^2 + a_5xy \quad (2)$$

-Cúbica

$$m(x) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4y^2 + a_5xy + a_6x^3 + a_7y^3 + a_8x^2y + a_9xy^2 \quad (3)$$

Continuando con la caracterización iniciada en el período anterior (LADO LIÑARES *et al.*, 1998), con los residuos resultantes se han calculado cuatro índices de rugosidad. Éstos fueron: tortuosidad (BOIFFIN, 1984); pendiente límite y diferencia límite (LINDEN y VAN DOREN, 1986); y rugosidad aleatoria, según el criterio de CURRENCE y LOVELY (1970).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La tabla 1 muestra las principales características de las medidas realizadas. Del total, 97 se realizaron en superficies en las que se habían llevado a cabo labores preparatorias del suelo previas a la siembra, que consistieron en labores de arado o gradado. El resto de medidas, 60, se realizaron principalmente en superficies cultivadas. Dentro de estas superficies se incluyeron cultivos de maíz forrajero, pradera, y también superficies en las que se realizaron labores de recolección del cultivo. Las parcelas Ma-1, 2 y 3 fueron consideradas

como una sola, ya que les fue aplicado el mismo tratamiento.

Las medidas se repartieron de la siguiente forma:

- 27 en la parcela de Liñares.
- 130 en las 11 parcelas de Mabegondo.

El número de puntos de cada medida varió entre 1020 y 2016, dependiendo del número de perfiles y de puntos por perfil incluidos. El número de perfiles de cada medida fue de 28, excepto en aquellos casos en los que problemas técnicos con el registro fotográfico provocó la pérdida de datos, lo que se tradujo en un número de perfiles menor.

Para la separación de la rugosidad orientada de la aleatoria se emplearon en su mayor parte superficies cúbicas, que proporcionaron un mejor ajuste en 94 casos, seguidas de las lineales, que aparecen en 40 ocasiones, y de las parabólicas, que tan solo se presentaron en 23 casos como las más apropiadas para efectuar el filtrado de los datos originales.

La mayor parte de las medidas se realizaron de forma que la orientación de los perfiles fuera perpendicular a la dirección

del laboreo. Hay que exceptuar dos superficies en las que la diferencia máxima de altura excedía el rango de medida del aparato con esta orientación, por lo que los perfiles fueron medidos en dirección paralela al laboreo.

En la tabla 2 se muestran los resultados estadísticos de los índices.

Puede apreciarse que el valor máximo de todos los índices aparece en superficies de laboreo primario, excepto en el caso de LS, que alcanza su valor máximo en superficies de cultivo. A su vez, el valor mínimo de T, RR y LD se alcanza en superficies de cultivo, mientras que en LS lo alcanza en superficies de laboreo primario.

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
2016	Mabegondo	02/04/98	Ma-7	L. primario	Lineal	Perpendicular
2016	Mabegondo	02/04/98	Ma-7	L. primario	Lineal	Perpendicular
2016	Mabegondo	02/04/98	Ma-7	L. primario	Lineal	Perpendicular
2016	Mabegondo	02/04/98	Ma-7	L. primario	Parabólica	Perpendicular
2016	Mabegondo	15/04/98	Ma-7	L. primario	Lineal	Perpendicular
2016	Mabegondo	15/04/98	Ma-7	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1917	Mabegondo	15/04/98	Ma-7	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1988	Mabegondo	15/04/98	Ma-7	L. primario	Lineal	Perpendicular
1988	Liñares	17/04/98	Li-1	L. primario	Lineal	Perpendicular
1960	Liñares	17/04/98	Li-1	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1960	Liñares	17/04/98	Li-1	L. primario	Lineal	Perpendicular
1932	Liñares	21/04/98	Li-1	L. primario	Cúbica	Paralelo
1932	Liñares	21/04/98	Li-1	L. primario	Cúbica	Paralelo
1932	Liñares	21/04/98	Li-1	L. primario	Parabólica	Perpendicular
1932	Liñares	21/04/98	Li-1	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1932	Liñares	28/04/98	Li-1	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1932	Liñares	28/04/98	Li-1	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1932	Liñares	28/04/98	Li-1	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1863	Liñares	28/04/98	Li-1	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1932	Mabegondo	05/05/98	Ma-7	L. primario	Lineal	Perpendicular
1932	Mabegondo	06/05/98	Ma-7	L. primario	Lineal	Perpendicular
1932	Mabegondo	06/05/98	Ma-7	L. primario	Lineal	Perpendicular
1932	Mabegondo	06/05/98	Ma-7	L. primario	Parabólica	Perpendicular
1932	Mabegondo	06/05/98	Ma-7	L. primario	Lineal	Perpendicular
1932	Mabegondo	06/05/98	Ma-7	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1932	Mabegondo	07/05/98	Ma-7	L. primario	Lineal	Perpendicular
1932	Mabegondo	07/05/98	Ma-7	L. primario	Lineal	Perpendicular
1932	Mabegondo	07/05/98	Ma-9	L. primario	Lineal	Perpendicular
1932	Mabegondo	07/05/98	Ma-9	L. primario	Lineal	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
1932	Mabegondo	07/05/98	Ma-9	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1932	Mabegondo	07/05/98	Ma-9	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1932	Mabegondo	07/05/98	Ma-9	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1932	Mabegondo	11/05/98	Ma-29	L. primario	Lineal	Perpendicular
1932	Mabegondo	11/05/98	Ma-29	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1932	Liñares	11/05/98	Li-1	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1932	Liñares	11/05/98	Li-1	L. primario	Parabólica	Perpendicular
1932	Liñares	11/05/98	Li-1	L. primario	Parabólica	Perpendicular
1932	Liñares	11/05/98	Li-1	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1932	Liñares	11/05/98	Li-1	L. primario	Lineal	Perpendicular
1932	Liñares	12/05/98	Li-1	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1932	Liñares	12/05/98	Li-1	L. primario	Lineal	Perpendicular
1932	Liñares	15/05/98	Li-1	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1932	Liñares	15/05/98	Li-1	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1932	Liñares	15/05/98	Li-1	L. primario	Parabólica	Perpendicular
1932	Mabegondo	07/06/98	Ma-21	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1932	Mabegondo	07/06/98	Ma-21	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1932	Mabegondo	07/06/98	Ma-21	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1932	Mabegondo	07/06/98	Ma-21	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1173	Mabegondo	25/06/98	Ma-23	L. primario	Parabólica	Perpendicular
1904	Mabegondo	25/06/98	Ma-1, 2, 3	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1904	Mabegondo	25/06/98	Ma-1, 2, 3	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1904	Mabegondo	25/06/98	Ma-1, 2, 3	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1932	Mabegondo	07/07/98	Ma-22	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1932	Mabegondo	07/07/98	Ma-22	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1932	Mabegondo	07/07/98	Ma-22	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1863	Mabegondo	08/07/98	Ma-23	L. primario	Parabólica	Perpendicular
1932	Mabegondo	08/07/98	Ma-23	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1932	Mabegondo	08/07/98	Ma-23	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1932	Mabegondo	08/07/98	Ma-22	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1904	Mabegondo	08/07/98	Ma-22	L. primario	Lineal	Perpendicular
1904	Mabegondo	08/07/98	Ma-22	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1904	Mabegondo	08/07/98	Ma-22	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1904	Mabegondo	08/07/98	Ma-22	L. primario	Lineal	Perpendicular
1932	Mabegondo	14/07/98	Ma-1, 2, 3	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1932	Mabegondo	14/07/98	Ma-1, 2, 3	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1863	Mabegondo	15/07/98	Ma-1, 2, 3	L. primario	Parabólica	Perpendicular
1932	Mabegondo	15/07/98	Ma-1, 2, 3	L. primario	Lineal	Perpendicular
1932	Mabegondo	15/07/98	Ma-1, 2, 3	L. 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
1932	Mabegondo	15/07/98	Ma-1, 2, 3	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1932	Mabegondo	20/07/98	Ma-7	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1932	Mabegondo	20/07/98	Ma-7	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1932	Mabegondo	28/07/98	Ma-1, 2, 3	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1932	Mabegondo	28/07/98	Ma-1, 2, 3	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1932	Mabegondo	28/07/98	Ma-1, 2, 3	L. primario	Lineal	Perpendicular
1932	Mabegondo	28/07/98	Ma-22	L. primario	Parabólica	Perpendicular
1932	Mabegondo	28/07/98	Ma-22	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1932	Mabegondo	28/07/98	Ma-22	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1876	Mabegondo	29/07/98	Ma-22	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1876	Mabegondo	29/07/98	Ma-22	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1904	Mabegondo	08/09/98	Ma-1, 2, 3	L. primario	Parabólica	Perpendicular
1904	Mabegondo	08/09/98	Ma-1, 2, 3	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1904	Mabegondo	08/09/98	Ma-1, 2, 3	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1904	Mabegondo	08/09/98	Ma-1, 2, 3	L. primario	Lineal	Perpendicular
1904	Mabegondo	24/09/98	Ma-23	L. primario	Lineal	Perpendicular
1904	Mabegondo	24/09/98	Ma-23	L. primario	Lineal	Perpendicular
1904	Mabegondo	24/09/98	Ma-23	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1904	Mabegondo	01/10/98	Ma-23	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1904	Mabegondo	01/10/98	Ma-23	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1904	Mabegondo	01/10/98	Ma-23	L. primario	Parabólica	Perpendicular
1904	Mabegondo	01/10/98	Ma-22	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1904	Mabegondo	05/10/98	Ma-1, 2, 3	L. primario	Parabólica	Perpendicular
1904	Mabegondo	05/10/98	Ma-1, 2, 3	L. primario	Parabólica	Perpendicular
1904	Mabegondo	05/10/98	Ma-1, 2, 3	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1904	Mabegondo	05/10/98	Ma-1, 2, 3	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1904	Mabegondo	16/10/98	Ma-7	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1904	Mabegondo	16/10/98	Ma-7	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1904	Mabegondo	19/10/98	Ma-22	L. primario	Cúbica	Perpendicular
1863	Liñares	20/05/98	Li-1	Sup. cultivada	Lineal	Perpendicular
1932	Liñares	20/05/98	Li-1	Sup. cultivada	Cúbica	Perpendicular
1863	Mabegondo	26/05/98	Ma-22	Sup. cultivada	Parabólica	Perpendicular
1932	Mabegondo	26/05/98	Ma-22	Sup. cultivada	Cúbica	Perpendicular
1587	Mabegondo	26/05/98	Ma-22	Sup. cultivada	Cúbica	Perpendicular
1932	Mabegondo	26/05/98	Ma-22	Sup. cultivada	Cúbica	Perpendicular
1932	Mabegondo	26/05/98	Ma-22	Sup. cultivada	Parabólica	Perpendicular
1932	Mabegondo	26/05/98	Ma-22	Sup. cultivada	Cúbica	Perpendicular
1932	Mabegondo	27/05/98	Ma-22	Sup. cultivada	Cúbica	Perpendicular
1932	Mabegondo	27/05/98	Ma-32	Sup. cultivada	Cúbica	Perpendicular
1932	Mabegondo	27/05/98	Ma-32	Sup. cultivada	Lineal	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
1932	Mabegondo	27/05/98	Ma-32	Sup. cultivada	Cúbica	Perpendicular
1932	Mabegondo	27/05/98	Ma-32	Sup. cultivada	Cúbica	Perpendicular
1932	Mabegondo	25/06/98	Ma-21	Sup. cultivada	Lineal	Perpendicular
1449	Liñares	26/06/98	Li-1	Sup. cultivada	Lineal	Perpendicular
1932	Liñares	26/06/98	Li-1	Sup. cultivada	Cúbica	Perpendicular
1932	Mabegondo	30/06/98	Ma-21	Sup. cultivada	Parabólica	Perpendicular
1932	Mabegondo	30/06/98	Ma-21	Sup. cultivada	Lineal	Perpendicular
1932	Mabegondo	09/07/98	Ma-14	Sup. cultivada	Lineal	Perpendicular
1932	Mabegondo	09/07/98	Ma-14	Sup. cultivada	Lineal	Perpendicular
1932	Liñares	10/07/98	Li-1	Sup. cultivada	Lineal	Perpendicular
1932	Liñares	10/07/98	Li-1	Sup. cultivada	Cúbica	Perpendicular
1932	Mabegondo	13/07/98	Ma-	Sup. cultivada	Lineal	Perpendicular
1932	Mabegondo	13/07/98	Ma-21	Sup. cultivada	Cúbica	Perpendicular
1932	Mabegondo	13/07/98	Ma-21	Sup. cultivada	Parabólica	Perpendicular
1932	Mabegondo	13/07/98	Ma-21	Sup. cultivada	Cúbica	Perpendicular
1932	Mabegondo	14/07/98	Ma-17	Sup. cultivada	Parabólica	Perpendicular
1932	Mabegondo	14/07/98	Ma-17	Sup. cultivada	Cúbica	Perpendicular
1848	Mabegondo	14/07/98	Ma-17	Sup. cultivada	Lineal	Perpendicular
1932	Mabegondo	20/07/98	Ma-21	Sup. cultivada	Cúbica	Perpendicular
1932	Mabegondo	20/07/98	Ma-21	Sup. cultivada	Parabólica	Perpendicular
1932	Mabegondo	20/07/98	Ma-21	Sup. cultivada	Cúbica	Perpendicular
1380	Mabegondo	20/07/98	Ma-21	Sup. cultivada	Cúbica	Perpendicular
1932	Mabegondo	29/07/98	Ma-29	Sup. cultivada	Cúbica	Perpendicular
1932	Mabegondo	29/07/98	Ma-29	Sup. cultivada	Cúbica	Perpendicular
1932	Mabegondo	29/07/98	Ma-29	Sup. cultivada	Cúbica	Perpendicular
1932	Mabegondo	29/07/98	Ma-29	Sup. cultivada	Cúbica	Perpendicular
1632	Mabegondo	09/09/98	Ma-21	Sup. cultivada	Lineal	Perpendicular
1904	Mabegondo	09/09/98	Ma-21	Sup. cultivada	Lineal	Perpendicular
1020	Mabegondo	09/09/98	Ma-21	Sup. cultivada	Lineal	Perpendicular
1904	Mabegondo	09/09/98	Ma-14	Sup. cultivada	Cúbica	Perpendicular
1904	Mabegondo	09/09/98	Ma-14	Sup. cultivada	Cúbica	Perpendicular
1904	Mabegondo	09/09/98	Ma-14	Sup. cultivada	Cúbica	Perpendicular
1904	Mabegondo	09/09/98	Ma-14	Sup. cultivada	Lineal	Perpendicular
1904	Mabegondo	24/09/98	Ma-22	Sup. cultivada	Cúbica	Perpendicular
1904	Mabegondo	24/09/98	Ma-22	Sup. cultivada	Lineal	Perpendicular
1904	Mabegondo	24/09/98	Ma-22	Sup. cultivada	Cúbica	Perpendicular
1904	Mabegondo	24/09/98	Ma-22	Sup. cultivada	Parabólica	Perpendicular
1904	Mabegondo	01/10/98	Ma-22	Sup. cultivada	Cúbica	Perpendicular
1904	Mabegondo	01/10/98	Ma-22	Sup. cultivada	Cúbica	Perpendicular
1904	Mabegondo	01/10/98	Ma-22	Sup. cultivada	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
1904	Mabegondo	16/10/98	Ma-8	Sup. cultivada	Cúbica	Perpendicular
1904	Mabegondo	16/10/98	Ma-8	Sup. cultivada	Parabólica	Perpendicular
1904	Mabegondo	19/10/98	Ma-22	Sup. cultivada	Cúbica	Perpendicular
1904	Mabegondo	19/10/98	Ma-22	Sup. cultivada	Cúbica	Perpendicular
1904	Mabegondo	19/10/98	Ma-22	Sup. cultivada	Cúbica	Perpendicular
1904	Mabegondo	29/10/98	Ma-21	Sup. cultivada	Cúbica	Perpendicular
1904	Mabegondo	29/10/98	Ma-21	Sup. cultivada	Cúbica	Perpendicular
1904	Mabegondo	29/10/98	Ma-21	Sup. cultivada	Cúbica	Perpendicular
1904	Mabegondo	29/10/98	Ma-21	Sup. cultivada	Parabólica	Perpendicular

		Max	Min	Rango	Media	STD	CV (%)
T	Cultivo	1.30	1.03	0.28	1.11	0.06	5.30
	Laboreo primario	1.42	1.08	0.34	1.19	0.06	5.17
LD (mm)	Cultivo	45.51	7.23	38.28	23.62	10.34	43.78
	Laboreo primario	107.86	12.09	95.77	34.69	14.75	42.50
LS	Cultivo	1.16	0.27	0.89	0.54	0.14	26.43
	Laboreo primario	1.03	0.51	0.53	0.72	0.12	16.61
RR (mm)	Cultivo	36.83	5.97	30.86	18.69	7.89	42.20
	Laboreo primario	55.97	11.25	44.72	25.62	8.72	34.04

TABLA 2: Resultados estadísticos de los distintos índices.

	T-LD	T-LS	T-RR	LD-LS	LD-RR	LS-RR
Cultivo	0.84	0.91	0.89	0.58	0.95	0.66
Laboreo	0.81	0.67	0.85	0.22	0.96	0.25

TABLA 3: Coeficientes de correlación entre los índices.

Comparando los índices, LD es el que posee un rango de valores mayor, tanto en superficies de laboreo primario (95.77 mm) como en superficies cultivadas (38.28 mm). A continuación aparece RR, seguido de LS y T, que posee el menor rango de variación de los cuatro. Tanto en LD como en RR y T, el rango mayor apa-

rece en superficies de laboreo primario, mientras que en LS el rango mayor se presenta en superficies cultivadas (0.89 frente a 0.53). Esta misma situación se encontró en las superficies del período anterior (LADO LIÑARES *et al.*, 1998).

Los valores medios son mayores en las superficies de laboreo primario, situación que

se produce en todos los índices. Nuevamente, LD es el índice que presenta valores medios mayores (34.69 mm en laboreo primario y 23.62 mm en superficies de cultivo), seguido de RR, T y LS por este orden.

Del análisis de los coeficientes de variación se desprende que todos los índices presentan una mayor variabilidad en superficies cultivadas. La mayor variabilidad la presenta nuevamente LD, seguido de RR, LS y T (43.78, 42.20, 26.43 y 5.30 %, respectivamente). En superficies de laboreo primario, el orden decreciente de variabilidad es el mismo (42.50% para LD, 34.04% para RR, 16.61% para LS y 5.17% para T).

Como se señaló en el trabajo anterior, el hecho de que el valor mínimo de T sea 1, y el de su desviación típica sea 0, produce la infravaloración del coeficiente de variación. Si se considera T como la proporción en que la longitud real de perfil supera a su proyección, este índice se convierte en el más variable en superficies de cultivo (51.93 %), mientras que en superficies de laboreo primario ocuparía la tercera posición (32.81 %) tras LD y RR.

Se han calculado los coeficientes de correlación entre los índices, los cuales se presentan en la tabla 3. La mayor correlación la muestran LD y RR (0.95 en superficies de cultivo y 0.96 en superficies de laboreo primario), lo que coincide con lo encontrado en el trabajo previo (LADO LIÑARES *et al.*, 1998) y en la bibliografía (BERTUZZI *et al.*, 1990) y que se debe a la significación similar de ambos índices.

La tortuosidad y la pendiente límite presentan una buena correlación en superficies de cultivo (0.91) mientras que des-

ciende en superficies de laboreo primario (0.67). T presenta también correlaciones altas con LD (0.84 en cultivos, y 0.81 en laboreo primario), y RR (0.89 en cultivo, y 0.85 en laboreo primario). Esto contrasta con lo encontrado para el período anterior, donde la correlación entre estos índices tan solo era elevada en superficies de laboreo primario. Otros autores (BERTUZZI *et al.*, 1990) no encuentran correlaciones tan altas entre estos índices. Por otro lado, LS posee correlaciones bajas tanto con LD como con RR.

En las figuras 1 a 6 se muestra la relación existente entre los diferentes índices de rugosidad. Se han incluido en ellas los valores correspondientes al total de 294 medidas realizadas tanto en el presente trabajo como en el período anterior.

Nuevamente, se puede distinguir por un lado, la estrecha relación entre RR y LD (fig. 1), como muestra su elevado coeficiente de determinación (0.94), aunque a medida que los valores son mayores aumenta también la dispersión. Por otro lado, T también presenta una buena relación con RR y LD (fig. 2 y 3) y LS (fig. 4). La peor relación se obtiene entre LS, y LD y RR (fig. 5 y 6), como indican sus bajos coeficientes de determinación.

CONCLUSIONES

Las superficies de laboreo primario se presentan como las más rugosas, con los mayores valores máximos y rangos en LD, RR y T, así como los mayores valores medios en todos los índices. Sin embargo, las superficies cultivadas aparecen como las de mayor variabilidad.

Los resultados obtenidos con este nuevo conjunto de datos siguen la tendencia que se indicaba en el período anterior. Los índices más relacionados entre sí son LD y RR, que presentan una elevada correlación en todas las superficies. Estos resultados están de acuerdo con las ten-

dencias encontradas en el trabajo anterior (LADO LIÑARES *et al.*, 1998) y con lo encontrado por otros autores (BERTUZZI *et al.*, 1990), y está derivado de sus similares características. Ambos caracterizan las diferencias de altura a distancias grandes.

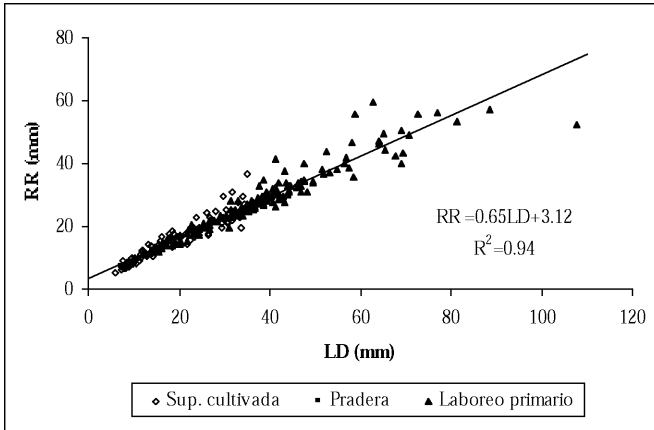


Fig. 1. Relación entre la rugosidad aleatoria y la diferencia límite.

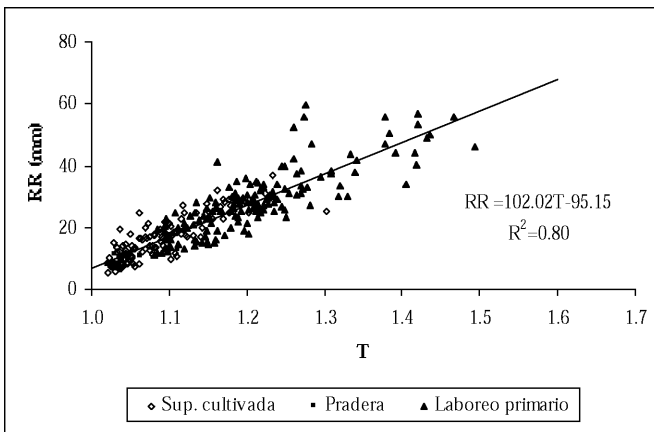


Fig. 2. Relación entre la tortuosidad y la rugosidad aleatoria.

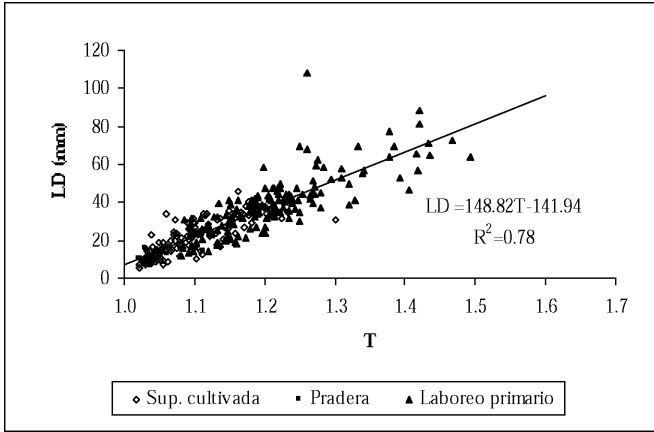
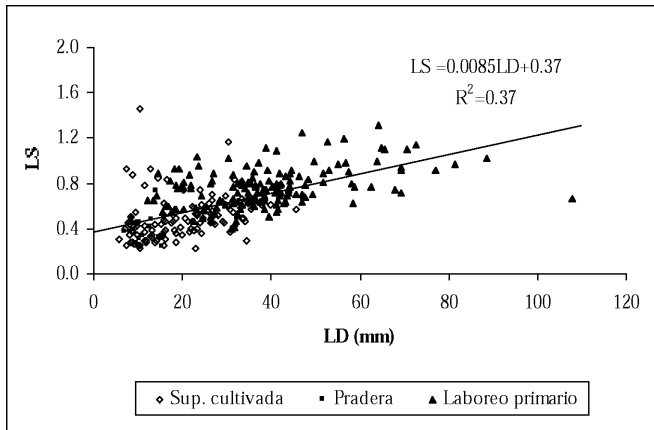
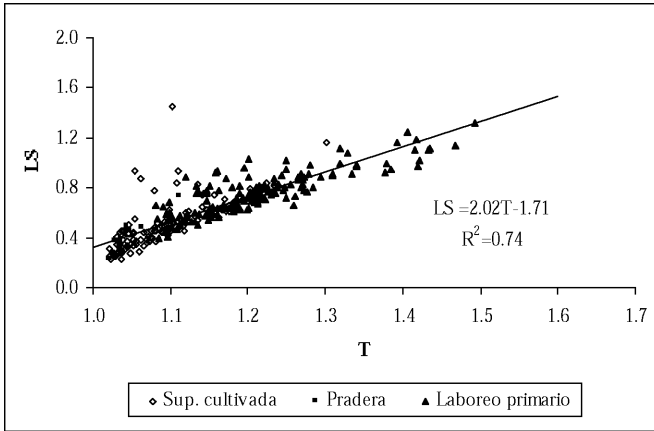


Fig. 3. Relación entre la tortuosidad y la diferencia límite.



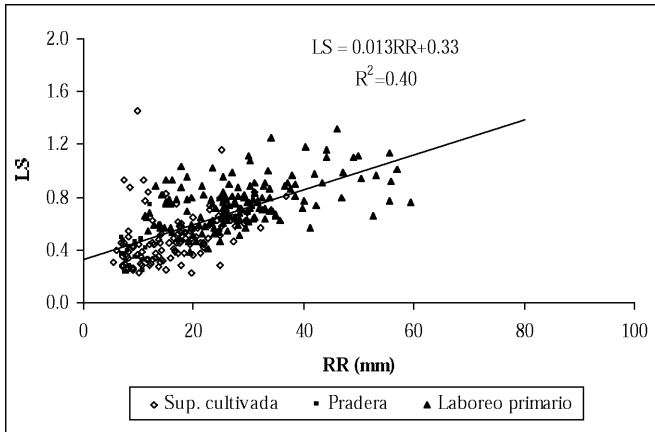


Fig. 6. Relación entre la rugosidad aleatoria y la pendiente límite.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el proyecto FAIR 1/CT95/0458

BIBLIOGRAFÍA

- ALLMARAS, R. R., BURWELL, R. E., LARSON, W. E., y HOLT, R. F., (1966). Total porosity and random roughness of the interrow zone as influenced by tillage. *USDA Conservation Research Report*, 7. 22 pp.
- BERTUZZI, P., RAUWS, G. y COURAU, D., (1990). Testing roughness indices to estimate soil surface roughness changes due to simulated rainfall. *Soil and Tillage Research*, 17: 89 - 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.
- BURWELL, R. E., ALLMARAS, R. R. and AMEMIYA, M., (1963). A field measurement of total porosity and surface microrelief of soils. *Soil Science Society of America Proceedings*, 27: 697 - 700.
- COGO, N. P., MOLDENHAUER, W. C. and FOSTER, G. R., (1983). Effect of crop residue, tillage-induced roughness and runoff velocity on size distribution of eroded soil aggregates. *Soil Science Society of America Journal*, 47: 1005 - 1008.
- CURRENCE, H. D. and LOVELY, W. G., (1970). The analysis of soil surface roughness. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineering*, 13: 710 - 714.
- HAIRSINE, P. B., MORAN, C. J., and ROSE, C. W., (1992). Recent developments regarding the influence of soil surface characteristics on overland flow and erosion. *Australian Journal of Soil Research*, 30: 249 - 264.
- HELMING, K., RÖMKENS, M. J. M., and PRASAD, S.N., (1998). Surface Roughness Related Processes of Runoff and Soil Loss: A Flume Study. *Soil Science Society of America Journal*, 62: 243 - 250.
- HELMING, K., ROTH, C. H., WOLF, R. and DIESTEL, H., (1993). Characterization of rainfall-microrelief interactions with runoff using parameters derived from digital elevation models (DEMs). *Soil Technology*, 6: 273 - 286.
- HUANG, C. y BRADFORD, J. M., (1990). Depressional storage for Markov-Gaussian surfaces. *Water Resources Research*, 26: 2235 - 2242.
- LADO LIÑARES, M., (1999). Influencia del procedimiento empleado para separar el efecto de la topografía en perfiles de microrrelieve sobre el cálculo de los índices de rugosidad. *Avances sobre el estudio de la erosión hídrica*. A. Paz González y M. T. Taboada Castro (editores). A Coruña, pp. 149 - 163.
- 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.
- LADO LIÑARES, M., TABOADA CASTRO, M^a M., y DIÉGUEZ VILLAR, A. (1998). Relación entre índices de rugosidad: tortuosidad, pendiente límite, distancia límite y rugosidad aleatoria. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 23: 151 - 164.
- LINDEN, D. R. and Van DOREN Jr., D. M., (1986). Parameters for character-

- zing tillage-induced soil surface roughness. *Soil Science Society of America Journal*, 50: 1550 - 1565.
- LINDEN, D. R., VAN DOREN, D. M. and ALLMARAS, R. R., (1988). A model of the effect of tillage induced soil surface roughness on erosion. International Soil Tillage Research Organization, Proceedings of the 11th International Conference Vol. 1: 373 – 378.
- 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. y WANG, J. Y., (1986). Effect of tillage on surface roughness. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineering*, 29: 429 – 433.
- WAGNER, L. E., (1992). *Profile meter program. Documentation*. United States Department of Agriculture. Agricultural Research Service. Wind Erosion Research Unit. 27 pp.
- WAGNER, L. E. and YIMING YU, (1991). Digitization of profile meter photographs. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineering*, 34 (2): 412 – 416.