

ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS DE MEDIDA DEL MICRORRELIEVE DEL SUELO

Taboada Castro, M^a Teresa (1) y Kamphorst, Eva (2)

(1) Facultad de Ciencias. Universidad de A Coruña. A Zapateira. 15071. A Coruña

(2) INRA. Unité d'Agronomie de Laon. Rue Fernand Christ. 02007 Laon. Francia

SUMMARY

A comparative study of soil microrelief measurement methods

Different soil microrelief measurement devices are described. Pinmeters are used to take punctual height measurements along a transect requiring mechanical contact between soil and pines, which can disturb the microrelief. This is avoided by using infrared or laser scanners, which also display high resolution. The infrared scanner measures transects by emission successive infrared pulses whose intensity is registered with the help of a phototransistor. However using this device measuring time is long. Laser profile meters project a laser beam normally onto the soil surface. The height of the surface points is estimated in some laser devices by means of the reception of the reflected beam in a defocalization system, by measuring its light intensity while in other ones it is done by measuring the curvature of the reflected light wave front. In the method most classical the reflect ray of light comes back to the selector with a certain inclination when the soil surface is very rough, causing the lack of measurements of the lowest parts of the microrelief, however in another ones it comes back vertically, avoiding this problem.

Key words: Soil microrelief, pinmeter, infrared scanner, laser profile meters.

RESUMEN

Se describen diferentes instrumentos de medida del microrrelieve del suelo. Los asperímetros (barra con agujas) realizan medidas puntuales de altura a lo largo de un transecto, requiriendo un contacto mecánico con el suelo, lo que puede deformar el microrrelieve. Esto se evita con rugosímetros de infrarrojos y láser, que además presentan mayor resolución. Los sensores de infrarrojos miden transectos por telemetría, emitiendo sucesivos impulsos cuya intensidad se registra con un fototransistor; su principal inconveniente es que el tiempo de medida es largo. Los láser emiten un haz de rayos láser perpendicular a la superficie del suelo. La mayor o menor altura de los puntos de la superficie se estima, en unos prototipos, mediante la recepción en un sistema de desfocalización del haz reflejado midiendo su intensidad luminosa, mientras que en otros se hace midiendo la curvatura del frente de onda de la luz reflejada. En los modelos más clásicos el rayo de luz reflejada retorna al detector con una cierta inclinación, ocasionando la imposibilidad de efectuar medidas en las partes más bajas del microrrelieve cuando la superficie del suelo es muy rugosa, sin embargo en otros retorna verticalmente, evitando este problema.

Palabras clave: Microrrelieve del suelo, asperímetros, rugosímetros de infrarrojos, rugosímetros láser.

INTRODUCCIÓN

El microrrelieve de la superficie del suelo ha sido relacionado con frecuencia con la erosión hídrica, ya que el agua acumulada en las depresiones superficiales favorece la infiltración y disminuye la escorrentía (DEXTER, 1977; HELMING *et al.*, 1993). Como consecuencia del desprendimiento de partículas sólidas de la superficie del suelo que son transportadas por el agua y depositadas a distancias mas o menos grandes del origen, el microrrelieve del suelo evoluciona dependiendo de la precipitación acumulada.

Actualmente la erosión hídrica de los suelos es un tema de preocupación creciente en todas las zonas del norte de Europa, especialmente en las regiones de grandes cultivos, aún cuando las pendientes son débiles y las lluvias de baja intensidad. En Galicia se manifiesta este problema especialmente en los suelos de textura limosa y uso agrícola (DAFONTE *et al.*, 1997; DIÉGUEZ y LADO, 1997; PAZ y VALCÁRCEL, 1998; CACHEIRO *et al.*, 1998).

El modo más frecuentemente utilizado para evaluar cuantitativamente el microrrelieve del suelo es la rugosidad superficial. Pero a pesar de su importancia, la rugosidad del suelo continúa siendo una característica todavía no definida exactamente en términos físicos. Los métodos actuales de evaluación de la rugosidad del suelo se basan en general en la obtención de índices, tales como los propuestos por ALLMARAS *et al.* (1966), BOIFFIN (1984), LINDEN and VAN DOREN (1986), LEHRSCHE *et al.* (1988), etc.

En los suelos agrícolas la rugosidad se modifica sobre todo por la acción de la lluvia y del laboreo (ONSTAD, 1984; BOIFFIN *et al.* 1988; BOIFFIN et MONNIER, 1991; PAZ y TABOADA, 1996). En general, la precipitación hace disminuir la rugosidad, mientras que el laboreo puede incrementarla o disminuirla, según sea el tipo y número de operaciones realizadas, así como la rugosidad en el momento de trabajar el suelo. La formación de la rugosidad depende del tipo de suelo, contenido hídrico, agregación, etc.

Se diferencian dos tipos de rugosidad: la aleatoria que representa la variación de las elevaciones de la superficie del suelo formadas al azar, y la orientada o de forma, causada sobre todo por las huellas de la maquinaria agrícola y la pendiente (BURWELL *et al.* 1963).

El microrrelieve es una característica que además de estar asociada con la erosión hídrica lo está con muchas otras propiedades o procesos del suelo tales como distribución del tamaño de los agregados (COLVIN *et al.*, 1984; FREDE and GÄTH, 1995), radiación solar, evaporación, balance de energía (CRUSE *et al.*, 1980), etc.

Desde el punto de vista de la escorrentía y la erosión, la rugosidad puede provocar dos resultados de sentido opuesto:

1) Un resultado favorable que reduce la generación de escorrentía.

- a) En general, los suelos rugosos son mas porosos que los suelos lisos, por lo que favorecen una mayor tasa de infiltración del agua y con ello reducen la escorrentía y las perdidas de suelo.
- b) Por otra parte, cuando el suelo no infiltra más, la rugosidad influye en la detención superficial, es decir, en la capacidad de almacenamiento de agua en exceso en las microdepresiones de la superficie del suelo. Cuanto más elevada sea esta capacidad más retardado y reducido será el flujo.
- c) También se relaciona la rugosidad con la formación de costra superficial, en el sentido de que, en los suelos rugosos el encostramiento suele producirse en las depresiones, mientras que, en los lisos suele darse por toda la superficie del suelo, generando estos últimos más escorrentía (menor infiltración) y un mayor desprendimiento y transporte de partículas (ALLMARAS *et al.*, 1966, JOHNSON *et al.*, 1979, LARSON, 1962).

En superficies con rugosidad suficientemente desarrollada, suele formarse costra sedimentaria en las depresiones y costra estructural en las partes mas altas del terreno, esto supone según FOX *et al.* (1998) el almacenamiento de agua en las depresiones hasta que el agua sobrepase la zona de costra sedimentaria y alcance la estructural, momento en el que se produce infiltración.

- d) Por otro lado, la rugosidad aumenta el coeficiente de fricción de la superficie, lo que disminuye la velocidad del flujo.

2) Un resultado desfavorable ligado a la rugosidad orientada y al laboreo del suelo.

- a) La rugosidad orientada favorece la concentración del flujo y el aumento de su velocidad. Es decir, cuando existe rugosidad orientada el agua se concentra en una porción reducida de la superficie (por ejemplo en las rodadas) con lo que se incrementa el radio hidráulico del flujo superficial intensificando su velocidad y con ello la capacidad de desprendimiento y transporte. Este tipo de rugosidad puede provocar incluso una mayor perdida de suelo frente a superficies con menor rugosidad (ABRAHAMS *et al.*, 1992; HELMING *et al.*, 1998).

- b) La rugosidad derivada de un laboreo reciente puede aumentar la susceptibilidad del suelo a la erosión debido a la disminución de la cohesión entre las partículas del mismo, lo que está influenciado por la textura, estado estructural y contenido hídrico (POESEN and GOVERS, 1990).

La rugosidad de la superficie del suelo es visualmente bien perceptible pero difícil de cuantificar. La necesidad de evaluar los cambios producidos en el microrrelieve y la incorporación de datos en modelos como pueden ser los hidrológicos o los de erosión hídrica (ULLAH and DICKINSON, 1979; MOORE and LARSON, 1979; ONSTAD, 1984; HUANG and BRADFORD, 1990 a; PAZ y TABOADA, 1996) o realizar una modelización de los fenómenos de estallido de los agregados (BOIFFIN, 1984) etc. han llevado al desarrollo, cada vez mas sofisticado y preciso, de instrumentos de medida del microrrelieve del suelo.

En este trabajo se efectúa una revisión de las características de los distintos aparatos usados para determinar el microrrelieve del suelo, que comprende desde los más antiguos (asperímetros) hasta los más modernos (láser).

INSTRUMENTOS DE MEDIDA DEL MICRORRELIEVE

Asperímetros

El instrumento utilizado para medir el microrrelieve del suelo es el rugosímetro. Una revisión de los tipos de rugosímetros fue llevada a cabo por autores tales como PODMORE and HUGGINS (1981), HIRSCHI *et al.* (1984) y ZOBECK and ONSTAD (1987).

Los aparatos más clásicos de medida del microrrelieve derivan del asperímetro de KUIPERS (1957). Se trata de un instrumento de medida manual que consta de 20 agujas separadas entre sí 10 cm y montadas sobre una barra, lo que permite realizar medidas puntuales de altura a lo largo de un transecto. Después de éste se desarrollaron numerosos tipos de asperímetros, que se diferencian de él y entre sí por el número de agujas que entran en contacto con el suelo, el intervalo de medida y resolución vertical. En la tabla 1 se presenta un resumen de las principales características de los asperímetros y en la figura 1 un dibujo del utilizado por LADO y TABOADA (1998).

A los asperímetros de agujas le siguen otros tipos que disponen únicamente de una especie de sonda para realizar la medida. En algunos de ellos las medidas de altura se

hacen manualmente mediante la toma de fotografías (BURWELL et al., 1963; SCHAFER and LOVELY, 1967) y en otros de modo automático (CURRENCE and LOVELY, 1970, PODMORE and HUGGINS, 1981; SHAKESBY, 1993; WHALLEY and REA, 1994) lo que permite una mayor rapidez en la adquisición y tratamiento de los datos.

Autor y año de publicación	Número de agujas	Rango vertical (mm)	Resolución (mm)
Kuipers (1957)	20	270	<5
Burwell et al. (1963)	20	400	2,5
Kincaid and Williams (1966)	11	500	15
Schafer and Lovely (1967)	1	460	1,3
Heermann et al. (1969)	1	-	0, 1
Currence and Lovely (1971)	1	>300	1,3
Curtis and Cole (1972)	40	900	15
Mitchell and Jones (1973)	1	>300	1,3
Monteith (1974)	40	300	10
McCool et al. (1976)	145	410	1
Dexter (1977)	1	-	1
Simanton et al. (1978)	100	-	-
Moore and Larson (1979)	18	400	1,25
Henry et al. (1980)	1	350	<5
Radke et al. (1981)	312	250	1
Podmore and Huggins (1981)	1	33	0,005
Van Ouwerkerk et al. (1981)	10	200	1
Hirschi et al. (1984)	72	450	1
Planchon et al. (1998)	1	-	1
Lado y Taboada (1998)	76	410	1

Tabla 1. Características de diversos asperímetros para medida del microrrelieve del suelo.

Algunos de los modelos electrónicos más avanzados permiten hacer medidas automáticamente en dos direcciones. Poseen un sistema de desplazamiento en la dirección del eje x y en la del eje y, de tal manera que evitan el movimiento manual del aparato, facilitando la adquisición de perfiles de altura paralelos (CURRENCE and LOVELY, 1970; WHALLEY and REA, 1994; PLANCHON *et al.*, 1998). Otra mejora de estos

frente a los primeros asperímetros es la mayor precisión y la reducción del intervalo de medida. Así, por ejemplo, el descrito por PLANCHON et al. (1998) permite hacer medidas automáticas de una superficie comprendida entre 1 y 40 metros cuadrados con tres intervalos de medida diferentes (1 cm, 2.5 cm y 5 cm) y una resolución de 1 mm, con una desviación estandar de 0,8 mm.

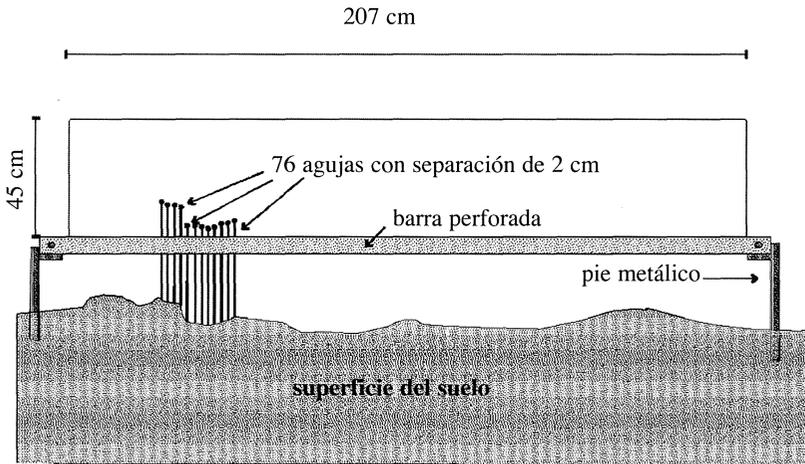


Figura 1. Esquema del asperímetro de agujas descrito por Lado y Taboada (1998).

El principal inconveniente de todos estos instrumentos es que su funcionamiento requiere un contacto mecánico entre el sistema de medida (agujas o sonda) y el suelo, lo que origina una destrucción del microrrelieve, impidiendo la repetición de las medidas sobre el mismo punto. Esto es especialmente problemático en los suelos arcillosos en estado húmedo y en los suelos de textura arenosa cuando están secos.

Rugosímetros de infrarrojos

Para evitar la deformación de la superficie del suelo se desarrollaron diferentes dispositivos que permiten hacer las medidas de altura sin contacto entre el aparato y la superficie del suelo. Algunos emplean métodos de estereorestauración fotogramétrica a partir de fotografías o de imágenes numéricas (BRUNEAU and GASCUEL-ODOUX, 1990; WARNER, 1995), presentando como mayor inconveniente el elevado consumo de tiempo. Los métodos más rápidos realizan las medidas empleando rayos infrarrojos o

rayos láser. Los sistemas que usan rayos infrarrojos constan de sensores ópticos que permiten efectuar medidas puntuales a lo largo de transectos mediante el uso de telemetría (HARRAL and COVE, 1982; RÖMKENS, 1986). Estos sistemas cuentan con un aparato emisor de radiación infrarroja hacia la superficie del suelo, y la intensidad de la radiación reflejada se registra mediante un fototransistor. Este sistema proporciona una mayor resolución que los asperímetros, aunque tiene el inconveniente de que el tiempo necesario para efectuar una medida es muy largo y su eficacia muy baja. Se utilizaban esencialmente para medir la rugosidad de lechos de siembra.

Rugosímetros láser

Una técnica mas avanzada y de mayor resolución la constituyen los rugosímetros basados en la emisión de un haz de rayos láser perpendicularmente a la superficie del suelo, desarrollados hacia finales de los años 80. La mayor o menor altura de los puntos, que proporciona perfiles de relieve, se estima mediante la recepción del haz reflejado.

Estos sistemas de medida evitan la digitalización, al llevar acoplado un ordenador sobre el que se obtienen directamente y de forma rápida los perfiles de altura.

Los rugosímetros láser difieren entre sí básicamente en el sistema óptico de medida, en la precisión y en el número de perfiles que pueden medir. Algunos como los desarrollados por RÖMKENS *et al.* (1988), BERTUZZI *et al.* (1990) solo hacen medidas en una dirección, lo cual dificulta la obtención de varios perfiles de altura en una corta distancia. Posteriormente se desarrollaron otros modelos que permiten obtener perfiles de altura en las direcciones x e y con la misma resolución (HUANG and BRADFORD, 1990 b; FREDE and GÄTH, 1995).

A continuación se describen diferentes modelos de rugosímetros láser, que comprenden desde los más clásicos hasta los más modernos que poseen una mayor resolución.

Rugosímetros láser clásicos

Uno de los primeros láser fue el diseñado por HUANG *et al.* (1988), el cual consta de una fuente de helio-neon de baja potencia. El rayo láser emitido incide perpendicularmente sobre la superficie del suelo y la imagen del punto de la superficie del suelo converge sobre un detector fotodiodo después de atravesar una lente. El eje óptico de la lente tiene un pequeño ángulo de incidencia (fig. 2 a). Variaciones del punto de elevación sobre la superficie del suelo mueven la imagen del punto sobre el detector. Estos movimientos se pueden relacionar con las elevaciones de la superficie.

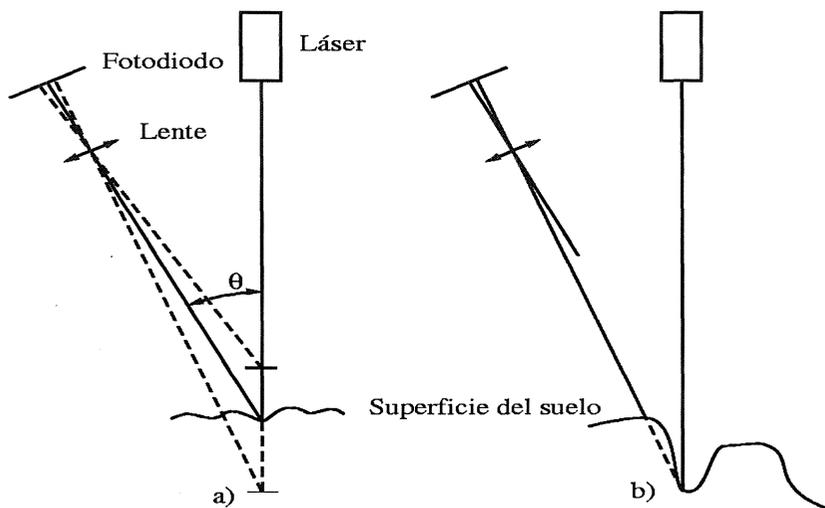


Figura 2. Características y limitaciones del método descrito por Huang et al. (1998).

Este tipo de rugosímetro ha sido usado con gran utilidad sobre carreteras y pavimentos de bajo microrrelieve (BRILLET, 1985). Sin embargo, presenta una gran limitación en superficies rugosas. En estas, el detector no recibe las imágenes de los puntos situados en las partes bajas, debido al ángulo de incidencia de la lente, ya que los agregados más grandes del suelo pueden interferir con el eje óptico de la lente impidiendo la llegada al detector (fig. 2 b) lo que se traduce en la falta de medidas de las partes más bajas y en consecuencia en una suavización de los resultados. Este problema se podría paliar aumentando el número de cámaras de recepción, pero encarecerían enormemente el equipo.

Rugosímetros láser modernos

La gran ventaja de los sistemas modernos frente al de HUANG *et al.* (1988) es que eliminan las interferencias entre la curvatura de los agregados y el ángulo del haz incidente, debido a la verticalidad del haz reflejado, de modo que son aptos tanto para superficies poco rugosas como para las más rugosas. Dentro de estos se diferencian dos tipos:

1. El primero fue diseñado por BERTUZZI *et al.* (1990) y está pensado para utilizar en suelos agrícolas con diferentes grados de rugosidad (fig. 3). Consta de una armadura horizontal de aluminio de 2,5 m de largo que se puede plegar para su almacena-

miento y transporte. El detector láser pende de una guía de aluminio que se puede mover automáticamente a lo largo de esa armadura horizontal (con un paso de 2 mm) medianamente el impulso de un motor eléctrico. Este equipo está acoplado a un robot y a un sistema de adquisición de datos con un microordenador.

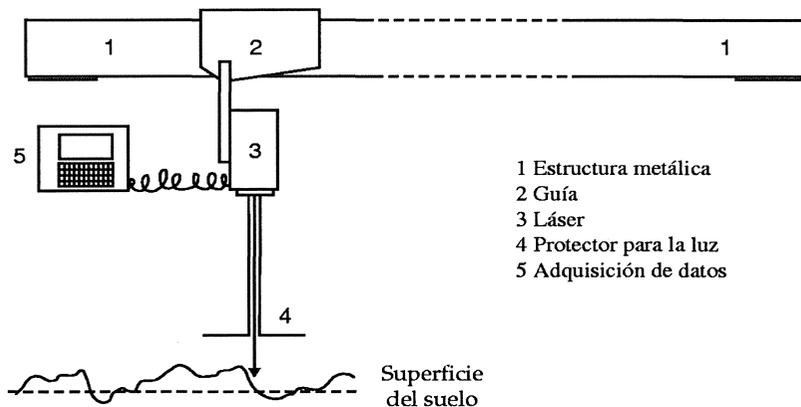


Figura 3. Rugosímetro láser descrito por Bertuzzi et al. (1990).

Características de medida

Puede realizar en 2 horas 1001 tomas de altura a lo largo de un transecto de 2 m, efectuadas con un incremento constante de 2 mm, registrándolas automáticamente sobre el ordenador. El incremento de 2 mm fue elegido teniendo en cuenta el tamaño del punto láser, de tal manera que ese intervalo evita la superposición de puntos adyacentes, asegurando la independencia espacial entre dos medidas contiguas.

El mayor inconveniente es que únicamente realiza medidas de modo automático en una dirección, siendo necesario efectuar un movimiento manual cuando se desea cartografiar una superficie.

Características del sistema óptico del detector láser

En términos generales consta de una fuente y un receptor de helio-neon de baja potencia (0.010 W) y un sistema óptico acoplado que permite proyectar verticalmente un

haz de rayos emitido normalmente a la superficie del suelo y tratar las imágenes desfocalizadas que son reflejadas (fig. 4) de modo que proporcionen sucesivas medidas puntuales de altura, a partir de las cuales se obtienen perfiles de relieve.

El rayo láser incidente es proyectado perpendicularmente sobre la superficie del suelo. El rayo de luz reflejado (imagen del impacto luminoso sobre la superficie), es recuperado por una lente mediante un cubo separador, la cual convierte la imagen del punto luminoso en una imagen plana. El rayo de luz incidente es modulado y el rayo de luz reflejada es filtrado para minimizar los errores de las medidas inducidos por la luminosidad ambiental y/o por variaciones del color del suelo.

La intensidad del rayo luminoso reflejado se registra en un detector fotovoltaico matricial compuesto por 25 células (5 x 5) fotodiódicas, que se sitúa entre la lente y la imagen plana del punto explorado del suelo. El punto explorado produce una imagen desfocalizada del suelo en el plano vertical de la célula matricial (fig. 4). Cuando varía la distancia entre la lente y el punto explorado también varía, en el plano vertical, el tamaño del punto luminoso y la distribución de la intensidad de la luz.

La intensidad luminosa total (I_t) mide todas las células del detector, mientras que la intensidad luminosa de referencia (I_r) solo mide la célula central. La relación entre la intensidad recibida por la célula central y la intensidad luminosa total (I_r/I_t) se relaciona con las variaciones de altura del punto láser debidas a la rugosidad del suelo (CAUSIGNAC and MOREL, 1987). En este sistema óptico las variaciones de altura corresponden a las variaciones de la distancia del detector al suelo. Un desplazamiento del láser en el plano horizontal permite tomar medidas puntuales sucesivas y reconstruir el perfil.

El rango disponible de distancias depende de las características geométricas del sistema óptico y de la longitud focal de las lentes. Este sistema dispone de dos lentes con diferente longitud focal. La elección de una u otra depende de las características de rugosidad de la superficie del suelo.

Para superficies poco rugosas se aconseja el uso de la lente de menor longitud focal y el rango de distancias detector suelo debe de estar comprendido entre 211 y 306 mm; en estas condiciones y combinando todas las fuentes de errores, los autores obtuvieron un error total de las medidas de altura láser inferior a 0,50 mm. Sin embargo, para perfiles rugosos se recomienda el uso de la lente de mayor longitud focal y en este caso, si la distancia detector suelo es superior a 450 mm, el error total en las medidas de altura combinando las fuentes de error causadas por el calibrado y el ruido se estimó entre 1 y 1,5 mm.

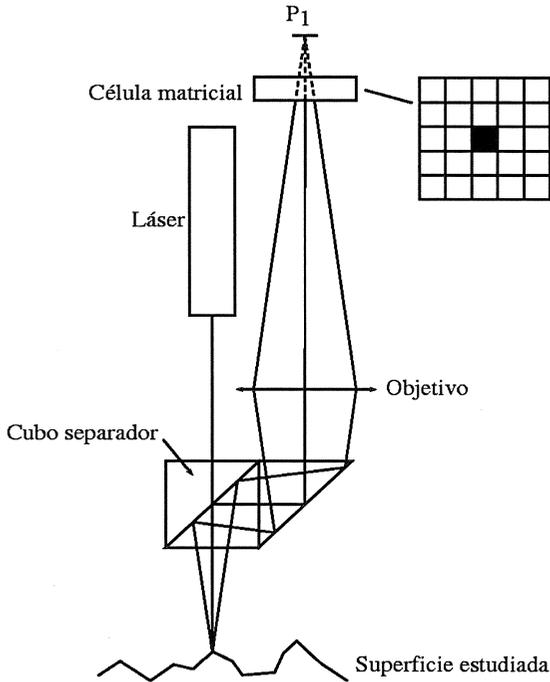


Figura 4. Esquema del sistema óptico del rugosímetro láser descrito por Bertuzzi *et al.* (1990).

Procedimiento de calibrado

La relación de intensidad lumínica de referencia frente a la total, que constituye el principio de medida de este sistema láser, puede verse adversamente modificada por dos factores: luminosidad ambiental y color del suelo.

Para conocer la precisión de las medidas de altura obtenidas con el aparato se realizan diferentes test, unos encaminados a detectar el efecto de la iluminación y el color de la superficie, otros a evaluar la distancia detector suelo, a conocer el ruido y otros a evaluar el error debido al procedimiento de calibrado. Algunos de estos test se comentan a continuación:

a) Test para detectar el efecto de la iluminación y el color de la superficie sobre las medidas de altura. Para ello se hace un calibrado empírico, utilizando por ejemplo como

superficie una regla inclinada, pintada por un lado de negro y por el otro de blanco. Sobre ella se realizan medidas con las dos lentes. Los autores no encontraron diferencias significativas entre los resultados de la superficie blanca y de la negra en relación con la curva de calibrado estimada, si bien han observado que dependen del tamaño de lente, siendo la grande la que proporciona una menor sensibilidad. En la figura 5 se presenta un ejemplo de una curva de calibrado obtenida con un sistema de medida similar al descrito y utilizando la lente pequeña. Dicha curva se describió con un polinomio de quinto orden. Es del tipo $a_0+a_1*v+a_2*v^2+a_3*v^3+a_4*v^4+a_5*v^5$, siendo:

$$a_0= 120,13$$

$$a_1= 813,70$$

$$a_2= -2506,40$$

$$a_3= 4678,92$$

$$a_4= -4455,13$$

$$a_5= 1701,66$$

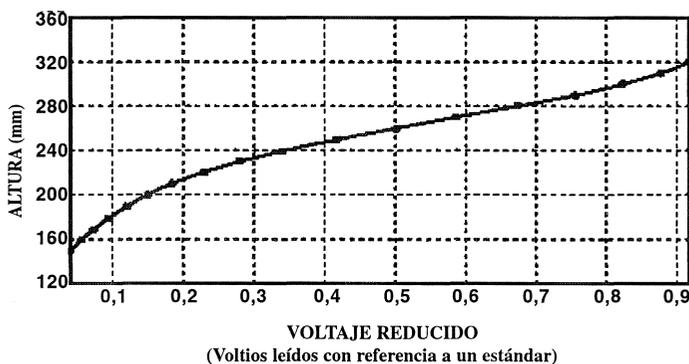


Figura 5. Curva de calibrado.

Se realiza también una calibración usando suelo, con el fin de observar las medidas efectuadas por el rugosímetro sobre un material de luminancia real. Se parte de superficies de suelo liso y se efectúan medidas con diferentes distancias detector-suelo. Para cada distancia se miden dos superficies, una húmeda y otra seca, lo cual induce variaciones en el color del suelo. A partir de las 400 medidas de altura efectuadas con una resolución horizontal de 2 mm, los autores no observaron diferencias significativas entre las medidas hechas con diferente grado de humedad del suelo y además estos resultados guardaron buena correspondencia con la curva de calibrado.

b) Error debido al procedimiento de calibrado. El voltaje producido por el detector láser era transformado con un error absoluto de 0,01 V. El error absoluto de las medidas de altura fue calculado usando la relación de calibrado. Será igual a la diferencia entre las dos medidas de altura calculadas obtenidas con los dos valores extremos de voltaje (v : - 0,01 y v : +0,01).

La precisión de las medidas de altura depende de la lente y de los valores de altura calculados. Los mejores resultados corresponden a la lente de menor longitud focal. Cuando la distancia del detector al suelo era mayor que 250 mm el error absoluto era menor que 0,25 mm.

c) Evaluación del ruido. Se midieron perfiles sobre una superficie plana, pintada de blanco con diferentes distancias del detector al suelo usando las dos lentes. De cada perfil se obtuvieron 900 medidas de altura con una resolución horizontal de 2 mm y se calculó la desviación estándar.

Para cada lente el ruido disminuye con el incremento de la distancia-detector suelo. Para la lente grande cuando la distancia detector suelo era mayor que 450 mm el ruido contribuía con un error menor que 1 mm sobre las medidas de altura. Para la lente pequeña y distancia detector-suelo superior a 250 mm, el ruido contribuía con un error menor que 0,5 mm a las medidas de altura.

d) Efecto de la distancia detector-suelo. El experimento consistía en cambiar la altura del rugosímetro con respecto a una misma superficie y medir perfiles láser de dos perfiles estándar con diferente rugosidad. Para cada perfil láser se calcularon diferentes parámetros estadísticos de medidas de altura y se compararon con los obtenidos con una técnica de referencia que consiste en una barra de aluminio con 200 pines y un incremento constante de 5 mm.

Se observó que la distancia detector-suelo tiene una gran influencia sobre los parámetros calculados. En las mejores condiciones de distancia detector-suelo, los resultados fueron similares pero los dos métodos no proporcionaron exactamente los mismos resultados. Esta diferencia se atribuye a otras fuentes de errores, como los que resultan de la dificultad de mantener la misma línea de transecto sobre la superficie del suelo cuando se usan los dos métodos.

2. Con posterioridad al rugosímetro presentado por BERTUZZI *et al.* (1990) aparecen otros láser como el PH-LINE, desarrollado por IMAGINE OPTIC (1998) con un sis-

tema óptico y principio de medida diferente de los anteriores y más actualizado, si bien mantiene en común la verticalidad del haz de luz reflejada, por lo que también puede ser utilizado con diferentes escalas de rugosidad de la superficie del suelo.

En la figura 6 se presenta un esquema de este rugosímetro. Consta de un soporte metálico de aproximadamente 2,5 m de largo y 1,5 m de ancho, atravesado longitudinalmente por una barra metálica alargada que se puede desplazar transversalmente mediante el impulso de un motor (robot). Esta barra porta el detector láser (situado por encima de la barra), el cual se puede mover también automáticamente a lo largo de la misma. El tamaño del soporte, así como el de las barras, se puede adaptar a las necesidades del usuario, pudiendo oscilar desde algunos centímetros a varios metros.

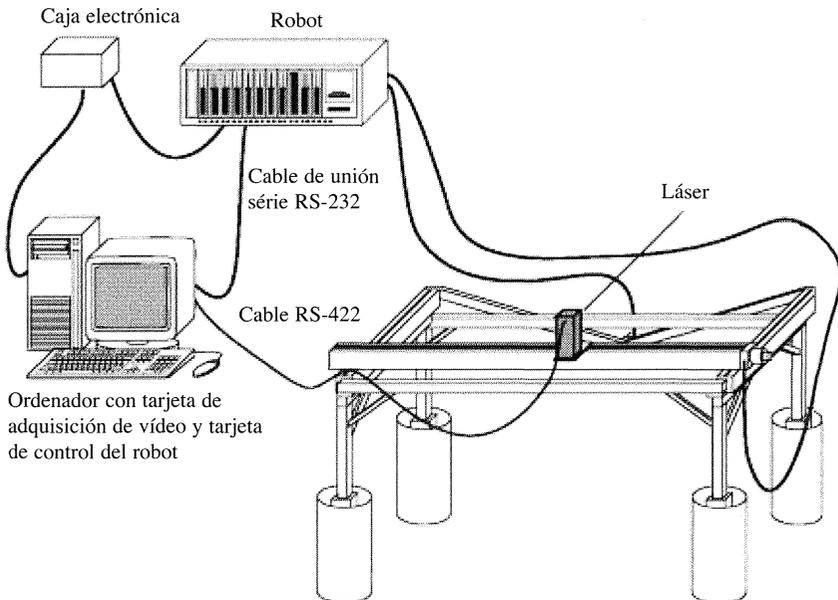


Figura 6. Esquema del rugosímetro láser con movimiento automático en dos direcciones.

El desplazamiento de la barra metálica y el del detector permiten efectuar perfiles de altura en las direcciones x/y , lo que supone un gran avance frente al modelo descrito anteriormente.

El detector láser está unido por cable al robot y al ordenador, el cual lleva acoplado el programa PH-LINE, una tarjeta de adquisición de vídeo y una tarjeta de control del robot.

Características de medida

Este dispositivo permite la adquisición de alturas sin contacto sobre una superficie de tamaño variable (el tamaño máximo depende del tamaño de la estructura metálica como se indicó anteriormente), con una precisión de reposicionamiento que oscila entre 0,5 y 20 mm. La sincronización entre los desplazamientos y la adquisición de datos permite obtener una malla de puntos de medida de 2 mm de lado. Como resultado de estos movimientos se obtiene la cartografía de la superficie del suelo, es decir una representación gráfica de las elevaciones y depresiones de la misma.

Características del sistema óptico del detector láser

El principio de este sistema se basa en medir la curvatura del frente de onda. El detector láser emite un haz de luz convergente sobre la superficie del suelo, que es reflejado verticalmente. La curvatura del frente de onda de esa luz reflejada, que es captada mediante un sistema de microlentillas, es proporcional a la distancia. Para ilustrar este principio se puede hacer una comparación con una piedra, que lanzada en un lago provoca una onda. Los círculos observados serán tanto mas grandes cuanto más alejado se esté de la piedra (círculos con gran curvatura).

La curvatura del frente de onda es independiente del color de la superficie. Con el fin de garantizar una medida fiable, el programa utilizado con el detector láser permite optimizar la intensidad emitida por el láser, el albedo de la superficie y la sensibilidad del fotodiodo en cada situación. Se puede igualmente controlar la intensidad de la luz parásita para tomar mas precauciones.

En precisión supera ampliamente al modelo descrito anteriormente. Una medida de altura repetida 7.000 veces solo presentó 0,03 mm de desviación estándar y el desplazamiento lateral se realiza con una precisión de 0,03 mm.

El programa PH-LINE permite efectuar un escaneado de la superficie deteniéndose en cada punto para hacer la medida, pero este método es muy lento, por lo que se puede recurrir a una segunda forma en la que el detector se desplaza a velocidad constante mientras se realizan las medidas. En este caso se pierde en precisión sobre la medida, pues lateralmente se cubre una superficie mas grande (superficie de la mancha más des-

plazamiento durante la medida), lo que induce más variación en el resultado final, que será tanto mas importante cuanto mas rugosa esté la superficie.

Las grandes ventajas de este aparato son igual que en el anterior la verticalidad del haz reflejado, pero además muestra una mayor precisión, independencia del color de la superficie del suelo, independencia de la temperatura, gran posibilidad de control y manipulación de la intensidad de la luz. Como desventajas hay que señalar la sensibilidad a la luz parásita y al polvo, el peso y la sensibilidad del soporte (difícil de transportar).

RESUMEN Y CONCLUSIONES

De los diferentes instrumentos de medida del microrrelieve del suelo (asperímetros, rugosímetros de infrarrojos y láser) se puede señalar que el uso de unos u otros dependerá del objetivo del trabajo a realizar y por tanto de la precisión de medida requerida, sin obviar las diferencias de costo, mucho más elevadas por ejemplo en un láser que en un asperímetro.

No todos pueden ser usados en condiciones de campo y laboratorio. El asperímetro, con la desventaja de requerir contacto con el suelo para efectuar la medida (lo que puede alterar la repetibilidad de las mismas) es un dispositivo de fácil transporte y montaje en el terreno, lo que le hace muy útil para uso en el campo. Los rugosímetros de infrarrojos y láser no causan deformaciones en la superficie del suelo y tienen mayor resolución que los anteriores; su gran inconveniente es que son difíciles de transportar por lo que resultarán más adecuados para uso en laboratorio; a esto hay que añadir la sensibilidad a agentes externos, como puede ser la luz en algunos casos, y cuyo control es menos laborioso en laboratorio.

Los sensores de infrarrojos y los rugosímetros láser proporcionan un intervalo de medida muy inferior al de los asperímetros con lo que se obtiene una cartografía más real de la superficie del suelo. Así por ejemplo un asperímetro de agujas puede proporcionar una malla de 5 x 2 cm o de 10 x 2 cm mientras que con el láser se obtienen cuadrículas de hasta 2 x 2 mm.

AGRADECIMIENTOS: A la Unité d'Agronomie de Laon-Péronne del INRA (Francia) por permitirnos realizar varias estancias en su centro y trabajar con algunos de los instrumentos aquí descritos, así como a la Unión Europea (Proyecto FAIR1-CT95-0458) por la financiación aportada para la adquisición de un rugosímetro láser.

BIBLIOGRAFÍA

- ABRAHAMAS, A. D., PARSONS, A. J. and HIRSCH, P. (1992). Field and laboratory studies of resistance of interrill overland flow on semi-arid hillslopes, southern Arizona. In: *Overland flow*, edited by Parson, A. J. and Abrahamas, A. D. UCL Press. London. 1-24.
- ALLMARAS, R. R., BURWELL, R. E. , LARSON, W. E. and HOLT, R. F. (1966). Total porosity and random roughness of the interrow zone as influenced by tillage. *USDA Conservation Res. Rep. 7*. 22 pp.
- BERTUZZI, P., CAUSSIGNAC, J. M., STENGEL, P., MOREL, G., LORENDEAU, J. Y. and PELLOUX, G. (1990). An automated, noncontact laser profile meter for measuring soil roughness in situ. *Soil Sci.*, 149 (3): 169-178.
- BOIFFIN, J. (1984). *La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies*. Thèse de Docteur-Ingénieur. INA Paris-Grignon.
- BOIFFIN, J. et MONNIER, M. (1991). Simplification du travail du sol et érosion hydrique. *Perspectives Agricoles*. N° 162, Octobre.
- BOIFFIN, J., PAPY, F. et EIMBERCK, M. (1988). Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. I. Analyse des conditions de déclenchement de l'érosion. *Agronomie*, 8: 663-673.
- BRESSON, L. M. and BOIFFIN, J. (1990). Morphological characterization of soil crust development stages on an experimental field. *Geoderma*, 47: 301-325.
- BRUNEAU, P. and GASCUEL-ODOUX, C. (1990). A morphological assessment of soil microtopography using a digital elevation model on one square metre plots. *Catena*, 17: 315-325.
- BURWELL, R. E., ALLMARAS, R. R. and AMEMIYA, M. (1963). A field measurement of total porosity and surface microrelief of soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 27: 697-700.
- CACHEIRO, M., TABOADA, M. T., VALCÁRCEL. M. Y DAFONTE, J. (1998). Mapping rill erosion within a cultivated field using geostatistic and GIS. *V Int. Symp. on Analytical Methodology in the Environmental Field*. A Coruña. Vol II. 1 pp.

- CAUSSIGNAC, J. M. et MOREL, G. (1987). Méthode de relevé sans contact de la rugosité d'une surface plane. *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Internal Report FAER*, 1. 65.10. 1-24 pp.
- COLVIN, T. S., ERBACH, D. C., BUCHELE, W. F. and CRUSE, R. M. (1984). Tillage index on created soil conditions. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 27: 370-371.
- CRUSE, R. M., LINDEN, D. R., RADKE, J. K., LARSON, W. E. and LARNTZ, K. (1980). A model to predict tillage effects on soil temperature. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44: 378-383.
- CURRENCE, H. D. and LOVELY, W. G. (1971). An automatic soil surface profilometer. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 14: 69-71.
- CURTIS, W. R. and COLE, W. D. (1972). Micro-topographic profile gage. *Agric. Eng.* 17-33.
- DAFONTE, J., GONZÁLEZ, M. A. PAZ, A. y TABOADA, M. T. (1997). Tecnología para evaluar el riesgo de erosión del suelo y el impacto de las medidas de conservación. *II Congr. de Ingeniería del Paisaje*. A Coruña. 261-266.
- DEXTER, A. R. (1977). Effect of rainfall on the surface micro-relief of tilled soil. *J. Terramechanics*, 14: 11-22.
- DIÉGUEZ, A. y LADO, M. (1997). Uso de la fotografía para el análisis de los síntomas de erosión de terrenos agrícolas. *II Congr. de Ingeniería del Paisaje*. A Coruña. 267-271.
- FOX, D. M., LE BISSONNAIS, Y. and QUETIN, P. (1998). The implications of spatial variability in surface seal hydraulic resistance for infiltration in a mound and depression topography. *Catena*, 32: 101-114.
- FREDE, H. G. and GÄTH, S. (1995). Soil surface roughness as the result of aggregate size distribution: 1. Report: Measuring and evaluation method. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, 158: 31-35.
- HARRAL, B. B. and COVE, C. A. (1982). Development of an optical displacement transducer for the measurement of soil surface profiles. *J. Agric. Eng. Res.* 27: 421-429.
- HEERMANN, D. F., WENSTROM, R. J. and EVANS, N. A. (1969). Prediction of flow resistance in furrows from soil roughness. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 12: 462-465.
- HELMING, K., RÖMKENS, M. J. M. and PRASAD, S. N. (1998). Surface Roughness Related Processes of Runoff and Soil Loss: A Flume Study. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 62: 243-250.

- HELMING, K., ROTH, CH. H., WOLF, R and DIESTEL, H. (1993). Characterization of rainfall microrelief interactions with runoff using parameters derived from digital elevation models (DEM). *Soil Technology*, 6: 273-286.
- HENRY, J. E., SCIARINI, M. J. and VAN DOREN, D. M. (1980). A device for measuring of surface profiles. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 23: 1437-1459.
- HIRSCHI, M. C., BARFIELD, B. J. and MOORE, I. D. (1984). Rillimeters for detailed measurement of soil surface heights. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* Paper N^o. 84-2384. 22 pp.
- HUANG, C. and BRADFORD, J. M. (1990 a). Depressional Storage for Markov-Gaussian Surfaces. *Water Resources Research*, 26: 2235-2242.
- HUANG, C. and BRADFORD, J. M. (1990 b). Portable laser scanner for measuring soil surface roughness. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54: 1402-1406.
- IMAGINE OPTIC. (1998). Manuel d'installation du systeme de mesure PH-LINE. J. Legrand (Rédacteur). Technologie H-LINETM. Analyse de front d'onde. Mesure tridimensionnelle sans contact. 20 pp.
- JOHNSON, C. B., MANNERING, J. V. and MOLDENHAUER, W. C. (1979). Influence of surface roughness and clod size and stability on soil and water losses. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43: 772-777.
- KINCAID, D. R. and WILLIAMS, G. (1966). Rainfall effects on soil surface characteristics following range improvement. *J. Range Manage.*, 19: 346-351.
- KUIPERS, H. (1957). A relief meter for soil cultivation studies; *Neth. J. Agric. Sci.* 5: 255-262.
- LADO, M. y TABOADA, M. M. (1998). Medida de la rugosidad del suelo en terrenos de cultivo. En: *Investigaciones recientes de la Geomorfología Española*, editado por Gómez Ortiz, A. y Salvador Franch, F. Barcelona. 731-734.
- LARSON, W. E. (1962). Tillage requirements for corn. *J. Soil Water Conserv.*, 17: 3-7.
- LEHRSCHE, G. A., WHISLER, F. D. and RÖMKENS, M. J. M. (1988). Selection of a parameter describing soil surface roughness. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52: 1439-1445.
- LINDEN, D. R. and VAN DOREN, D. M. (1986). Parameters for characterizing tillage induced soil surface roughness. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50: 1560-1565.

- McCOOL, D. K., DOSSETT, M. A. and YECHA, S. J. (1976). A portable rill meter for measuring soil loss. *Am. Soc. Agric. Eng.*, Paper N° 76-2054., 9 pp.
- MITCHELL, J. K. and JONES, B. A. (1973). Profile measuring device. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 16: 546-547.
- MONTEITH, N. H. (1974). The role of surface roughness in runoff. *J. Soil Conserv. New South Wales*, 30: 42-43.
- MOORE, I. D. and LARSON, C. L. (1979). Estimating micro-relief surface storage from point data. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 20: 1073-1077.
- ONSTAD, C. A. (1984). Depressional storage on tilled surfaces. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 27: 729-732.
- PAZ, A. y TABOADA, M. T. (1996). Medida del microrrelieve del suelo y estimación de la retención hídrica en depresiones de la superficie. En: *IV Reunión de Geomorfología*, editado por Grandal d'Anglade, A. y Pagés Valcarlos, J. A. Coruña. 829-841.
- PAZ, A. y VALCÁRCEL, M. (1998). Comparative evaluation of current soil erosion models in variables related to agriculture. *V Int. Symp. on Analytical Methodology in the Environmental Field*. A Coruña. p. 39.
- PODMORE, T. H. and HUGGINS, L. F. (1981). An automated profile meter for surface roughness measurements. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 24: 663-665.
- POESEN, J. and GOVERS, G. (1990). Gully erosion in the Loam Belt of Belgium: Typology and control measures. In: *Soil erosion on agricultural land*, edited by Boardman, J., Foster, I. D. L. and Dearing, J. A. Wiley, 513-530.
- PLANCHON, O., ESTEVES, M. et SILVERA, N. (1998). Le micro-relief d'un sol sarclé: mesure, modélisation et conséquences sur le ruissellement et l'érosion. *16 ème Congr. Inter. de Sci. du Sol*. AISS. 477-457.
- RADKE, J. K., OTTERBY, M. A., YOUNG, R. A. and ONSTAD, C. A. (1981). A micro-processor automated rillmeter. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 24: 401-408.
- RÖMKENS, M. J. M., SINGARAYAR, S. and GANTZER, C. J. (1986). An automated noncontact profile meter. *Soil Tillage Res.*, 6: 193-302.

- RÖMKENS, M. J. M., WANG, J.Y. and DARDEN, R. W. (1988). A laser microrelief-meter. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 31: 408-413.
- SHAKESBY, R. A. (1993). The soil erosion bridge: A device for micro-profiling soil surfaces. *Earth Surface Proc. and Landf.*, 18: 823-827.
- SCHAFER, R. L. and LOVELY, W. G. (1967). A recording soil surface profile meter. *Agric. Eng.* 48: 280-282.
- SIMANTON, J. R., DIXON, R. M. and MCGOWAN, I. (1978). A microroughness meter for evaluating rainwater infiltration. *Hydrol. Water Res. Ariz. Southwest*, 18: 171-174.
- ULLAH, W. and DICKINSON, W. T. (1979). Quantitative description of depression storage using a digital surface model. I. Determination of depression storage. *J. of Hydrology*, 42: 63-75.
- VAN OUWERKERK, C., POT, M. and BOERSMA, K. (1981). Electronic micro-relief-meter for seedbed characterization. *Soil Tillage Res.*, 2: 81-90.
- VHALLY, W. B. and REA, B. R. (1994). A digital surface roughness meter. *Earth Surface Proc. and Landf.*, 16: 123-135.
- WARNER, W. S. (1995). Mapping a three dimensional soil surface with hand-held 35 mm photography. *Soil Tillage Res.*, 34: 187-197.
- ZOBECK, T. M. and ONSTAD, C. A. (1987). Tillage and rainfall effects on random roughness: A review. *Soil Tillage Res.*, 9: 1-20.