MEDIDAS DE RUGOSIDAD MEDIANTE FOTOGRAMETRÍA PARA LA MEJORA DE LA ESTIMACIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO DESNUDO EN IMÁGENES DE MICROONDAS

C. Pérez-Gutiérrez (*), J. Álvarez- Mozos (**), N. Sánchez (*) y J. Martínez-Fernández (*).

(*) CIALE. Universidad de Salamanca. C/ del Duero, 12. 37185-Villamayor. carpegu@usal.es (**) Departamento de Proyectos e Ingeniería Rural. UP Navarra. Arrosadía s/n. 31006-Pamplona.

RESUMEN

Este trabajo expone una metodología de bajo coste para la medida de rugosidad del suelo de una forma rápida y eficiente utilizando técnicas de fotogrametría convergente de objeto cercano. Se seleccionaron varias parcelas de diferente rugosidad y sobre ellas se han comparado los valores tradicionales de rugosidad obtenidos mediante el procedimiento clásico basado en perfiles altimétricos, frente a una metodología fotogramétrica de bajo coste y fácil ejecución en campo. Los resultados obtenidos indican que para perfiles de 50cm de longitud, ambos métodos son casi equivalentes resultando más acordes cuanto más rugoso es el terreno.

ABSTRACT

This paper shows a low-cost methodology for measuring soil roughness in a fast and efficient way using a closerange photogrammetry approach. They were selected several plots with a different roughness and we compared the traditional values to estimate the roughness using the classic method of profiles versus the photogrammetry one. Results show both methods are equivalent and they are fixing stronger as soil is rougher.

Palabras clave: rugosidad, fotogrametría, humedad microondas, CHISME.

INTRODUCCIÓN

La rugosidad del suelo alude a las diferencias de elevación de la capa superior del terreno en escalas que están en un rango que va del orden de unos pocos milímetros al de varios decimetros (Verhoest N.E.C., Lievens et al. 2008). La rugosidad del suelo es un término de vital importancia en las Ciencias de la Tierra. Fenómenos de escorrentía, erosión, percolación y humedad del suelo vienen afectados por la rugosidad del suelo, y junto con otros parámetros complementarios, permiten estudiar el ciclo hidrológico a escalas muy variadas.

En la estimación de la humedad del suelo utilizando sensores de microondas, conocer la rugosidad del suelo resulta un factor decisivo debido a la influencia que este parámetro tiene sobre la respuesta de las imágenes radar. Tradicionalmente, la caracterización de la rugosidad del suelo se ha realizado mediante perfiles de alturas con perfilómetros. Los perfilómetros miden la variación altimétrica del terreno sobre una línea recta (perfil) de longitud variable. La ventaja de estos sistemas de medida lineal radica en la facilidad para extraer los parámetros que describen la rugosidad. Como inconveniente, la ejecución de la medida en campo resulta lenta y tediosa por la propia configuración de los equipos. En relación con lo anterior, la rugosidad del suelo es una variable estocástica y su estimación debe realizarse a partir de múltiples muestras que permitan derivar un valor consistente del terreno medido. Al ser un procedimiento tedioso, la medida basada en perfiles resulta limitada en número y no siempre resulta lo suficientemente representativa.

El presente trabajo describe una metodología basada en fotogrametría convergente de objeto cercano. El objetivo prioritario es reducir costes, tanto en el aspecto económico, al no tener que invertir en perfilómetros más o menos costosos; como de eficiencia en campo, al minimizar el tiempo necesario para la medida de cada muestra.

CHASIS IMAGEN-SUELO PARA MEDIDAS ELEMENTALES (CHISME)

CHISME es un dispositivo de construcción sencilla formado por un marco rectangular de 60x60cm², realizado con láminas plano-paralelas de 5cm de ancho y 7mm de grosor. En cada una de las piezas laterales que conforman el marco, se ha dispuesto una plantilla de elementos de calibración del dispositivo: ocho dianas de puntería y ciertos puntos de enlace, permiten calibrar el chasis y los parámetros internos de la cámara. Álbumes cromáticos situados junto a las dianas anteriores permiten la calibración radiométrica de las imágenes



adquiridas, facilitando la transformación entre los niveles de gris de la cámara y valores de radiancia absolutos. Finalmente la incorporación de varios test ópticos de resolución, siguiendo una secuencia similar a códigos de barras, permite valorar la apreciación del píxel de la imagen adquirida acorde a las condiciones reales de la toma.

Las dianas cromáticas no han sido utilizadas en el presente experimento pues no son necesarias para la obtención de la rugosidad del terreno. Sí lo han sido los segmentos plano-paralelos que marcan la resolución de la cámara en las condiciones de medida con el chasis.

Calibración y orientación

El proceso de calibración se efectúa de forma conjunta para el binomio cámara-chasis haciendo uso de técnicas específicas de microgeodesia y autocalibración de cámaras (Kruck, 2003). Realizada la calibración, se obtienen los parámetros internos de la cámara (distancia focal, distorsión radial y resolución de la huella del píxel) y de las dianas de puntería del propio chasis (coordenadas refinadas de las dianas acorde a la resolución y apreciación de la cámara utilizada.).

Protocolo de adquisición de las tomas fotográficas

El protocolo de adquisición de las imágenes de rugosidad impone que las dianas de puntería situadas en el chasis aparezcan en cada toma. Esas marcas actúan como puntos de control, permitiendo la orientación de las imágenes con respecto al armazón y, así, unas tomas con respecto a otras. La ventaja de este armazón frente a otros dispositivos está en la facilidad de adquisición de los datos en campo. El marco con las dianas se sitúa sobre el terreno (no hace falta nivelarlo, pues el posterior procedimiento matemático compensa la tendencia por pendiente). Las tomas fotográficas se realizan desde una altura en la que el campo angular de la cámara capte todo el armazón. En función de la apertura angular de la cámara, esta distancia puede variar entre 0.65 y 1.60 m. Las tomas se realizan a mano alzada, sin necesidad de trípode.

El procedimiento de cálculo posterior se basa en técnicas de correlación entre múltiples imágenes. Por ello, la premisa fundamental es que se realicen varias tomas del marco desde diferentes puntos de vista. Las dimensiones del chasis lo hacen ideal para que todas las fotografías lo abarquen con un 100% de recubrimiento. Es importante que entre una y otra toma exista una distancia (base) que ronde aproximadamente 1/4 ó 1/5 de la altura de la cámara. Más que varias tomas nadirales de ejes paralelos, conviene que sean tomas ligeramente convergentes. Eso optimiza el ángulo de incidencia entre modelos, y mejora la geometría final. Dependiendo de la cámara utilizada, un ángulo de 10-15º con respecto a la vertical es lo más adecuado. Ángulos mayores, pueden producir que la disparidad entre las imágenes devenga en problemas de correlación posteriores.

A este respecto, se propone que la adquisición de tomas para una muestra de rugosidad sea el conjunto de cinco imágenes: una toma nadiral desde aproximadamente la vertical del centroide del chasis, y otras cuatro tomas ligeramente inclinadas, separadas unos 30-45 centímetros en las respectivas direcciones de los puntos cardinales. Esta metodología de adquisición es sencilla y en apenas 30-60 segundos es posible disponer de una muestra completa para su posterior procesamiento.

Procesamiento de las imágenes

Para la elaboración de Modelos Digitales de Elevación (MDE), se ha demostrado que una transformación desde ese espacio de color Rojo, Verde y Azul (RGB) a Intensidad, Tono y Saturación (IHS) es muy recomendable (Foley et al. 1990). Así pues, un primer tratamiento consiste en transformar las imágenes desde RGB a IHS. Para sucesivos pasos, se toma el canal de Intensidad como dato de entrada. Los canales de Tono y Saturación son prescindibles.

La reconstrucción del terreno, en forma de nube de puntos tridimensionales, o mejor aún, de modelo digital del terreno, se realiza mediante la combinación ponderada de las diferentes imágenes adquiridas siguiendo la teoría fotogramétrica de ajuste de haces (Toutin, 1995). Se trata de una generalización del método tradicional de la estereoscopía aplicado a n imágenes convergentes, con un 100% de recubrimiento entre ellas.

La combinación de *n* fotogramas implica el uso de hasta $m=n\cdot(n-1)$ modelos estereoscópicos diferentes. De los potenciales modelos, el acercamiento permite escoger una configuración más adaptada a la problemática concreta de la rugosidad, ponderando como mejores modelos aquellos que tengan una geometría estereoscópica más favorable (Schenk, 1999), los que dispongan de un mejor factor de correlación para detalles concretos, o incluso un híbrido entre ellos, donde prime un valor medio de geometría espacial y correlación radiométrica.

Este tipo de acercamiento es muy útil en superficies de alta rugosidad donde el propio terreno puede producir oclusiones sobre sí mismo y no

86

todos los detalles del mismo pueden verse desde todas las posiciones.

METODOLOGÍA

Para el presente trabajo se utilizaron dos parcelas expresamente dispuestas para la ocasión. Una considerada de alta rugosidad en la que había pasado un tractor arrastrando una vertedera, y otra de escasa rugosidad que había sido compactada mediante rulo y rastra-molón (Figura 1).



Figura 1.- Ejemplos de las fotografías de dos adquisiciones de rugosidad. Izquierda: parcela vertedera. Derecha: parcela rastra-molón.

Sobre estas parcelas se procedió a medir varios perfiles longitudinales y transversales con un perfilómetro de 5 metros de longitud e intervalo de remuestreo de 5mm (Álvarez-Mozos, 2006). En las mismas zonas donde se midió con el perfilómetro se hicieron también adquisiciones con el armazón de fotogrametría. En cada parcela se adquirieron 4 perfiles longitudinales y, otros 4 perfiles transversales. Cada perfil estaba asociado con una medida realizada con fotogrametría. Por tanto, cada parcela disponía de 8 medidas realizadas con técnicas fotogramétricas.

La cámara utilizada fue una Panasonic GS200 con objetivo Leica-Dicomar. Se trata de una cámara de video miniDV que permite adquirir imágenes fotográficas con una resolución de 2.3 megapíxeles. La resolución del sensor no es muy elevada, pero para las alturas de cámara que se utilizan con el chasis fotogramétrico, produce imágenes con huella del píxel sobre el terreno de 0.83mm, lo que resulta más que suficiente para los objetivos del trabajo.

En beneficio de este tipo de cámaras, disponen de una pantalla LCD basculante y orientable, típica característica de las cámaras de vídeo, que facilita la toma de las diferentes imágenes pseudo-nadirales. Los MDE generados se han creado con ancho de malla de 1mm y una superficie útil para la medida de 50x50cm. Con la finalidad de comparar los modelos digitales de elevación elaborados por fotogrametría con los perfiles del perfilómetro, se han remuestreado los datos derivados de la cámara a un intervalo de 5mm.

Los estadísticos de error, consecuencia del uso de correspondencia en múltiples imágenes, informan que el error altimétrico de los modelos digitales de elevación está cifrado en menos de 2mm en la práctica totalidad de la zona. Esta información se ha verificado, a discreción, realizando restituciones de puntos de detalle de forma manual. Los peores resultados se han obtenido en zonas de alta pendiente (bordes verticales de las piedras) y en zonas donde los píxeles eran muy homogéneos y la correlación encontraba falsos positivos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tradicionalmente, la desviación estándar de las alturas (*s*), la función de autocorrelación (ACF), y derivada de ella, la longitud de autocorrelación (*l*) han sido los estadísticos más utilizados para caracterizar la rugosidad del terreno (Verhoest *et al.* 2008). Para validar si los estimadores obtenidos con CHISME son equivalentes a los obtenidos con el perfilómetro, se calcularon valores de *s* y *l* con CHISME haciendo uso de perfiles con longitud de 50cm, e intervalos de muestreo de 1mm (nativo) y 5mm (degradado). Los datos del perfilómetro se procesaron seccionando los perfiles de 5m en tramos de 50cm, y respetando el intervalo de muestra original de 5mm.

En una fase posterior del análisis efectuó la comparativa promediando los 500 perfiles que toma cada muestra de CHISME, y los 10 perfiles simultáneos de 0.5m que puede adquirir el perfilómetro de 5m de longitud.

Para CHISME no hay una diferencia sustancial entre los valores de s y l cuando se estiman con intervalos de 1 y 5mm. El parámetro s en ambos equipos es muy estable y existe plena correlación entre ellos. La mayor discrepancia ronda el valor de 1.5cm si bien en la mayoría de los casos apenas llega a medio milímetro. El parámetro l tiene un comportamiento desigual. En la parcela de máxima rugosidad, donde ese parámetro es pequeño, tiene una similitud entre ambos equipos de medida, con un error máximo absoluto de 1.5cm. En la parcela de rugosidad suave, CHISME subestima el valor de l siendo en el mayor de los casos de hasta 6.2cm de diferencia



No se encuentran mejoras significativas entre la estimación de s y l desde perfiles aislados, y la estimación basada en el promedio de los 500 perfiles extraídos por CHISME para cada área medida (Tabla 1). La única constatación del análisis basado en múltiples perfiles es la alta variabilidad que tienen unos con respecto a otros, tanto en scomo en l. La presencia aleatoria de piedras o trozos de vegetación hacen que entre un perfil y el contiguo, valores de s y l puedan cambiar de forma gradual. La figura 2 muestra un caso concreto para sy para l en la parcela correspondiente al paso con vertedera.



Figura 2.- Variación de *s* y *l* para 500 perfiles colindantes en un recinto de $50x50cm^2$. Separación entre perfiles 1mm. Remuestreo de los datos 5mm.

 Tabla 1.- Comparativa de s y l para los perfiles longitudinales. Unidades en centímetros.

	muestra	s chisme	s perfil	error	l chisme	l perfil	error
Parcela 1	1A1	2.32	2.89	0.57	4.26	6.5	2.24
	1A2	2.29	2.1	0.19	4.14	5.71	1.57
	1A3	1.94	2.52	0.58	4.76	7.63	2.87
	1A4	1.91	1.76	0.15	4.22	4.11	0.11
Parcela 2	2A1	0.38	0.87	0.49	3.43	6.84	3.41
	2A2	0.41	0.43	0.02	2.69	8.48	5.79
	2A3	0.37	0.42	0.05	2.47	8.58	6.11
	2A4	0.43	0.31	0.12	2.63	8.89	6.26

CONCLUSIONES

El método fotogramétrico ofrece resultados parecidos a los que se obtienen con el uso de perfilómetros. La dependencia de *l* respecto a la longitud del perfil obliga a ser cautos y, a falta de otros estudios con diferentes longitudes de perfil, afirmar que ésta relación de semejanza solo se ha comprobado hasta el momento para perfiles pequeños (micro-rugosidad). La gran ventaja del método analizado está en la rapidez de adquisición en campo y en la capacidad de cálculos anisotrópicos. Una misma adquisición puede ser utilizada para dirección longitudinal o transversal a la dirección predominante de la rugosidad. Como contrapartida, el método lleva un coste computacional elevado (alrededor de 25 minutos por muestra).

De lo estudiado hasta ahora, el método se complementa con la medida de perfiles, pero no lo sustituye. Futuros trabajos tratarán de analizar el proceso en parcelas con otros grados de rugosidad así como establecer estimadores bidimensionales para la medida de rugosidad.

BIBLIOGRAFÍA

Álvarez-Mozos, J. 2006. Evaluación de la aplicabilidad de la teledetección radar a la estimación de la humedad superficial del suelo en cuencas agrícolas. UPN. Tesis Doctoral.

Foley, J.D., A. van Dam, .K. Feiner and J.F. Hughes. 1990. *Computer Graphics: Principles and Practice* 2nd Ed). Addison-Wesley Publishing Company.

Kruck, E., 2003 *BINGO Bundle Adjustment for Engineering Applications*, Version 5.0. Software Reference Manual.

Schenk, T., 1999. Digital Photogrammetry: Vol. I: Background, *Fundamentals, Automatic Orientation Procedures*. TerraScience.

Toutin, Th., 1995. Generating DEM from Stereo Images with a Photogrammetric Approach: Examples with VIR and SAR Data. *EARSeL. J. Adv. in Rem. Sens.*, 4: 111-117.

Verhoest N.E.C., Lievens H, Wagner W, Alvarez-Mozos J, Moran MS, Mattia F. 2008 On the soil roughness parameterization problem in soil moisture retrieval of bare surfaces from Synthetic Aperture Radar. Sensors. 8: 4213-4248.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos agradecimiento a los miembros de la UPN, que participaron desinteresadamente en la realización del experimento en las fincas de prácticas de esta institución, al MICTY (Proy. ESP2007-65667-C04-04 y AC ESP2007-30837-E) y a la ESA (AO 3230), sin cuya financiación no podría haberse realizado este trabajo.

88