

ESTIMACIÓN DE LA HUMEDAD SUPERFICIAL DEL SUELO MEDIANTE TELEDETECCIÓN RADAR EN PRESENCIA DE UNA CUBIERTA DE CEREAL

J. Álvarez-Mozos, J. Casalí, M. González-Audicana y J. J. López

Universidad Pública de Navarra, Departamento de Proyectos e Ingeniería Rural, Los Tejos, Arrosadia s/n, 31006 Pamplona; jesus.alvarez@unavarra.es

RESUMEN. En este artículo se presentan los resultados de un trabajo sobre estimación de la humedad superficial del suelo en cuencas agrícolas mediante teledetección radar. En concreto, se analiza la posibilidad de aplicar esta técnica a condiciones en las que la cubierta vegetal puede atenuar el coeficiente de retrodispersión (σ^0) observado por los sensores radar. Para ello se emplean cinco imágenes adquiridas por el sensor RADARSAT-1 entre febrero y abril de 2003. La zona de estudio es una pequeña cuenca agrícola experimental, denominada La Tejería, situada en Navarra. Durante el periodo de estudio la mayor parte de la cuenca presentaba un cultivo de cereal de invierno en el estado fenológico 20-30 según la escala Zadocks. El método empleado para estimar la humedad del suelo, corrigiendo a su vez la atenuación causada por la vegetación, es un modelo semi-empírico denominado Water Cloud Model. Este modelo estima el valor de σ^0 de una cubierta en función del contenido de humedad de la vegetación y de la humedad superficial del suelo. El modelo puede ser empleado directamente para estimar la humedad, asumiendo que existe una relación lineal entre ésta y σ^0 , o como herramienta para corregir la atenuación de la vegetación en σ^0 y posteriormente aplicar otros métodos de estimación de humedad más complejos. El modelo se aplicó tanto a escala de parcela como a escala de cuenca. Los resultados obtenidos muestran un buen ajuste con las observaciones aunque, a escala de parcela, la relación lineal entre la humedad del suelo y σ^0 parece ser muy sensible a la variabilidad de la rugosidad superficial del suelo. A escala de cuenca la influencia de la variabilidad de la rugosidad se reduce y los resultados son muy prometedores. El modelo Water Cloud Model parece ser una herramienta útil para corregir la influencia que una cubierta de cereal ejerce en la estimación de la humedad del suelo mediante imágenes radar.

ABSTRACT. This article presents the results of a research on the estimation of surface soil moisture over agricultural watersheds by means of radar remote sensing. In particular, the possibility of using this technique over vegetated surfaces is analyzed; where vegetation cover might

attenuate the backscattering coefficient (σ^0) observed by those sensors. Five RADARSAT-1 images acquired between February and April 2003 have been processed. The studied area consists of a small experimental agricultural watershed, called La Tejería, located in the region of Navarre (north of Spain). During the experimental campaign most of the watershed was covered by winter grains, mostly wheat in the 20-30 phenological stage of the Zadocks scale. The method applied is a semi-empirical model called Water Cloud model. The model estimates the expected σ^0 value from a particular surface as a function of the moisture content of the vegetation cover and the surface soil moisture. The model assumes that there is a linear relationship between the surface soil moisture and σ^0 , and it can be used either to directly estimate the soil moisture, or as a tool for correcting the vegetation attenuation and subsequently using other methods for soil moisture estimation. The model was applied at the field and catchment scale. Obtained results show a good agreement between model simulations and ground observations; although at the field scale the linear relation between σ^0 and the soil moisture is very sensitive to the spatial variability of the surface roughness. At the watershed scale the influence of the roughness variability is reduced and results are encouraging. The Water Cloud model represents a useful technique to correct the influence that the cereal canopies exert on the radar based surface soil moisture estimation.

1. Introducción

La humedad superficial del suelo (*SM*, soil moisture) es una variable que juega un papel crucial en diversos procesos que se dan en la interfaz suelo-atmósfera. Determina la distribución de la radiación solar incidente en flujo de calor sensible o de calor latente, así como la distribución de la precipitación en escorrentía superficial o infiltración. También es un factor determinante en el crecimiento y desarrollo de los cultivos, y de las plantas en general, puesto que determina el contenido de agua

disponible en la parte superior del suelo donde se desarrollan las raíces de la mayoría de los cultivos en sus estados iniciales.

A gran escala interviene en procesos meteorológicos y climáticos puesto que influye en la tasa de evaporación y transpiración (Burman, 2003; Chanzy, 2003) que dará lugar a las nubes y además ejerce un efecto suavizador del clima similar al de los mares pero de menor intensidad (Troch et al. 2003). A escalas medias determina en gran medida procesos hidrológicos y agronómicos como la generación de escorrentía, la evapotranspiración, el desarrollo de los cultivos o las necesidades de riego (Georgakakos y Baumer, 1996; Quesney et al. 2000; Troch et al. 2003). Y a escalas pequeñas influye en procesos biogeoquímicos como el movimiento de solutos en el suelo y por ende en la calidad de las aguas.

En el ámbito de la hidrología, el estudio de la humedad del suelo y su dinámica ha sido identificado por numerosos investigadores como uno de los principales retos debido a su importancia en procesos clave del ciclo hidrológico y a su variabilidad en espacio y tiempo (Rodríguez-Iturbe, 2000). El uso y aplicación de modelos hidrológicos y el grado de fiabilidad de las predicciones que se realicen dependen en gran medida del conocimiento previo que se tenga de la humedad del suelo (Yu et al. 2001).

La caracterización de la humedad superficial del suelo es complicada debido principalmente a su gran variabilidad espacial (Famiglietti et al. 1999; Yu et al. 2001). Las variaciones de la humedad responden en general a los gradientes de precipitación, pero hay otros factores como el tipo de suelo, la vegetación o la topografía, especialmente la pendiente, que determinan su distribución tanto espacial como temporal.

La posibilidad de estimarla a partir de imágenes captadas por satélites es atractiva puesto que permiten adquirir información espacialmente distribuida y con una cierta periodicidad. En los últimos años se han realizado numerosos estudios con el fin de intentar estimar la humedad a partir de imágenes ópticas (Capehart y Carlson, 1997). No obstante, los resultados más prometedores se han obtenido empleando imágenes captadas por sensores radar (Engman, 1991).

La emisión y retrodispersión de microondas por la superficie del suelo dependen en gran medida de la constante dieléctrica de éste (ϵ), que depende de su contenido de humedad (Ulaby et al. 1982).

La estimación de la humedad del suelo a partir de imágenes radar no es sencilla. Hay otros factores además de ϵ que influyen en el coeficiente de retrodispersión observado por los sensores radar (σ^0). La rugosidad superficial, la textura del suelo, el relieve o la presencia de vegetación son aspectos que intervienen también en la retrodispersión y dificultan la estimación de SM . En condiciones de ausencia de vegetación, la rugosidad es la característica de la superficie que junto con SM mayor influencia ejerce en la retrodispersión.

Los primeros estudios de estimación de SM a partir de observaciones radar sobre superficies sin vegetación establecían relaciones lineales entre σ^0 y SM (Ulaby et al. 1982), siendo la pendiente de estas relaciones lineales

función de la rugosidad y la ordenada en el origen función de la textura del suelo (Dobson et al. 1986). Debido a su simplicidad, estos modelos han sido muy usados (Quesney et al. 2000).

Por otro lado, técnicas de detección de cambios como la substracción o el ratio entre imágenes multitemporales y otras específicas de las imágenes radar, como el estudio de la decorrelación de la fase, permiten detectar cambios que se pueden atribuir a variaciones en el contenido de humedad del suelo siempre que se pueda asumir que otras características de la superficie como la rugosidad o vegetación no hayan cambiado.

Además de esto, en los últimos años se han propuesto modelos de dispersión electromagnética que simulan el proceso de retrodispersión en la superficie terrestre. Para condiciones de ausencia de vegetación, se han desarrollado tanto modelos empíricos como el de Oh et al. (1992), modelos de base física como el modelo Integral Equation Method (IEM) (Fung et al. 1992; Fung, 1994), siendo este último el que proporciona resultados más adecuados.

Sin embargo, la estimación de la humedad superficial mediante teledetección radar se complica en el caso de superficies que presentan una cubierta vegetal más o menos desarrollada. La aplicación de esta técnica en zonas forestales o de cultivos de gran desarrollo vegetativo no es viable, dado que en estos casos el pulso de radiación emitido por los sensores radar no es capaz de alcanzar la superficie del suelo. Sin embargo, en cultivos como los cereales la atenuación de la cubierta vegetal no es tan intensa y el estudio de la humedad del suelo es todavía posible siempre que se corrija la atenuación.

El modelo semi-empírico Water Cloud (Attema y Ulaby, 1978) constituye una interesante alternativa a otros métodos con una base física más compleja. En el presente artículo se describe este método y se aplica a una serie de imágenes radar adquiridas sobre Navarra en la primavera de 2003. El principal objetivo del artículo consiste en estudiar la aplicabilidad de la estimación de la humedad mediante teledetección radar en zonas agrícolas de cereal en el periodo en el que la cubierta de cereal presenta un estado de desarrollo considerable.

2. Materiales y métodos

2.1. El modelo Water Cloud

El modelo semi-empírico propuesto por Attema y Ulaby (1978) denominado Water Cloud Model considera que la cubierta vegetal está formada por elementos dispersores idénticos, distribuidos de forma homogénea en todo su volumen a modo de una nube de partículas de agua (Fig. 1).

El fundamento es similar a la solución de primer orden del modelo teórico de Transferencia Radiativa; el coeficiente de retrodispersión de la cubierta σ_{can}^0 (m^2/m^2) se expresa como:

$$\sigma_{can}^0 = \sigma_{veg}^0(\theta_{inc}) + \sigma_{soil}^0(\theta_{inc}) / L^2(\theta_{inc}) \quad (1)$$

donde $\sigma_{veg}^0(\theta_{inc})$ es el coeficiente de retrodispersión debido al volumen de vegetación (m^2/m^2); $\sigma_{soil}^0(\theta_{inc})$ es el coeficiente de retrodispersión proveniente de la superficie del suelo (m^2/m^2); $L(\theta_{inc})$ es el factor de pérdidas por atenuación de la radiación en la cubierta vegetal [-]; y θ_{inc} es el ángulo de incidencia ($^\circ$). El modelo asume que factor de pérdidas $L(\theta_{inc})$ depende únicamente del contenido de humedad de la cubierta vegetal M_V (kg/m^2):

$$L(\theta_{inc}) = \exp(B_1 M_V / \cos \theta_{inc}) \quad (2)$$

donde B_1 es una constante empírica.

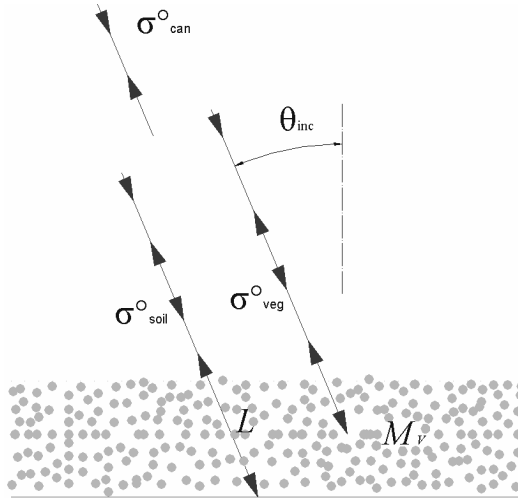


Fig. 1. Esquema general del modelo Water Cloud.

En cubiertas vegetales agrícolas del tipo de los cereales observadas con ángulos de incidencia no muy tendidos, es posible despreciar la contribución de la vegetación al coeficiente de retrodispersión $\sigma_{veg}^0(\theta_{inc})$ y asumir que la cubierta vegetal solamente tiene un efecto atenuante en la retrodispersión (Taconet et al. 1996), obteniendo la siguiente expresión:

$$\sigma_{can}^0 = \sigma_{soil}^0(\theta_{inc}) \cdot \exp\left(\frac{-2B_1 M_V}{\cos \theta_{inc}}\right) \quad (3)$$

El coeficiente de retrodispersión σ^0 se expresa en las denominadas unidades lineales (m^2/m^2), pero debido a que puede variar en varios órdenes de magnitud es más habitual expresarlo en decibelios (dB) para lo cual se realiza una transformación logarítmica. Transformando la ecuación 3 a decibelios se obtiene la expresión de σ_{can}^0 (dB):

$$\sigma_{can}^0(dB) = 10 \log_{10}(\sigma_{can}^0) \rightarrow \sigma_{can}^0(dB) = \sigma_{soil}^0(dB)(\theta_{inc}) + \left(\frac{-20B_1}{\ln 10 \cdot \cos \theta_{inc}}\right) M_V \quad (4)$$

Por último, se puede considerar que para condiciones de rugosidad homogénea σ_{soil}^0 (dB) depende de forma lineal de la humedad del suelo SM (Ulaby et al. 1982), obteniendo:

$$\sigma_{can}^0(dB) = C + D \cdot SM + \left(\frac{-20B_1}{\ln 10 \cdot \cos \theta_{inc}}\right) M_V \quad (5)$$

donde C y D son constantes empíricas que dependen del tipo de suelo y la rugosidad respectivamente (Dobson et al. 1986). Las constantes empíricas que incluye el modelo pueden obtenerse por técnicas de regresión múltiple partiendo de observaciones de σ_{can}^0 (dB) y de mediciones de campo de SM y M_V . Para condiciones de rugosidad homogéneas y un mismo tipo de cultivo, es de esperar que el valor de las constantes se conserve.

La simplicidad del modelo hace que una vez estimadas sus constantes empíricas sea muy simple despejar y obtener estimaciones de la humedad del suelo a partir de observaciones de σ_{can}^0 (dB).

2.2. Área de estudio

El área de estudio es una pequeña cuenca agrícola, situada en el término municipal de Villanueva de Yerri (Navarra), denominada La Tejería, que forma parte de la Red de Cuencas Agrarias Experimentales de Navarra (Donézar y Del Valle Lersundi, 2001). Las coordenadas UTM del punto de desagüe de la cuenca son x: 586.015, y: 4.732.150, huso 30T y datum ED50.

La cuenca tiene una superficie de 160 ha con pendientes bastante homogéneas de un 12 %. Su clima es submediterráneo húmedo, con una temperatura media anual de 13 °C y una precipitación media anual en torno a 700 o 750 mm distribuidos en unos 105 días de lluvia.

Sus suelos son arcillosos, siendo la unidad de suelos más abundante clasificada como Tipic Xerorthent. Estos suelos tienen una profundidad inferior a 1 m y se encuentran en la mayor parte de las laderas. En la parte baja de las laderas estos suelos son algo más profundos y en las vaguadas se encuentran suelos de la unidad Fluventic Xerochrept con profundidades cercanas a 2 m y textura franco arcillosa.

La cuenca se encuentra equipada en su punto de salida con una estación meteorológica e hidrológica automática. La estación proporciona medidas de precipitación, caudales de salida de la cuenca y otras variables meteorológicas cada 10 min y datos diarios de calidad de aguas desde 1994.

Durante el periodo de estudio la mayor parte de la cuenca se encontraba cultivada con cereal de secano excepto cuatro parcelas, en las que se habían sembrado leguminosas a voleo tras compactar el suelo, y una parcela labrada con labor de vertedera (Fig. 2).

Las parcelas de la cuenca se clasificaron en diferentes grupos en función del cultivo y tipo de labor de preparación de suelo que se había aplicado en cada caso (Tabla 1). Las parcelas cultivadas con cereal presentaban un estado fenológico 20-30, ahijado, en la escala Zadocks y tenían una altura de aproximadamente 15 cm. En las parcelas cultivadas con leguminosas las plántulas acababan de germinar.

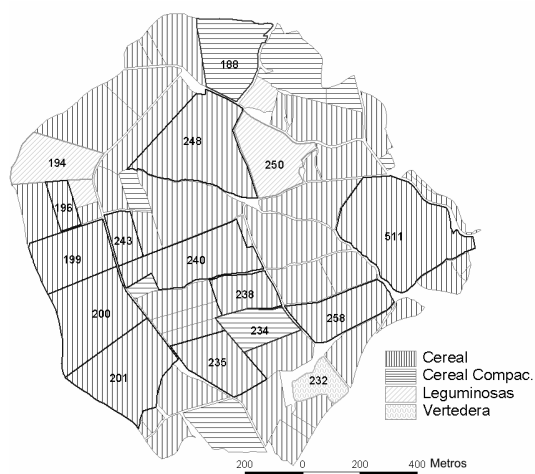


Fig. 2. Cultivos presentes en la cuenca de La Tejería durante el periodo de estudio. Las parcelas de control aparecen regruesadas y mostrando su identificador catastral.

Tabla 1. Número total de parcelas y superficie correspondientes a cada clase y número de parcelas de control.

Clase	Nº parcelas	Área (ha)	Nº parcelas de control
Cereal	52	126,27	11
Cereal compactado	8	17,95	2
Leguminosas	4	10,35	2
Vertedera	1	1,77	1

2.3. Imágenes RADARSAT-1

Para el presente trabajo se contó con cinco imágenes RADARSAT-1 SGF adquiridas sobre Navarra en la primavera de 2003. RADARSAT-1 adquiere imágenes en la banda C (5,3 GHz) y con polarización HH, y permite seleccionar el θ_{inc} entre diferentes modos de haz. En nuestro caso se tomaron imágenes en los modos de haz S1 y S2, cuatro de ellas en pasada descendente y una en pasada ascendente, consiguiendo un total de 5 observaciones en un periodo de aproximadamente un mes. Se seleccionaron los modos de haz S1 y S2 por ser los que proporcionan un θ_{inc} menor, ya que cuanto menor sea θ_{inc} la atenuación de la vegetación y la influencia de la rugosidad se minimizan, siendo estas observaciones más apropiadas para el estudio de la humedad del suelo (Ulaby et al. 1982). En la Tabla 2 se muestran las principales características de las imágenes empleadas.

Tabla 2. Principales características de las imágenes RADARSAT-1 SGF empleadas.

Fecha	Hora	Pasada	Modo de Haz	Ángulo de incidencia (°)	Resolución (m)
27/02	6:23:10	DESC	S1	20-27	24 x 27
06/03	6:23:02	DESC	S2	24-31	20 x 27
23/03	6:23:09	DESC	S1	20-27	24 x 27
30/03	6:18:57	DESC	S2	24-31	20 x 27
02/04	17:50:22	ASC	S1	20-27	24 x 27

2.4. Mediciones de campo

Durante el periodo de estudio se realizó una campaña de mediciones de campo. Se midió el contenido de humedad de los primeros 10 cm de suelo de forma coincidente con las adquisiciones de imágenes empleando una sonda TDR (TRIME FM-3, IMKO GmbH). La medición de la humedad del suelo mediante instrumentos TDR se basa en la medición de la constante dieléctrica, ϵ de los suelos que posteriormente se puede convertir a valores de SM mediante diferentes expresiones. En el caso de la sonda empleada se obtiene directamente un valor de SM calculado mediante un polinomio de tercer grado similar a la ecuación de Topp ajustado para una gran variedad de suelos y tomando como referencia un valor de densidad aparente del suelo (ρ_b) de 1,4 g/cm³. Por lo tanto, si se efectúan medidas de humedad en suelos con densidades aparentes diferentes a 1,4 éstas deben ser corregidas mediante la siguiente ecuación (IMKO, 2001):

$$SM_{corregida} = SM_{TDR} - (12,12 \cdot \rho_b - 17,05) \quad (6)$$

Las mediciones de SM se realizaron mediante un muestreo aleatorio estratificado para cubrir la variabilidad en clases de rugosidad y tipos de suelo presentes en la cuenca y obtener unos valores promedio para la cuenca estadísticamente representativos (Fig. 3). En total se midió la humedad en 60 puntos, en cada uno de ellos se tomaron tres lecturas con la sonda TDR.

Además, se consideraron 16 parcelas de control en las que se midió la humedad en un mínimo de tres puntos. El área de estas parcelas era superior a 1 ha, valor recomendado para reducir la influencia del moteado (speckle) de las imágenes radar y obtener una variabilidad en el coeficiente de retrodispersión en torno a $\pm 0,25$ dB (Wooding et al. 1993).

De forma simultánea se efectuaron mediciones de la rugosidad superficial del suelo en la cuenca. No obstante, dado que en la metodología aplicada en el presente artículo no se requiere de mediciones de parámetros de rugosidad, únicamente se mencionará que la clase que presentaba una menor rugosidad era la denominada *Leguminosas*, seguida de las clases *Cereal compactado*, *Cereal* y por último la clase *Vertedera*.

Durante la campaña experimental, no se tomaron mediciones sobre parámetros de la vegetación. En su lugar, se utilizaron una serie de mediciones tomadas en un ensayo sobre el crecimiento del cereal realizado en las mismas fechas y en condiciones similares, y una imagen Landsat 7 ETM+ adquirida el 17/Mar/03. En el ensayo se midieron periódicamente parámetros de la vegetación como su contenido de humedad (M_V) o el índice de área foliar. Posteriormente estos parámetros se interpolaron para las cinco fechas de adquisición de imágenes. Los valores estimados de M_V se asumieron representativos de las condiciones medias del cereal en La Tejería (Tabla 3).

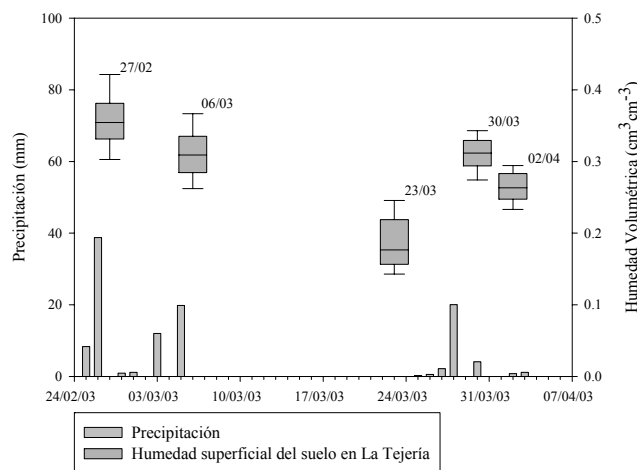


Fig. 3. Medidas de humedad realizadas en la cuenca de La Tejería en las fechas de adquisición de imágenes. Se representa además la precipitación recogida en la cuenca.

Tabla 3. Valores del contenido de humedad de la vegetación M_V interpolados para las fechas de adquisición de imágenes RADARSAT-1.

Fecha	Tiempo tras la siembra (días)	M_V (kg/m ²)
27/02/03	127	0.661
06/03/03	134	0.728
23/03/03	151	1.056
30/03/03	158	1.239
02/04/03	161	1.317

Además de esto, se procesó una imagen Landsat de la que se calculó el índice de vegetación NDVI (Fig. 4). Este índice se puede usar como indicativo de la biomasa de la vegetación (Blindish and Barros, 2002) y se usó para cuantificar las diferencias entre la cobertura vegetal de las diferentes parcelas de la cuenca. El valor medio del NDVI de las parcelas de *Cereal* y *Cereal compactado* era de 0,550 lo que se asumió correspondía a un valor de M_V de 0,940 kg/m² interpolado a partir de las mediciones para el día 17/Mar/03.

Posteriormente, se estimó el parámetro M_V para cada parcela y fecha asumiendo que la evolución temporal de la vegetación en las diferentes parcelas era igual a la evolución de los valores interpolados (Tabla 3), y que las diferencias entre las diferentes parcelas se pueden evaluar mediante el ratio entre el NDVI de cada parcela y el NDVI medio. Se empleó la siguiente expresión para calcular el valor de M_V en cada parcela y día:

$$\frac{M_{V_{i,j}}}{\text{NDVI}_{i,17\text{Marzo}}} = \frac{\overline{M_V}_j}{\overline{\text{NDVI}}_{17\text{Marzo}}} \quad (7)$$

donde $M_{V_{i,j}}$ es el contenido de humedad de la vegetación de la parcela i en el día j ; $\text{NDVI}_{i,17\text{Marzo}}$ es el valor de NDVI de la parcela i calculado a partir de la imagen Landsat del 17 de marzo; $\overline{M_V}_j$ es el contenido de humedad medio de las parcelas de cereal en el día j ; y

$\overline{\text{NDVI}}_{17\text{Marzo}}$ es el valor medio de NDVI de las parcelas de cereal.



Fig. 4. Distribución del índice de vegetación NDVI sobre la cuenca de La Tejería calculado a partir de la imagen Landsat 7 ETM+ del 17 de marzo. Las parcelas de control se encuentran regreesadas.

3. Resultados y discusión

El modelo Water Cloud se aplicó a escala de parcela y a escala de cuenca. A escala de parcela se aplicó de forma independiente a las parcelas pertenecientes a la clase *Cereal* y a las pertenecientes a la clase *Cereal compactado*. En la clase *Cereal*, se emplearon para el ajuste del modelo 11 parcelas con sus cinco respectivas observaciones. El coeficiente de determinación del ajuste del modelo fue de $R^2 = 0.682$ y la ecuación la siguiente:

$$\sigma_{can}^0 = \frac{-1.754M_V}{\cos\theta_{inc}} + 0.160 \cdot SM - 9.691 \quad (8)$$

En la clase *Cereal compactado* el número de parcelas era sólo dos y el coeficiente de determinación obtenido de $R^2 = 0.836$.

$$\sigma_{can}^0 = \frac{-0.764M_V}{\cos\theta_{inc}} + 0.252 \cdot SM - 14.367 \quad (9)$$

En la ecuación 9, se observa que la constante D que multiplica la humedad del suelo es significativamente mayor que en la ecuación 8. Esto se debe a la menor rugosidad de las parcelas de *Cereal compactado* que hace que el coeficiente de retrodispersión sea más sensible a la humedad del suelo.

A escala de cuenca, el coeficiente de determinación del modelo fue de $R^2 = 0.926$ y la ecuación obtenida muy similar a la de las parcelas de la clase *Cereal*:

$$\sigma_{can}^0 = \frac{-1.364M_V}{\cos \theta_{inc}} + 0.161 \cdot SM - 10.329 \quad (10)$$

Los altos valores del coeficiente de determinación indican un buen funcionamiento del modelo sobre todo a escala de cuenca, pero también a escala de parcela. La variabilidad en las condiciones de rugosidad entre las diferentes parcelas pertenecientes a una misma clase, especialmente en las parcelas de la clase *Cereal*, hace que el ajuste sea algo peor.

4. Conclusiones

La aplicación del modelo Water Cloud ha resultado satisfactoria tanto a escala de cuenca como a escala de parcela. A escala de parcela la variabilidad espacial de la rugosidad hace que los valores del coeficiente de determinación se reduzcan, especialmente en el caso de las parcelas de la clase *Cereal*. A escala de cuenca el coeficiente de determinación es de $R^2 = 0.926$.

En campañas futuras, se tratarán de validar las expresiones obtenidas en este estudio que, en principio, deben ser válidas para condiciones de rugosidad similares. Además, se estudiará la posibilidad de corregir la atenuación de la vegetación empleando imágenes ópticas multitemporales para la estimación de M_V . Esto facilitaría en gran medida la aplicación del modelo.

A pesar de su simplicidad, el método que se presenta en este artículo puede constituir una herramienta de gran utilidad para el estudio de la humedad del suelo en zonas agrícolas de cereal de secano. En estas zonas la rugosidad, que es el parámetro que más limita la aplicación de este método, se mantiene aproximadamente constante a lo largo del ciclo de cultivo, lo que posibilita la estimación de la humedad mediante durante todo ese periodo.

Agradecimientos. Este trabajo se ha llevado a cabo en el marco del proyecto del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica REN2003-03028/HID y del proyecto de la agencia espacial canadiense (CSA) Data for Research Use n° DRU-10-02.

Referencias

Attema, E.W.P y F.T. Ulaby, 1978. Vegetation modelled as a water cloud. *Radio Sci.* 13(2): 357-364 pp.

- Bindlish, R. y A.P. Barros, 2001. Parameterization of vegetation backscatter in radar-based soil moisture estimation. *Remote Sens. Environ.* 76(1): 130-137 pp.
- Burman, R.D., 2003. Evapotranspiration formulas. In *Encyclopedia of water science*, Editores: B.A. Stewart y T.A. Howell Editors, Marcel Dekker Ed., USA.
- Capehart, W. y T.N. Carlson, 1997. Decoupling of surface and near-surface soil water content: a remote sensing perspective. *Water Resour. Res.* 33(6): 1383-1395 pp.
- Chanzy, A., 2003. Evaporation from soils. In: *Encyclopedia of water science*, Editores: B.A. Stewart y T.A. Howell Editors, Marcel Dekker Ed., USA.
- Dobson, M.C. y F.T. Ulaby, 1986. Active microwave soil moisture research. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 24(1): 23-36 pp.
- Donézar, M. y J. Del Valle de Lersundi, 2001. Red de cuencas experimentales agrarias de navarra. XIX Congreso Nacional de Riegos. Zaragoza.
- Engman, E.T., 1991. Applications of Microwave remote sensing of soil moisture for water resources and agriculture. *Remote Sens. Environ.* 35: 213-226 pp.
- Famiglietti, J.S., J.A. Devereaux, C.A. Laymon, T. Tsegaye, P.R. Houser, T.J. Jackson, S.T. Graham, M. Rodell y P.J. van Oevelen, 1999. Ground based investigation of soil moisture variability within remote sensing footprints during the SGP 97 hydrology experiment. *Water Resour. Res.* 35(6): 1839-1851 pp.
- Fung, A.K., Z. Li, y K.S. Chen, 1992. Backscattering from a randomly rough dielectric surface. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* 30(2): 356-369 pp.
- Fung, A.K., 1994. *Microwave Scattering and Emission Models and their Applications*. Artech House, Inc., Norwood, USA.
- Georgakakos, K.P. y O.W. Baumer, 1996. Measurement and utilization of on-site soil moisture data. *J. Hydrol.* 184: 131-152 pp.
- IMKO, 2001. *TRIME-FM User Manual*. IMKO Micromodultechnik GmbH, Ettlingen, Germany.
- Oh, Y., K. Sarabandi y F.T. Ulaby, 1992. An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* 30(2): 370-381 pp.
- Quesney, A., S. Le Hégarat-Masclé, O. Taconet, D. Vidal-Madjar, J.P. Wigneron, C. Loumagne y M. Normand, 2000. Estimation of watershed soil moisture index from ERS/SAR data. *Remote Sens. Environ.* 72(3): 290-303 pp.
- Rodríguez-Iturbe, I., 2000. Ecohydrology: A hydrologic perspective of climate-soil-vegetation dynamics. *Water Resour. Res.* 36: 3-9 pp.
- Taconet, O., D. Vidal-Madjar, C. Emblanch y M. Normand, 1996. Taking into account vegetation effects to estimate soil moisture from C-band radar measurements. *Remote Sens. Environ.* 56: 52-56 pp.
- Troch, P.A., C. Paniconi, y D. McLaughlin, 2003. Catchment-scale hydrological modeling and data assimilation. *Advances in Water Resources*, 26(2): 131-135 pp.
- Ulaby, F.T., R.K. Moore, y A.K. Fung, 1982. *Microwave Remote Sensing, Active and Passive, Volume I: Radar Remote Sensing: Fundamentals and Radiometry*. Artech House, Inc. Norwood, USA.
- Wooding, M.G., G.H. Griffiths, R. Evans, P. Bird, D. Kenward y G.E. Keyte, 1993. Temporal monitoring of soil moisture using ERS-1 SAR data. *Proceedings of the First ERS-1 Symposium: space at the service of our environment*, 4-6 November 1992, Cannes, France: 641-648 pp.
- Yu, Z., T.N. Carlson, E.J. Barron y F.W. Schwartz, 2001. On evaluating the spatial temporal variation of soil moisture in the Susquehanna river basin. *Water Resour. Res.* 37(5): 1313-1326 pp.