

Cuantificación de la rugosidad del suelo mediante medidas diurnas de reflectancia multispectral de alta resolución espacial obtenidas con un vehículo aéreo no tripulado

J. Rodríguez González¹, P. J. Zarco-Tejada¹ y J. A. Gómez¹

¹ Instituto de Agricultura Sostenible (IAS), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), (Córdoba, España). Correo electrónico: jrodriguez@ias.csic.es

RESUMEN

Sobre una finca experimental con diferentes niveles de rugosidad del suelo (RSS), se obtuvieron imágenes multispectrales de alta resolución espacial (12.5cm) a diferentes horas del día. La posibilidad de cuantificar la RSS a partir de medidas de reflectancia se investigó aplicando el modelo de Hapke en modo inverso. La segunda metodología aplicada utiliza directamente la reflectancia medida mediante índices espectrales. Los resultados obtenidos con ambas metodologías demuestran que es factible obtener medidas cuantitativas de la RSS y su potencial para obtener mapas de rugosidad de alta resolución espacial a escala de campo.

Palabras clave: teledetección, rugosidad del suelo, modelo de Hapke, UAV.

ABSTRACT

High resolution (12.5cm) multispectral imagery was acquired at different times of the day over an experimental field site with different levels of soil surface roughness (SSR). Two methodologies were applied to investigate the possibility to estimate SSR using measured reflectance. First, we applied the Hapke model in inverse mode. The second methodology is based on using measured reflectance values directly by means of spectral indices. The results obtained indicate that both approaches could be useful for providing quantitative measures of SSR at very high spatial resolution, providing SSR maps at field or plot scales.

Keywords: remote sensing, soil roughness, Hapke model, UAV.

INTRODUCCIÓN

La rugosidad superficial del suelo (RSS) es un factor importante en muchos procesos en superficies terrestres sin cubierta vegetal, así como en suelos de uso agrícola. Influye, por ejemplo, de manera determinante en procesos de difusión de CO₂ y vapor de agua, así como en procesos de escorrentía y de erosión eólica e hídrica. Debido a su importancia, modelos de erosión como RUSLE, WEPP, Kineros o STREAM incluyen la RSS mediante parámetros o índices cuantitativos. Para la medición de la RSS generalmente se suelen utilizar perfilómetros o escáneres láser, estereo-fotogrametría y, recientemente, sistemas avanzados de LIDAR terrestres. Sin embargo, todos estos métodos son inadecuados para cubrir áreas más extensas a escala de campo o de explotaciones agrarias (Jester & Klik, 2005).

Numerosos trabajos han investigado las características de la reflectancia de suelos y superficies en el rango óptico del espectro electromagnético. El consenso generalizado es que la anisotropía en la reflectancia de suelos o la función de reflectividad bidireccional (BRDF) está causada por la cuantía variable de sombras expuestas al observador o sensor. Estas sombras son proyectadas por partículas y agregados del suelo, terrones, glebas y otros elementos topográficos – es decir por la rugosidad de la superficie (Cierniewski y Karnieli, 2002). Este concepto es generalmente conocido bajo el término de ‘shadow-hiding theory’ (Hapke, 1993). En consecuencia, métodos y técnicas de teledetección tienen en teoría el potencial de obtener información cuantitativa sobre la RSS a partir de medidas de reflectancia en el rango óptico del espectro.

El modelo BRDF semi-físico de Hapke (1993), estándar en el ámbito de la teledetección planetaria para la interpretación de medidas de reflectancia, permite incluir la influencia de la RSS mediante su función de rugosidad o de sombra (*'shadow function'*) y su correspondiente parámetro de rugosidad θ . Recientemente, el modelo completo, incluyendo su función de sombra, ha sido utilizado para investigar la rugosidad de superficies terrestres a partir de datos MISR (1100m de resolución), demostrando así el potencial del parámetro θ como descriptor cuantitativo de la SSR (Wu et al., 2009). Otros autores han demostrado con éxito la posibilidad de cuantificar la RSS de muestras de suelo tamizado utilizando directamente medidas hiperspectrales obtenidas bajo diferentes geometrías angulares a muy pequeña escala (mm) (CROFT et al., 2009), así como usando fotografías digitales tomadas *in situ* sobre suelos labrados con diferentes aperos (MORENO et al., 2008).

Sin embargo, ninguna de estas dos metodologías ha sido utilizada bajo condiciones reales y a escalas más adecuadas desde el punto de vista operativo. Esta comunicación presenta los resultados de la aplicación de ambas metodologías para la cuantificación de RSS en una finca experimental utilizando medidas de reflectancia multiespectral obtenidas mediante un sensor a bordo de un vehículo aéreo no tripulado (UAV) a diferentes horas del día y con alta resolución espacial.

EXPERIMENTO Y ADQUISICIÓN DE DATOS

En una finca experimental (100x40m) sin desnivel se usaron 5 aperos (rulo, rotocultor, cultivador, chisel, vertedera) para obtener diferentes niveles de rugosidad representativos de laboreos convencionales en explotaciones agrarias (Figura 1).

Mediante un escáner láser (resolución en $z = 0.1$ mm) se obtuvieron 15 modelos digitales de elevación (DEM), tres por cada uno de los tratamientos. Cada DEM cubre una superficie de 900 x 900mm con una resolución de malla de 7.2x7.2mm (Figura 2). Para su localización exacta en las imágenes se utilizó un GPS diferencial con una precisión horizontal < 10 cm para obtener las coordenadas de cada uno de los DEM. Para cada uno de los DEM se calcularon cuatro índices cuantitativos de rugosidad

(desviación estándar $RMSH$, pendiente media S y los índices de tortuosidad T_A y T_B), así como los valores medios para cada tratamiento.

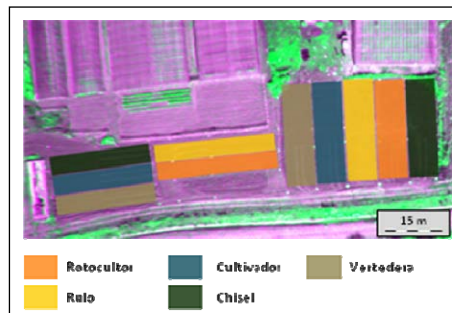


Figura 1: Detalle de la zona de estudio. Imagen multiespectral obtenida mediante el sensor ADC.

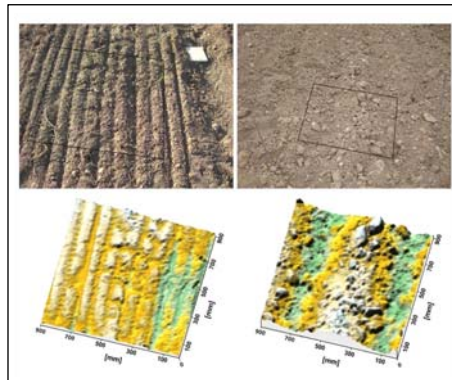


Figura 2: DEM correspondientes a los tratamientos de cultivador (izda.) y chisel (dcha.)

Mediante una plataforma aérea no tripulada (UAV) equipada con un sensor multiespectral ADC (Tetracam Inc., USA) de tres bandas ($B_1=550$, $B_2=670$, $B_3=800$ nm) se obtuvieron imágenes con una resolución espacial de 12.5cm. Se llevaron a cabo cuatro sobrevuelos a diferentes horas del día (8:30, 9:30, 11:00, 12:30 GMT) una semana después del laboreo. Después de la corrección geométrica y la georreferenciación, las imágenes fueron sometidas a una corrección atmosférica para obtener valores de reflectancia. A continuación se utilizaron las coordenadas GPS para extraer la reflectancia multiespectral de los píxeles correspondientes a cada uno de los DEM y se calculó el valor medio de reflectancia con el que se trabajó.

METODOLOGÍA

El modelo de Hapke y su aplicación

El modelo de Hapke está basado en la teoría de transferencia de radiación y describe el campo de radiación emergente de una superficie o suelo iluminado en función de la geometría angular de observación y varios parámetros invariantes para un suelo que se caracteriza por unas propiedades ópticas constantes (Jacquemoud et al., 1992). La función de rugosidad o sombra describe la influencia de la RSS de una superficie arbitrariamente rugosa mediante al parámetro de rugosidad θ . De forma abreviada (para más detalle ver Hapke, 1993), el modelo normalizado con respecto a una superficie de Lambert puede expresarse de la siguiente forma:

$$r_{(i,e,g,\theta)} = \frac{w}{4} \times \frac{1}{\mu_{0e} \times \mu_e} \times \left[(1 + B_{(g)}) \times \rho_{(g)} + M_{(\mu_{0e}, \mu_e)} \right] \times S_{(i,e,g,\theta)} \quad (1)$$

donde:

w =single-scattering albedo.

i,e,g = respectivamente, ángulos de iluminación, observación y ángulo de fase.

$\mu_{(0e)}, \mu_{(e)}$ = coseno de los ángulos efectivos de iluminación y observación.

$M_{(\mu_{(0e)}, \mu_{(e)})}$ = multiple-scattering function

$B_{(g)}$ =función del back-scattering.

$p_{(g)}$ =función de fase.

$S_{(i,e,g,\theta)}$ = función de rugosidad o sombra.

θ =parámetro de rugosidad

El modelo se invirtió usando la conocida metodología de *look-up-table* (LUT) para minimizar el error cuadrático medio (RMSE) entre la reflectancia medida en las tres bandas, a las cuatro horas del día para cada uno de los 15 DEM (n=180). Los valores del parámetro de rugosidad θ obtenidos mediante la inversión se compararon luego con los índices cuantitativos de rugosidad mediante un análisis de correlación y regresión.

Índices multispectrales

A partir de la reflectancia correspondiente a cada de los 15 DEM se calcularon varios índices espectrales de los tipos (B_x/B_y) y $(B_x+/-B_y)/(B_x+/-B_y)$ para cada hora del día y utilizando las tres bandas disponibles. Para estudiar la relación entre índices espectrales e índices cuantitativos de rugosidad, se aplicó un análisis de correlación y regresión simple.

RESULTADOS

Modelo de Hapke

La inversión del modelo se validó con un error cuadrático de 0.03 en unidades de reflectancia. La reflectancia modelada sobreestimó moderadamente los valores medidos en la longitud de onda de 550 nm, subestimó los obtenidos a 800 nm, mientras los valores a 670 nm solamente se desviaron ligeramente de la línea ideal (Figura 3).

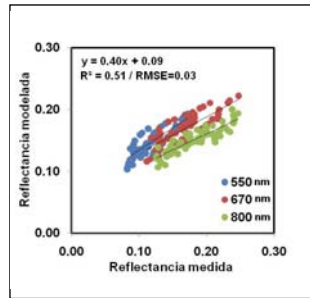


Figura 3: Resultado del ajuste del modelo de Hapke mediante LUT.

El parámetro θ obtenido mediante la inversión y los diferentes índices cuantitativos de rugosidad muestran correlaciones estadísticamente significativas. Los modelos de regresión obtenidos a partir de las medidas individuales tienen coeficientes de determinación (r^2) superiores a 0.40. Para los modelos de regresión utilizando los valores medios de los cinco tratamientos, los coeficientes de determinación son superiores a 0.70 (Figura 4).

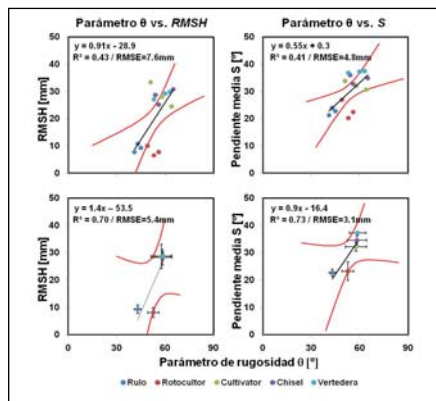


Figura 4: Comparación entre el parámetro de rugosidad θ y los índices de rugosidad $RMSH$ y S . Modelos de regresión obtenidos mediante medidas individuales (arriba), y mediante los valores medios de tratamientos (abajo).

Índices espectrales

Para todos los índices cuantitativos de rugosidad se encontraron correlaciones estadísticamente significativas con diferentes índices espectrales. Destacan sobre todo aquellos índices espectrales basados en combinaciones de las longitudes de onda de 670 y 800 nm y de 550 y 800 nm.

Los coeficientes de determinación para los modelos de regresión a partir de las medidas individuales se sitúan a un nivel alrededor de 0.40, utilizando las medias de los tratamientos estos valores aumentan a valores superiores a 0.70 (Figura 5). En general, las correlaciones son mejores utilizando las medidas de reflectancia obtenidas a primera hora del día (8:30 GMT) cuando la cantidad de sombra es máxima.

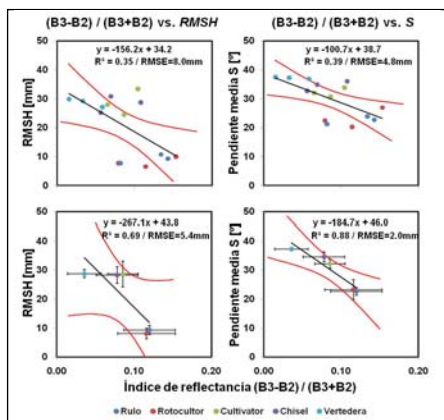


Figura 5: Modelos de regresión para los índices de rugosidad *RSMH* y *S* obtenidos con medidas individuales (arriba), y mediante los valores medios de tratamientos (abajo).

CONCLUSIONES

Mediante la inversión del modelo de Hapke es posible obtener medidas cuantitativas de la RSS a través de su parámetro de rugosidad. También se obtuvo diferentes modelos de predicción estadísticamente significativos utilizando directamente medidas de reflectancia.

Estos resultados demuestran que es factible obtener medidas cuantitativas de la RSS con ambas metodologías y su potencial para obtener mapas de rugosidad de alta resolución espacial a escala de campo.

BIBLIOGRAFÍA

CIERNIEWSKI, J. Y KARNIELI, A., 2002: *Virtual surfaces simulating the bidirectional reflectance of semi-arid soils*. International Journal of Remote Sensing, 23 (19), 4019-4037.

CROFT, H., ANDERSON, K. y KUHN, N.J., 2009: *Characterizing soil surface roughness using a combined structural and spectral approach*. European Journal of Soil Science, 60 (3), 431-442.

GARCÍA MORENO, R., SAA REQUEJO, A., TARQUIS ALONSO, A.M., BARRINGTON, S. Y DÍAZ, M.C., 2008: *Shadow analysis: A method for measuring soil surface roughness*. Geoderma, 146 (1-2), 201-208.

HAPKE, B., 1983: *Theory of reflectance and emittance spectroscopy (Topics in Remote Sensing 3)*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

JACQUEMOUD, S., BARET, F. y HANOCQ, J. F., 2002: *Modeling spectral and bidirectional soil reflectance*. Remote Sensing Of Environment, 1992, 41, 123-132

WU, Y., GONG, P., LIU, Q. y CHAPPELL A., 2009: *Retrieving photometric properties of desert surfaces in China using the Hapke model and MISR data*. Remote Sensing Of Environment 113 (1), 213-223.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo del Ministerio de Ciencia e Innovación (BES-2005-8691-AGL2005-04049, AGL2009-12936-C03-01) y fondos FEDER.