

Análisis comparativo de dos modelos de retrodispersión para la estimación de la humedad del suelo mediante sensores radar.

Jesús Álvarez-Mozos, Javier Casali y María González-Audicana

Dep. Proyectos e Ingeniería Rural. Universidad Pública de Navarra. Edif. Los Tejos, Arrosadia s/n, 31006 Pamplona, Navarra. jesus.alvarez@unavarra.es, jcs@unavarra.es, maria.audicana@unavarra.es.

Resumen

En este trabajo, llevado a cabo en una pequeña cuenca agrícola de Navarra, se comparan los valores del coeficiente de retrodispersión (σ^0) directamente obtenidos de imágenes RADARSAT-1 con los valores de σ^0 estimados a partir de las características de la superficie (humedad y rugosidad) empleando dos modelos de retrodispersión: el modelo *Integral Equation Method* (IEM) y el modelo de Oh (OM). Los resultados obtenidos muestran que a escala de cuenca el modelo IEM simula el σ^0 con una gran fiabilidad mientras que el modelo OM lo subestima considerablemente. A escala de parcela se observa una gran dispersión, probablemente debido a una inadecuada caracterización de la rugosidad superficial del suelo. Este aspecto parece resultar clave de cara a la correcta simulación de σ^0 y a la posterior estimación de la humedad del suelo a partir de imágenes radar.

1. Introducción

La humedad superficial del suelo (SM) es una variable que juega un papel vital en diversos procesos de tipo hidrológico, meteorológico y agronómico. Es fundamental en el control de numerosos procesos como la transpiración, la generación de escorrentía, la asimilación de carbono o la absorción de nutrientes por las plantas. Debido a su impacto en estos y otros procesos, la humedad del suelo es la principal variable hidrológica que sintetiza la interacción entre el clima, el suelo y la vegetación [1].

Dada su alta variabilidad en el espacio y tiempo es una variable difícil de estimar, lo que hace que la descripción de los procesos en los que influye sea a menudo incorrecta. La posibilidad de estimar SM mediante teledetección radar ha sido intensamente investigada en las últimas décadas. El coeficiente de retrodispersión (σ^0) medido por los sensores radar depende de características geométricas y dieléctricas de la superficie. En el caso de suelos desnudos o con vegetación somera,

las características dieléctricas de la superficie están directamente relacionadas con el contenido de humedad de la capa superficial del suelo.

Hasta la fecha se han propuesto tres tipos de metodologías que permiten la extracción de información sobre SM a partir de teledetección radar. A) regresiones lineales entre σ^0 y SM , b) estudio de la evolución multitemporal de SM mediante técnicas de detección de cambios y c) aplicación de modelos electromagnéticos que relacionan σ^0 con parámetros del terreno.

Las regresiones lineales, además de ser empíricas son muy sensibles a los cambios en las condiciones de rugosidad del terreno o de la adquisición de las imágenes. Por otro lado, las técnicas de detección de cambios lejos de proporcionar información cuantitativa sobre SM son sólo capaces de reflejar su dinámica y además, son también sensibles a variaciones en las condiciones de adquisición de imágenes. Por lo tanto, la metodología en principio más adecuada es el empleo de modelos electromagnéticos.

En este trabajo se comparan los resultados obtenidos tras la aplicación de dos de los modelos electromagnéticos que hasta la fecha han mostrado mejores resultados. Estos son el modelo de base física *Integral Equation Method* (IEM) desarrollado por Fung *et al.* [2] y Fung [3] y el modelo empírico de Oh *et al.* [4] (OM). Además, se analizará la aplicabilidad de éstos para la estimación de la humedad superficial del suelo. Para ello se empleará una serie de imágenes adquiridas por el sensor RADARSAT-1 en la primavera de 2003 que cubren por completo el área de estudio.

2. Área de estudio

El trabajo se ha llevado a cabo en una pequeña cuenca agrícola experimental denominada La Tejería, situada en Navarra. Una descripción detallada de la cuenca puede obtenerse en [5] y [6].

Durante el periodo de estudio la mayor parte de la cuenca se encontraba cultivada con cereal de secano. Las parcelas se clasificaron en grupos en función del cultivo y laboreo aplicado (Figura 1).

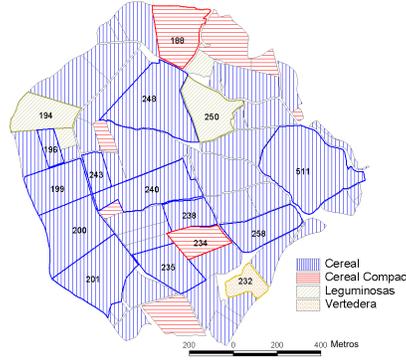


Figura 1: Cultivos presentes en la cuenca de La Tejería durante el periodo de estudio.

Durante el periodo de estudio se realizó una campaña de mediciones de campo para caracterizar in situ SM , la rugosidad superficial y las características de la vegetación.

SM se midió de forma coincidente con las adquisiciones de imágenes empleando una sonda TDR. Se midió la humedad media de la cuenca y se tomaron además 16 parcelas de control (Figura 1).

La rugosidad superficial se midió mediante un perfilador de varillas [6]. Ésta se consideró invariable en el tiempo y homogénea entre las parcelas pertenecientes a una misma clase de laboreo. Los perfiles se procesaron según el procedimiento propuesto por [7] para calcular los parámetros s (desviación estándar de las alturas de la superficie) y l (longitud de correlación) para cada clase (Tabla 1) [6].

Tabla 1: Parámetros de rugosidad s y l para cada clase. Se da el valor medio junto con su desviación típica (cm)

	\bar{s}	σs	\bar{l}	σl
Leguminosas	0.47	0.09	2.44	2.84
Cereal Comp.	0.89	0.27	3.62	3.26
Cereal	1.05	0.34	3.49	2.63
Vertedera	2.57	0.72	7.41	2.35

Las parcelas pertenecientes a las clases *Cereal* y *Cereal Compactado* presentaban un cultivo de alrededor de 10 – 15 cm de altura. Se midieron las características de la vegetación (LAI y contenido de humedad de la cubierta) para posteriormente

corregir la influencia que la vegetación ejerce en σ^0 según el modelo *Water Cloud* [6].

3. Imágenes empleadas

Para el presente trabajo se contó con cinco imágenes RADARSAT-1 SGF (banda C, polarización HH) adquiridas sobre Navarra en la primavera de 2003 (Tabla 2).

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

Fecha	Modo	θ_{inc} ($^{\circ}$)	Resolución (m)
27/02	S1	20-27	24 x 27
06/03	S2	24-31	20 x 27
23/03	S1	20-27	24 x 27
30/03	S2	24-31	20 x 27
02/04	S1	20-27	24 x 27

4. Modelos de retrodispersión

4.1. Modelo IEM [2], [3]

La versión del modelo IEM utilizada en este trabajo es una versión simplificada aplicable en condiciones de rugosidad baja o media [8]:

$$ks < 3 \quad m < 0.4$$

donde k , es el número de onda $k = 2\pi/\lambda$ y m , es la pendiente de la rugosidad $m = s/l$.

El coeficiente de retrodispersión (σ^0) en la polarización HH viene dado por la ecuación:

$$\sigma_{HH}^0 = \frac{k^2}{2} e^{(-2k_z s^2)} \sum_{n=1}^{\infty} \sigma^{2n} |I_{HH}^n|^2 \frac{W^n(-2k_x, 0)}{n!}$$

donde, $k_z = k \cos \theta_{inc}$; $k_x = k \sin \theta_{inc}$; $W^{(n)}(u, v)$, es el espectro de rugosidad de la superficie, en el caso de superficies con funciones de autocorrelación exponenciales $W^{(n)}$, se puede expresar como [3]:

$$W_{exp}^{(n)} = \frac{l^2}{n^2} \left[1 + \left(\frac{2kl \sin \theta}{n} \right)^2 \right]^{-1.5}$$

El término I_{HH}^n se expresa como [3]:

$$I_{HH}^n = (2k_z)^n f_{HH} e^{(-s^2 k_z^2)} + k_z^n \frac{[F_{HH}(-k_x, 0) + F_{HH}(k_x, 0)]}{2}$$

donde, f_{HH} son los coeficientes de campo de Kirchoff y F_{HH} los coeficientes de campo complementarios que se pueden calcular a partir del coeficiente de reflexión de Fresnel (R_{\perp}) y la constante dieléctrica del suelo (ϵ).

$$f_{HH} = -2R_{\perp} / \cos\theta_{inc}$$

$$F_{HH}(-k_x, 0) + F_{HH}(k_x, 0) = \frac{2\sin^2\theta_{inc}(1+R_{\perp})^2}{\cos\theta_{inc}} \left[\frac{\epsilon - \sin^2\theta_{inc} - \cos^2\theta_{inc}}{\cos^2\theta_{inc}} \right]$$

$$R_{\perp} = \frac{\cos\theta_{inc} - \sqrt{\epsilon - \sin^2\theta_{inc}}}{\cos\theta_{inc} + \sqrt{\epsilon - \sin^2\theta_{inc}}}$$

En el presente trabajo, ϵ se calcula a partir de SM siguiendo el algoritmo de Dobson *et al.* [9].

4.2. Modelo OM [4]

El modelo empírico OM es aplicable bajo un amplio rango de condiciones:

$$\begin{aligned} 0.1 < ks < 6.0 & \quad 10^{\circ} < \theta_{inc} < 70^{\circ} \\ 2.6 < kl < 19.7 & \quad 0.09 < SM < 0.31 \end{aligned}$$

El modelo expresa el coeficiente de retrodispersión (σ^0) en la polarización HH según:

$$\sigma_{HH}^0 = g\sqrt{p} \cos^3\theta_{inc} [\Gamma_{\perp} + \Gamma_{\parallel}]$$

donde,

$$g = 0.7 \left[1 - e^{-0.65(ks)^{1.8}} \right]$$

$$\sqrt{p} = \sqrt{\frac{\sigma_{HH}^0}{\sigma_{VV}^0}} = 1 - \left(\frac{2\theta_{inc}}{\pi} \right)^{3\Gamma_0} \cdot e^{-ks}$$

$$\Gamma_{\perp} = \left| \frac{\cos\theta_{inc} - \sqrt{\epsilon - \sin^2\theta_{inc}}}{\cos\theta_{inc} + \sqrt{\epsilon - \sin^2\theta_{inc}}} \right|^2$$

$$\Gamma_{\parallel} = \left| \frac{\epsilon \cos\theta_{inc} - \sqrt{\epsilon - \sin^2\theta_{inc}}}{\epsilon \cos\theta_{inc} + \sqrt{\epsilon - \sin^2\theta_{inc}}} \right|^2$$

$$\Gamma_0 = \left| \frac{1 - \sqrt{\epsilon}}{1 + \sqrt{\epsilon}} \right|^2$$

5. Resultados

Los resultados comparan las predicciones de σ^0 realizadas por los dos modelos con las observaciones de RADARSAT-1 tanto a escala de parcela como a escala de cuenca.

5.1. Escala de parcela

A pesar de la gran dispersión que se observa, el modelo IEM parece simular de forma aceptable el σ^0 , excepto en el caso de las parcelas correspondientes a la labor de vertedera cuyas condiciones de rugosidad rondan los límites de aplicabilidad del modelo (Figura 2a y Tabla 3).

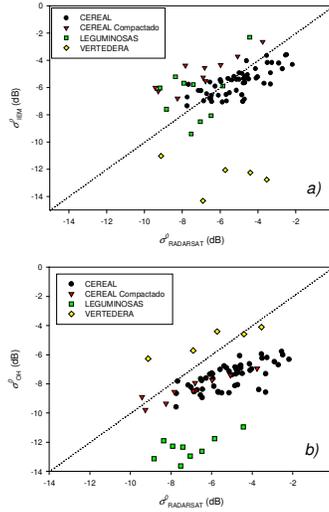


Figura 2: Valores de σ^0 simulados por el modelo IEM a) y OM b) frente a los observados por RADARSAT-1 a escala de parcela.

El modelo OM subestima el σ^0 excepto en el caso de las parcelas de vertedera, especialmente a valores altos de σ^0 . La dispersión es también alta en este caso (Figura 2b y Tabla 3).

Tabla 3: Valores de error medio cuadrático (emc) obtenidos con los modelos IEM y OM a escala de parcela y de cuenca.

Escala de parcela Clase	emc σ^0 IEM (dB)	emc σ^0 Oh (dB)
Cereal	1,063	2,581
Cereal Comp.	2,238	1,659
Leguminosas	2,047	5,345
Vertedera	7,003	1,530
Escala de cuenca	0,616	1,775

5.2. Escala de cuenca

A la escala de cuenca, el modelo IEM parece simular de forma adecuada el σ^0 (Figura 3a y Tabla 3) mientras que el modelo OM lo subestima de forma sistemática (Figura 3b y Tabla 3).

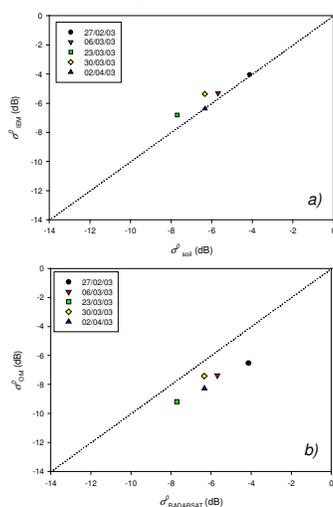


Figura 3: Valores de σ^0 simulados por el modelo IEM a) y OM b) frente a los observados por RADARSAT-1 a escala de cuenca.

6. Conclusiones

En general el modelo OM parece subestimar los valores de σ^0 excepto en parcelas muy rugosas. Esta subestimación es más evidente cuando los valores de σ^0 son altos, probablemente debido su límite de aplicabilidad en condiciones de SM alta. Los resultados obtenidos con el modelo IEM a escala de cuenca son muy prometedores.

A escala de parcela las simulaciones de ambos modelos muestran una gran dispersión que puede deberse al hecho de que la variabilidad de la rugosidad entre las diferentes parcelas pertenecientes a una misma clase no se ha tenido en cuenta. Una correcta caracterización de la rugosidad superficial parece clave para simular de forma fiable el valor de σ^0 y poder realizar estimaciones de humedad a partir de imágenes radar.

7. Agradecimientos

Este trabajo se ha llevado a cabo en el marco del proyecto del Plan Nacional de Investigación Científica REN2003-03028/HID. Asimismo, las imágenes RADARSAT-1 se adquirieron gracias al proyecto Data for Research Use n° DRU-10-02 de la agencia espacial canadiense (CSA).

8. Referencias

- [1] Rodríguez-Iturbe, I., and A. Porporato, *Ecohydrology of Water-Controlled Ecosystems: Soil Moisture and Plant Dynamics*, Cambridge Univ. Press, New York, 2004.
- [2] Fung, A.K., Z. Li, and K.S. Chen, "Backscattering from a randomly rough dielectric surface", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 30(2), 356–369, 1992.
- [3] Fung, A.K., *Microwave Scattering and Emission Models and their Applications*, Artech House, Norwood, 1994.
- [4] Oh, Y., K. Sarabandi, and F.T. Ulaby, "An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 30(2), 370–381, 1992.
- [5] Donézar, M. and J. Del Valle de Lersundi, "Red de cuencas experimentales agrarias de Navarra", *XIX Congreso Nacional de Riegos*, Zaragoza, 2001.
- [6] Álvarez, J., N.E.C. Verhoest, J. Casalí, M. González-Audicana, and J.J. López, "Surface soil moisture retrieval on agricultural catchments of Navarre, Spain through RADARSAT-1 SAR data: first results", *Proc. of SPIE, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology VI*, 5568, 159–170, Maspalomas, 2004.
- [7] Davidson, M.W.J., F. Mattia, G. Satalino, N.E.C. Verhoest, T. Le Toan, M. Borgeaud, J.M.B. Louis and E. Attema, "Joint statistical properties of RMS height and correlation