

1
2 ESTIMACIÓN DE LA HUMEDAD SUPERFICIAL DEL SUELO MEDIANTE
3 DATOS SAR EN BANDA X
4

5 Héctor Salgado^{1,2}, Stella Maris Zabala¹, Catalina Romay¹, Monique Bernier³, Andres
6 Jacome³, Karem Chokmani³

7
8
9 ¹ Riego y Drenaje, Facultad de Agronomía de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina

10
11 ² Meteorología, Servicio de Hidrografía Naval, Ministerio de Defensa, Argentina

12
13 ³ Institut National de la Recherche Scientifique, Université du Québec, Québec,
14 Canada

15
16 Correo electrónico: Héctor Salgado, hsalgado@agro.uba.ar
17

18 RESUMEN

19 El objetivo de este estudio es la estimación y el mapeo de la humedad del suelo a partir de
20 imágenes Cosmo-Skymed (Banda X), adquiridas sobre una cuenca agrícola situada en el
21 centro de la provincia de Buenos Aires, Argentina (Latitud: 37°S; Longitud: 60°W
22 aproximadamente). Se emplea una aproximación empírica, mediante correlación entre el
23 coeficiente de retrodispersión (σ^0) y las mediciones de humedad del suelo (HS), obtenidas
24 simultáneamente con el pasaje satelital. La humedad volumétrica superficial (0 a 10 cm) del
25 suelo fue medida mediante el método gravimétrico en 15 parcelas agrícolas (sitios). La
26 relación lineal entre la retrodispersión de la señal radar (σ_0) y las mediciones de HS [HS(%)
27 = $b + a \cdot \sigma^0(\text{dB})$] presenta diversos coeficientes y ajustes (r^2), dependiendo de la dirección
28 orbital y la polarización (desde $r^2 = 0,28$ para datos VV Ascendente hasta $r^2 = 0,69$ para
29 HH Descendente). Aplicando las ecuaciones correspondientes, las imágenes se
30 transformaron de σ^0 a HS(%), obteniendo los mapas de HS (para cada polarización y tipo
31 de órbita).

32 Se realizó una validación cruzada entre datos de HS medida vs. estimada, calculando el
33 Error Cuadrático Medio (RMSE) y el Error Medio Cuadrático Normalizado (NMSE). Los
34 mejores resultados se obtuvieron con las imágenes Descendentes, con $6,3\% < \text{RMSE} <$
35 $6,9\%$ y $1,6 < \text{NMSE} < 2,0\%$. Se comparan los resultados con otras experiencias, y se
36 plantean expectativas futuras.

37
38 **Palabras clave:** radar, Cosmo-Skymed, humedad del suelo, abordaje empírico, cuenca
39 agrícola.
40

41

42

43 **SURFACE SOIL MOISTURE ESTIMATION WITH X BAND SAR DATA**

44

45

ABSTRACT

46

47 The aim of this study is to estimate and map soil moisture (SM) from Cosmo-Skymed (X
48 band) images acquired over an agricultural basin located in the center of the province of
49 Buenos Aires, Argentina (Latitude: 37°S; Longitude: 60°W approximately). The adopted
50 approach is empirical, with a correlation between backscattering coefficient (σ^0) and soil
51 moisture (SM) measures, obtained simultaneously with a satellite pass. Surface (0 to 10
52 cm) soil moisture was measured by means of the gravimetric method in 15 agricultural
53 parcels (sites). The linear relation between radar signal backscattering (σ^0) and field
54 measured SM [$SM(\%) = b + a \cdot \sigma^0(\text{dB})$] shows diverse coefficients and adjustments (r^2),
55 depending on orbit direction and polarization (from $r^2 = 0,28$ for VV Ascending to $r^2 = 0,69$
56 for HH Descending). Using corresponding relation equations, images were translated from
57 σ_0 into SM (%), obtaining the SM maps (for each polarization and orbit pass). Cross-
58 validation between measured and calculated SM was performed, computing the Root Mean
59 Square Error (RMSE) and Normalized Mean Square Error (NMSE). Better results were
60 obtained from Descending images, with $6,3\% < RMSE < 6,9\%$ and $1,6 < NMSE < 2,0\%$.
61 Results are compared with other experiences, and future expectations are outlined.

62

63 **Keywords:** radar, Cosmo-Skymed, soil moisture, empirical approach, agricultural basin.

64

65 **1) INTRODUCCIÓN**

66

67 La humedad superficial del suelo (HS), indicadora principalmente del agua en estado
68 líquido en la zona no saturada, juega un rol decisivo en el ciclo hidrológico, participando
69 activamente en los flujos del C y de energía en la interfase suelo-vegetación-atmósfera.

70 Su estimación precisa, considerando su amplia variabilidad espacial y temporal, resulta
71 fundamental para estudios y tareas ambientales y agrícolas, contribuyendo, entre otras
72 aplicaciones, al monitoreo del estado hídrico de suelos en producción agrícola (Moran *et*
73 *al.*, 2004).

74 Aun cuando, desde los años 70, se ha estimado indirectamente la HS mediante sensores
75 satelitales ópticos y térmicos, recién a partir de los 90 la teledetección satelital de
76 microondas ha demostrado que puede medirse directamente, de manera rutinaria, con
77 diferente resolución espacial y frecuencia temporal (Wang y Qu, 2009).

78 Los sistemas activos, como el Radar de Apertura Sintética (Synthetic Aperture Radar
79 SAR), tienen una amplia cobertura espacial (franjas de 30 a 100 km de ancho), con una

Artículo en edición

80 frecuencia temporal mensual, alcanzan una resolución espacial entre 1 y 30 m, y pueden
81 captar imágenes independientemente de las condiciones lumínicas (tanto de día como de
82 noche) y de nubosidad. Los radares satelitarios emiten, de manera ortogonal a su trayectoria
83 y oblicua respecto a la superficie terrestre, una onda electromagnética, que alcanza el suelo
84 y sufre dispersión de diverso tipo. Parte de la señal retorna al sensor, en forma de energía
85 retrodispersada, y su magnitud se expresa mediante el coeficiente de retrodispersión " σ^0 ",
86 siendo su unidad de medida el decibel (dB).

87 La capacidad de los SAR para detectar la humedad en el suelo radica en que la
88 retrodispersión captada depende de las características geométricas y físico-químicas de la
89 escena. En particular, σ^0 es función de la constante dieléctrica " ϵ " del suelo, la cual se
90 incrementa fuertemente al aumentar su contenido de agua (Ulaby, 1974; Schugge y
91 Wang, 1980).

92 La intensidad de la respuesta a la señal radar depende de factores, tanto de la escena o
93 blanco (geometría y rugosidad, HS), como del sistema sensor (polarización, longitud de
94 onda " λ ", ángulo de incidencia " ϕ "), y de la relación entre el terreno y la dirección de la
95 trayectoria satelital (órbita ascendente o descendente).

96 En general, el σ^0 es función de la HS de un estrato, cuyo espesor depende de las
97 propiedades de penetración en el suelo para esas longitudes de onda (λ). También depende
98 de la rugosidad del suelo y de la vegetación. Las variaciones de σ^0 con la HS, rugosidad de
99 superficie, ángulo de incidencia, longitud de onda y textura del suelo vienen siendo
100 estudiados desde hace más de tres décadas (Ulaby y Dobson, 1988).

101 En lo referente a la polarización de un radar, se caracteriza por la de su onda emitida y por
102 la componente medida de retorno. Por ejemplo, VV (Vertical-Vertical) significa que emite
103 una onda polarizada verticalmente (en realidad su campo eléctrico) y mide la componente
104 vertical de la onda recibida. Los antecedentes bibliográficos (Ulaby y Batlivala, 1976;
105 Brisco *et al.*, 2008) señalan que, para suelos desnudos o con baja cobertura (menos de 15
106 cm de altura), la polarización HH es mejor que la VV para estimar la HS. En efecto, la
107 polarización VV presenta una retrodispersión general más baja, produciendo una menor
108 relación señal/ruido, lo cual reduce la sensibilidad a la humedad del suelo. La consideración
109 de mejor polarización HH para estimación de HS fue comprobada mediante análisis de
110 sensibilidad utilizando modelos teóricos de dispersión de superficie por Touré *et al.* (1994).

111 En cuanto a la λ , la penetración en el suelo es mayor, cuanto mayor sea λ . En general, a
112 constancia de los demás factores del radar (ángulo de incidencia, polarización, banda), la
113 penetración es una fracción de la longitud de onda (de $\frac{1}{2}$ a $\frac{1}{3}$). O sea, un fino estrato
114 superficial de 1 a 1,5 cm para la Banda X (Ulaby *et al.*, 1996).

115 Por otra parte, el comportamiento (reflexión y penetración) de una onda radar sobre una
116 superficie depende del ángulo entre la dirección del haz y la normal a la superficie (ángulo
117 de incidencia " ϕ "). Como regla general, la penetración de las ondas es tanto más profunda
118 cuanto más pequeño es ϕ .

119 Las imágenes SAR COSMO-Skymed, utilizadas en este trabajo, corresponden a la Banda X
120 ($\lambda= 3,1\text{cm}$; $f= 9,6\text{ GHz}$), modo Ping-Pong, aportando datos en 2 polarizaciones: HH
121 (Horizontal-Horizontal) y VV.

122 La interpretación de la señal SAR se basa en la comprensión de la relación entre σ^0 y las

Artículo en edición

123 propiedades dieléctricas y geométricas del blanco. Para definir esta relación se
 124 desarrollaron distintas aproximaciones. Abordajes estadísticos, con diversos algoritmos
 125 (Bayesiano, Redes Neuronales, Minimización Nelder-Mead, regresiones, etc.), fueron
 126 tratados por Santi *et al.*, 2005. En el presente trabajo se utilizó la regresión entre σ^0 y
 127 parámetros geofísicos (humedad, rugosidad, etc.), la cual se manifiesta de manera
 128 aproximadamente lineal, para el rango de valores frecuentes de HS, en diversos estudios
 129 (Brisco *et al.*, 1997; Santi *et al.*, 2005; Aubert *et al.*, 2011). En el caso de suelos desnudos,
 130 la relación se expresa por:

131
 132
$$\sigma^0 \text{ (dB)} = a \cdot \text{HS (\%)} + b \quad (1)$$

133
 134 donde “b” (ordenada al origen) representa la contribución de la rugosidad de la superficie
 135 (por cobertura vegetal) y “a” (pendiente) es la contribución de la HS y de la configuración
 136 radar.

137 La inversión de (1) permite la estimación de HS directamente a partir de la retrodispersión
 138 registrada en la imagen (Chanzy *et al.*, 1994):

139
 140
$$\text{HS (\%)} = m + n \cdot \sigma^0 \text{ (dB)} \quad (2)$$

141
 142 Numerosos estudios sobre la estimación de la HS en diversos ambientes han sido
 143 recopilados por Engman (2000), Moran *et al.* (2004), Álvarez-Mozos y Crespo (2005),
 144 Dabrowska-Zielinska *et al.*(2005) y Wang y Qu (2009). Los mismos se detallan y
 145 comparan en la Sección “3) Resultados y Discusión” del presente trabajo.

146
 147 En una zona productiva agrícola de la Pampa Argentina se obtuvieron buenos ajustes
 148 (coeficiente de determinación $r^2 = 0,68$; límites de confianza 95%) en la relación σ^0 vs.
 149 HS con sistemas en Banda C y $\phi=24^\circ$ (VV ERS y HH Radarsat), para condiciones en las
 150 cuales la cobertura vegetal no es densa y en función de la polarización de la señal (Salgado
 151 *et al.*, 2001; Salgado, 2012).

152 El objetivo del presente trabajo es medir el grado de relación entre HS, captada
 153 simultáneamente con el pasaje satelital en una red de medición implementada “ad hoc”, y
 154 σ^0 , registrado con imágenes SAR en banda X, y la confección de mapas resultantes de
 155 dicha relación.

156

157

158 **2) MATERIALES Y METODOS**

159

160 ***Zona piloto y sitios de medición de HS***

161 Dada la naturaleza hidrológica del estudio, se definió una cuenca hídrica como marco de
 162 referencia física del mismo. Se seleccionó la Cuenca del Arroyo Pablo Acosta (Fig.1),
 163 afluente del Arroyo de Los Huesos, ubicada en el centro de la provincia de Buenos Aires,

Artículo en edición

164 Argentina (Latitud 37°S, Longitud 60°W). Se encuentra en la región serrana de la
165 denominada Pampa Húmeda, cuya principal actividad económica es la agropecuaria.

166

167 Fig. 1: Ubicación geográfica de la Zona Piloto, y detalle de la Cuenca del A. Los Ángeles
168 (marcada con línea roja) y sitios de medición de HS (números arábigos).

169

170 Los suelos predominantes corresponden a la siguiente taxonomía (US Soil Survey Staff,
171 1975): Orden: Molisoles; Suborden: Udoles; Grandes Grupos: Argiudoles y Hapludoles.
172 Los Argiudoles son el gran Grupo más representativo de los Udoles. Su perfil típico
173 muestra la sucesión de horizontes “A1 – B1 – B2t – B3 – C”, con alto contenido de materia
174 orgánica en el A, y arcilla en el B2t. Las clases texturales predominantes son: franca y
175 franca arcillo-limoso.

176

177 Se realizaron campañas de medición de la HS en 15 sitios (Fig.1), de manera simultánea
178 con el pasaje del satélite. Se determinó la densidad aparente y la humedad volumétrica
179 superficial (0 a 10cm) del suelo, mediante muestreo con barreno y pesada, siguiendo el
180 método gravimétrico tradicional, el cual es considerado “patrón” para calibrar el resto de
181 los métodos indirectos. A su vez, es el método estándar para comparar con mediciones en
182 red a nivel global (Robock *et al.*, 2000).

183

Los sitios de medición fueron seleccionados de acuerdo al siguiente criterio:

184

1. Que sean representativos de reales condiciones de cultivos típicos en la zona. En el interior de la parcela, alejados de los alambrados, ya que ahí los suelos no son laboreados, y por consiguiente su balance hídrico es diferente.
2. Que las coberturas vegetales correspondan a la más amplia variedad de las frecuentes (especies, sistemas de cultivo, etc.), teniendo en cuenta las rotaciones propias de la zona.
3. Que sean fácilmente accesibles, en las diversas condiciones ambientales, que se presentan a lo largo del año.

185

186

187

188

189

190

191

192

Los resultados de las medias de las 3 repeticiones en cada sitio, para las fechas de pasajes satelitales, se muestran en Tabla I.

193

194

195

TABLA I: Mediciones de HS (%) simultáneas con el pasaje satelital

196

197

Como puede observarse en la última columna de Tabla I, al 4 enero 2012 le correspondió la situación de suelo más seco (15,6% en promedio), mientras que al 26 octubre 2012, la mayor HS (36,50% en promedio).

198

199

200

También se han registrado, para cada sitio y fecha, datos sobre la cobertura vegetal, que influye en la retrodispersión registrada. En promedio, la cobertura se muestra en Tabla II.

201

202

203

TABLA II: Tipo y % de coberturas, en promedio, para cada fecha

204

205

206

Dadas las características actuales de la agricultura, con predominio de sistemas de “siembra

Artículo en edición

207 directa”, prácticamente no hay situaciones de suelos “desnudos” en ningún momento del
 208 ciclo. Las condiciones más cercanas son las de rastrojos pastoreados, que presentan la
 209 menor rugosidad, mientras que coberturas vegetales más densas están dadas por cultivos
 210 (maíz, girasol, soja, etc.) en pleno desarrollo vegetativo.

211

212 **Imágenes COSMO y procesamiento digital**

213 Se emplearon imágenes SAR de la Misión italiana COSMO-SkyMed (CONstellation of
 214 small Satellites for the Mediterranean basin Observation), en banda X (9,6 GHz), cuyo
 215 horario de paso es a las 09.50 PM en el modo Descendente (Desc), y a las 10.40 AM en el
 216 Ascendente (Asc) (Tabla III).

217 TABLA III: Imágenes COSMO-SkyMed, con centro en: Latitud 37°08’S; Longitud
 218 59°42’W.

219

220 Mediante el software libre NEST 4C (European Space Agency), se realizaron las
 221 calibraciones radiométricas, correcciones geométricas, y transformación de potencia a
 222 amplitud en decibeles (dB). Dado que se emplearon imágenes COSMO con un Nivel de
 223 Proceso Geocodificado 1B (Gec), se saltaron los pasos de vista múltiple (Multilook) y de
 224 corrección del terreno (Terrain Correction).

225 Se correlacionaron los valores de σ^0 (dB) con los correspondientes de HS(%) mediante
 226 regresión lineal simple, obteniendo las debidas funciones, las cuales fueron utilizadas para
 227 establecer la correspondencia y la tabla de colores de los mapas de HS. Para disminuir la
 228 influencia del ruido “speckle”, propio de las imágenes SAR, el valor de σ^0 se obtuvo del
 229 promedio (extraído de la imagen en potencia) de una ventana de 3x3 píxeles, centrada en
 230 las coordenadas del sitio de muestreo.

231 Los mapas se focalizaron en la zona piloto, por lo cual se generó una subimagen, limitada
 232 por un rango en Latitud (37°06'S - 37°10'S) y Longitud (59°45'W - 59°39'W) y se empleó la
 233 Proyección cartográfica Gauss-Krüger y Elipsoide de Referencia Internacional 1924.

234 Los valores de HS estimados se compararon con los medidos a campo mediante el Error
 235 Cuadrático Medio (RMSE, por su sigla en inglés) y el Error Cuadrático Medio
 236 Normalizado (NMSE, por su sigla en inglés), expresados mediante las fórmulas siguientes:

237

238
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n (xe_i - xo_i)^2} \quad (3)$$

239

240
$$NMSE = \frac{\sum (xe_i - xo_i)^2}{xe_i \cdot xo_i} \quad (4)$$

241

242 donde xe_i y xo_i son los valores estimados (calculados) y observados (medidos)
 243 respectivamente, $\overline{xe_i}$ es el promedio de la HS estimada, $\overline{xo_i}$ es el promedio de la HS
 244 observada, y n es el número de pares de datos.

245

Artículo en edición

246

247 **3) RESULTADOS Y DISCUSION**

248

249 **Relación HS - retrodispersión**

250 Del análisis del conjunto de datos (n=112), se observa en Fig. 2 una buena intensidad de
 251 relación entre las variables HS y σ^0 , expresada a través del coeficiente de correlación de
 252 Pearson (r= 0.71) y un ajuste aceptable al modelo de regresión lineal simple ($r^2= 0,51$),
 253 dada la amplia diversidad de condiciones (coberturas, órbitas, polarizaciones) registradas.
 254 El coeficiente de determinación (r^2) indica que el 51% de la variabilidad en HS es explicada
 255 por la variable independiente σ^0 en el modelo de regresión utilizado.
 256 Siguiendo el criterio de los mínimos cuadrados se obtuvo la siguiente ecuación para la
 257 estimación de la recta del mejor ajuste a los datos:

258

$$259 \text{HS}(\%) = 58,076 + 1,7585 \cdot \sigma^0(\text{dB}) \quad (5)$$

260

261 donde la intersección $b_0= 58,076$ representa el valor promedio de HS cuando σ^0 es igual a
 262 cero y la pendiente indica que un aumento unitario en $\sigma^0(\text{dB})$ representa un aumento del
 263 1,7585 % en HS.

264 La relación lineal significativa entre ambas variables se corrobora en el análisis de la
 265 varianza (ANOVA), a través del estadístico de prueba t con n-2 grados de libertad, tanto
 266 para el intercepto ($t_{\beta 0}= 21.536$) como para la pendiente ($t_{\beta 1}= 10.662$), con un nivel de
 267 significancia $\alpha \leq 0.05$ en ambos casos, y de la estimación del intervalo de confianza del
 268 95% para la pendiente verdadera entre 1,365 y 1,988.

269

270 Fig. 2: Relación general Humedad del Suelo “HS” vs. Retrodispersión de la Señal Radar
 271 “ σ^0 ”

272

273 De acuerdo a Brisco *et al.* (1997), la sensibilidad de la señal SAR a la HS es de 0,57 dB/%.
 274 Considerando que el ángulo de incidencia para todas las imágenes es de 40°, el resultado es
 275 comparable con los de Aubert *et al.*(2011), que obtuvieron una respuesta de 0,411dB/% con
 276 ángulos de incidencia bajos (25°) y de 0,323 dB/% con mayores ángulos (50°), con
 277 imágenes TerraSAR-X (9,5 GHz; HH; pixel 1m) en la cuenca del Orgeval (Francia).

278 Desagregando el conjunto de datos según tipo de órbitas (Asc o Desc) y polarizaciones (HH
 279 o VV), las correlaciones se muestran en Tabla IV.

280

281 **TABLA IV: Parámetros de las rectas de ajuste**

282

283 En síntesis, las funciones resultan totalmente distintas, según la dirección del pasaje orbital.
 284 El mejor ajuste ($r^2 = 0,65$) se presenta con las Desc, lo cual se atribuye a que, en este caso,
 285 el ángulo entre el haz SAR y la dirección de los cultivos facilita la obtención de
 286 información del suelo, con menor influencia de la cobertura vegetal. A su vez, la
 287 polarización HH resulta levemente superior ($r^2 = 0,69$) a la VV ($r^2 = 0,62$). Esto era

Artículo en edición

288 previsible, dado que la polarización HH es mejor que la VV, para estimar HS superficial,
289 con escasa cobertura vegetal y ángulo de incidencia bajo (Ulaby y Batlivala, 1976). Con
290 ángulos mayores (en este caso, 40°) aumenta la influencia del canopeo, como resumen
291 Ulaby y Dobson (1988) y Brisco *et al.* (2008).

292 En general, la estimación de HS ha sido motivo de numerosos estudios con Banda C. En
293 comparación con experimentos a escala de cuenca (Álvarez-Mozos y Crespo, 2005), el
294 ajuste ($r^2 = 0,51$) resulta aceptable, considerando los tipos de polarización y la diversidad de
295 coberturas registradas en las fechas de las imágenes disponibles. Si se toma en cuenta sólo
296 la polarización VV ($r^2 = 0,62$), el ajuste no alcanza a otros trabajos, con coberturas agrícolas
297 más homogéneas de cereales, como el Álvarez-Mozos y Crespo (2005), con valores de $r^2 =$
298 $0,87$ y pendiente = 4,7. Cuanto más cultivos participen, mayor diversidad de canopeo y
299 menor ajuste, como reportan Santi *et al.* (2005), que trabajaron con imágenes HH ASAR
300 Envisat, con parcelas de trigo, cebada, alfalfa, pastura, maíz, poroto y remolacha azucarera,
301 obteniendo un ajuste $r^2 = 0,4$ y pendiente = 2,5 en promedio.

302 Dado que la relación HS vs. σ_0 está fuertemente influenciada por la rugosidad superficial
303 de la vegetación, en Dabrowska-Zielinska *et al.* (2005) se propone asumir que la rugosidad
304 se caracteriza por el Índice de Área Foliar "IAF". Así, en Dabrowska-Zielinska *et al.*
305 (2005) se reporta un ajuste $r = 0,86$ y pendiente = 3,2 para cereales con $IAF > 3$, utilizando
306 imágenes VV ERS. Con la misma polarización VV, pero con imágenes ASAR Envisat en
307 modo "Wide" (resolución-150m), Kong y Dorling (2005) obtuvieron un $r^2 = 0,32$ para
308 campos de trigo. Por su parte, empleando imágenes HH Radarsat S1 y S2, en Álvarez-
309 Mozos y Crespo (2005) se obtuvo un ajuste discreto ($r^2 = 0,52$; pendiente = 2,5) para
310 parcelas con cereales, lo cual mejora significativamente cuando se lo compacta ($r^2 = 0,75$;
311 pendiente = 3).

312 Finalmente, en la misma zona piloto de la provincia de Buenos Aires, Argentina, Salgado
313 (2012) reportó buenos resultados con Banda C y $\phi=24^\circ$ para lotes con trigo en emergencia,
314 con mínima cobertura del suelo ($r^2 = 0,86$; pendiente =2; polarización HH y VV), y en
315 estado vegetativo ($r^2 = 0,77$; pendiente = 1; HH).

316

317 **Mapas de HS**

318 Aplicando las ecuaciones de las rectas de ajuste (presentes en la Tabla IV), se realizó el
319 mapeo de HS para cada polarización y tipo de órbita. Se asignó una escala de colores con
320 rangos de 5% de HS, desde 10% (naranja) hasta 50% (verde oscuro), pasando por
321 tonalidades amarillas y verdosas. En Fig. 3 se presentan los mapas para imágenes Desc VV,
322 cuya función es: $HS = 63,6 + 2,21 \cdot \sigma^0$ (Tabla IV).

323

324 **Figura 3:** Mapas de HS para órbitas Desc, en fechas 4ene12 (seco) y 26oct12 (húmedo).

325 Los colores indican diferentes contenidos de humedad volumétrica, desde <10 a >50 %

326

327 En los mapas se observa un predominio de colores amarillos para el 4ene12 (HS media =
328 15,6%) y tonos verdosos para el 26oct 12 (HS media = 36,5%), como consta en Tabla I.
329 Los cuerpos de agua superficiales (embalses, lagos, etc.) aparecen en negro (baja

Artículo en edición

330 retrodispersión, por reflexión especular), y en rojo figuran elementos con alta
331 retrodispersión (masa forestal, afloramientos rocosos, planta de silos, etc.).

332

333 *Validación cruzada del abordaje empírico*

334 El ajuste entre los valores de HS en imágenes Desc, calculados con la expresión $HS =$
335 $63,9 + 2,26 \cdot \sigma^0$ (Tabla IV), y los medidos a campo se evaluó mediante las fórmulas RMSE
336 (3) y NMSE (4), y se presenta en la Tabla V.

337

338 TABLA V: Errores: Cuadrático Medio (RMSE) y Medio Cuadrático Normalizado (NMSE)

339

340 Los resultados son comparables con los obtenidos por Lievens y Verhoest (2012) ($4,5\% <$
341 $RMSE < 9,8\%$, según estado y cobertura de las parcelas), con imágenes Radarsat-2 en
342 Banda C (5,3 GHz) en modo “Single Look Complex” (SLC), con cuadripolarización (HH-
343 HV-VH-VV), haz “Fino” (FQ) y ángulos de incidencia del orden de 25° en Flevoland,
344 Holanda, trabajando con un modelo físico sobre distintas superficies agrícolas (con distintas
345 rugosidades). La diferencia puede atribuirse, entre otros factores, a la mayor penetración en
346 el suelo de la Banda C y al menor ángulo de incidencia.

347

348

349 **4) CONCLUSIONES**

350

351 Aunque es ampliamente conocido el empleo de imágenes SAR para la estimación de la HS,
352 no hay muchos trabajos realizados con Banda X. Sin embargo, resulta muy útil para
353 detección de elementos superficiales (rugosidad, follaje, etc.). Los cuerpos de agua han sido
354 bien identificados con el ángulo de incidencia (40°) empleado.

355 La función general de regresión lineal obtenida [$HS(\%) = 58,08 + 1,758 \cdot \sigma^0(\text{dB})$] muestra
356 un ajuste discreto ($r^2 = 0,51$), y deberá ser validada con mayor experimentación. La
357 sensibilidad de la señal SAR respecto a la HS fue de $0,57 \text{ dB}/\%$, y resulta comparable con
358 las obtenidas en otros trabajos (entre $0,32$ y $0,57 \text{ dB}/\%$), con bandas C y X, y distintos ϕ .

359 El empleo de las relaciones HS vs. σ^0 permitió la generación de mapas de HS, que brindan
360 su distribución espacial y pueden actualizarse con cada pasaje satelital.

361 Debido al abordaje empírico, tanto las funciones lineales como los mapas de HS resultan
362 dependientes de:

- 363 - órbita (Asc. o Desc.) y su relación con direcciones predominantes de laboreo de las
- 364 parcelas agrícolas
- 365 - ángulo de incidencia ϕ
- 366 - cobertura vegetal (época del año)

367

368 La Red de Medición ha demostrado ser útil para provisión de datos simultáneos de HS en
369 zonas bajo producción agrícola, para calibración y ajuste de actuales y futuras misiones
370 satelitales.

Artículo en edición

371 Los resultados obtenidos alientan a continuar con estudios, usando mayor cantidad de
372 imágenes (con ángulos de incidencia más bajos, polarizaciones directas y cruzadas, etc.),
373 con vistas a su potencial uso complementario con imágenes SAR polarimétricas en banda L
374 (de los satélites SAOCOM), en la Constelación del Sistema Ítalo Argentino de Satélites
375 para la Gestión de Emergencias SIASGE.
376

377

378 **AGRADECIMIENTOS:** Deseamos expresar nuestro agradecimiento al Téc. Marcelo
379 Schwab, de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional del Centro de la Pcia. de
380 Bs.As., por su participación en el trabajo de campaña, y a la Ing. Claudia Carrascal, por su
381 participación en el proceso inicial de las imágenes. También a la Comisión Nacional de
382 Actividades Espaciales CONAE, institución que, a través de su Anuncio de Oportunidades,
383 apoyó el Proyecto 30/11, por el cual se obtuvieron las imágenes COSMO-Skymed y la
384 capacitación para su uso.
385

386

387 REFERENCIAS

388

389 **Álvarez-Mozos J. y Crespo J. J., 2005:** Estimación de la humedad superficial del suelo en
390 cuencas agrícolas por medio de imágenes de teledetección radar. Congreso Internacional
391 Conjunto XVII Ingegraf – XV ADM Ingeniería Gráfica 2005, Sevilla, España, 1-3 junio
392 2005.
393

394 **Aubert M., Baghdadi N., Zribi M., Douaoui A., Loumagne C., Baup F., El Hajj M. y**
395 **Garrigues S., 2011:** Characterization of the soil surface by TerraSAR X imagery. Remote
396 Sensing of Environment, 115 (8), 2011, pp.1801-1810.
397

398 **Brisco B., Pultz T., Brown R. y Gwyn H., 1997:** Soil moisture estimation with
399 RADARSAT. IGARSS'97, Ottawa, Canadá.
400

401 **Brisco B., Touzi R., van der Sanden J.J., Charbonneau F., Pultz T.J. y D'Iorio M.,**
402 **2008:** Water resource applications with Radarsat-2 – a preview. International Journal of
403 Digital Earth, 1:1, 2008, pp.130-147.
404

405 **Chanzy, A., P. Bertuzzi y L. Bruckler, 1994:** Estimation de la teneur en eau de la surface
406 des sols nus a l'aide des mesures d'hyperfréquences actives. Dans S. Bonn (dir.),
407 Télédétection de l'environnement dans l'espace francophone, Sainte-Foy, Canada,
408 PUO/ACCT, pp.55-74.
409

410 **Dabrowska-Zielinska K., Inoue Y., Kowalik W. y Gruszczynska M., 2005:** Modelling

Artículo en edición

411 of crop and soil parameters using C and L band of SAR images. Journal of Water and Land
412 Development, vol:9, 2005, pp.3-20.

413

414 **Engman E.T., 2000:** Soil moisture. Remote Sensing in Hydrology and Water
415 Management. G. A. Schultz – E. T. Engman Eds. Springer Verlag, Berlin Heidelberg,
416 Germany, 2000, 475 pp.

417

418 **Kong X. y Dorling S., 2005:** The retrieval of soil moisture from medium resolution
419 ENVISAT ASAR wide swath data. Proceedings of the 2004 Envisat & ERS Symposium, 6-
420 10 September 2004, Salzburg, Osterreich (ESA SP-572, April 2005).

421

422 **Lievens H. y Verhoest N.E.C., 2012:** Spatial and temporal soil moisture estimation from
423 RADARSAT-2 imagery over Flevoland, The Netherlands. Journal of Hydrology 456-457
424 (2012), pp.44-56.

425

426 **Moran S., Peters-Lidard Ch., Watts J.y McElroy S., 2004:** Estimating soil moisture at
427 the watershed scale with satellite-based radar and land surface models. Can. J. Remote
428 Sensing., Vol.30, N°5, 2004, pp.805-826.

429

430 **Robock A., Vinnikov K.Y., Srinivasan G., Entin J.K., Hollinger S.E., Speranskaya**
431 **S.A., Liu S.X. y Namkhai A., 2000:** The Global Soil Moisture Data Bank”. Bulletin of the
432 American Meteorological Society, 81(6), 2000. pp.1281-1299.

433

434 **Salgado H., 2012:** Humedad del suelo en cuencas hídricas. Aplicación de herramientas
435 geomáticas y modelización hidrológica. Editorial Académica Española (EAE), AV
436 Akademikerverlag GmbH & Co. KG, Saarbrücken, Germany, 176 pp.

437

438 **Salgado H., Génova L., Brisco B. y Bernier M., 2001:** Surface soil moisture estimation in
439 Argentina using Radarsat-1 imagery. Canadian Journal of Remote Sensing, 2001, 27(6),
440 pp.685-690.

441

442 **Santi E., Paloscia S., Pampaloni P., Pettinato S. y Poggi P., 2005:** Retrieval of soil
443 moisture from ENVISAT ASAR images: a comparison of inversion algorithms.
444 Proceedings of the 2004 Envisat & ERS Symposium, 6-10 September 2004, Salzburg,
445 Austria [ESA SP-572, April 2005].

446

447 **Schmugge T. y J. Wang, 1980:** An empirical model for the complex dielectric permittivity
448 of soils as function of water content. IEEE Trans. Geosc. Rem.Sens. Vol.18, pp.288-295.

449

450 **Touré, A., K.P.B. Thomson, G. Edwards, R.J. Brown y B. Brisco, 1994:** Adaptation of
451 the MIMICS backscattering model to the agricultural context: wheat and canola at L and C
452 Bands. IEEE transactions of geoscience and remote sensing, 32 (1), 47 61.

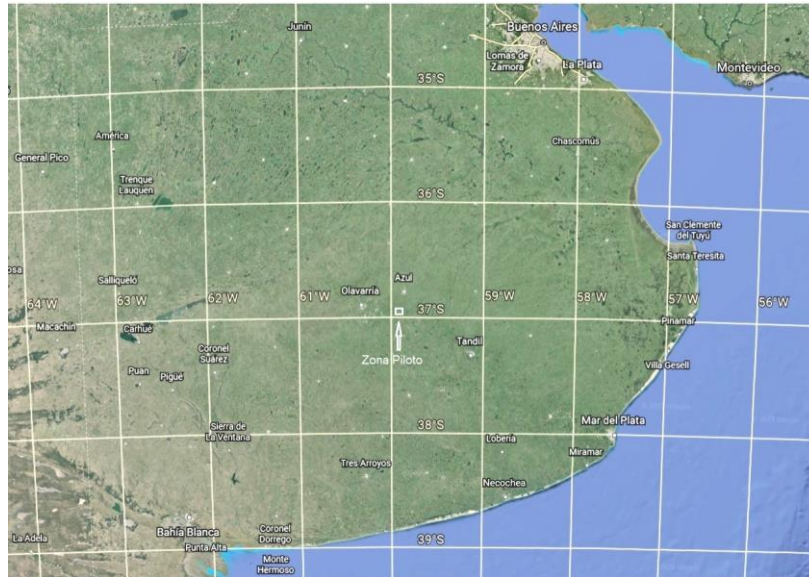
453

Artículo en edición

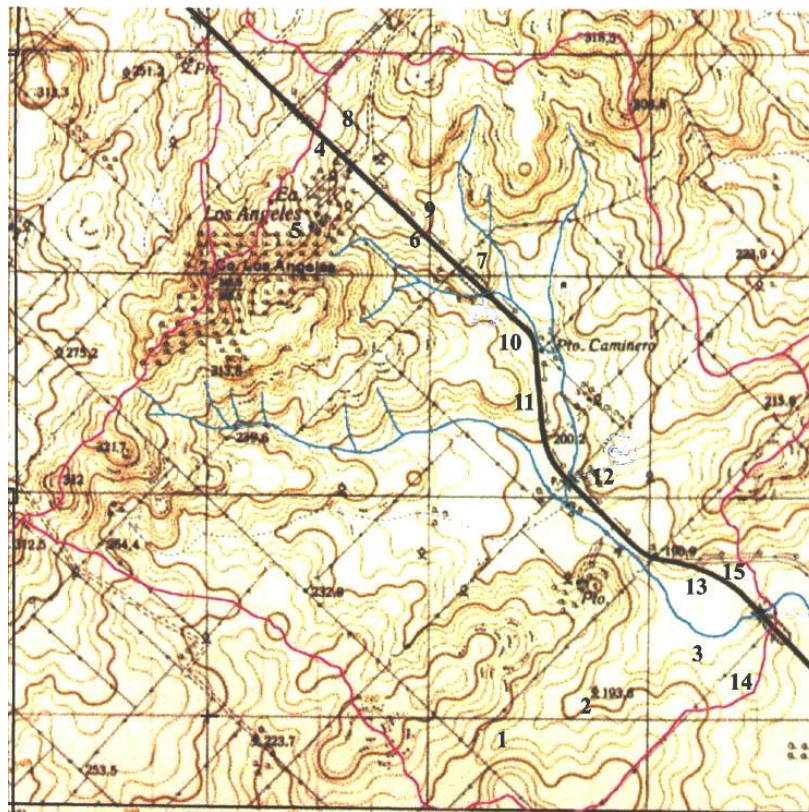
- 454 **Ulaby F.T., 1974:** Radar measurement of soil moisture content. IEEE Trans. Antennas
455 Propagation. Vol.AP-22(2), pp.257-265.
456
- 457 **Ulaby F.T. y Batlivala P.P., 1976:** Optimum radar parameters for mapping soil moisture.
458 IEEE transactions geoscience electronics, GE-14 (2) , 81 - 93 .
459
- 460 **Ulaby F.T. y Dobson M.C., 1988:** Handbook of Radar Scattering Statistics for Terrain.
461 Artech House, 1988.
462
- 463 **Ulaby, F.T., Dubois, P. C. y van Zyl, J., 1996:** Radar mapping of surface soil moisture.
464 Journal of Hydrology, 184, 57–84.
465
- 466 **US Soil Survey Staff, 1975.** Soil Taxonomy: A basic system of soil classification for
467 making and interpreting soil maps, US. Department of Agriculture, Agriculture Handbook
468 N°436, USA, 1975, 754 pp,
469
- 470 **Wang L. y Qu J.J., 2009:** Satellite remote sensing applications for surface soil moisture
471 monitoring: A review. Front. Earth Science, China 2009, 3(2), pp.237-247.
472
- 473
- 474
- 475
- 476
- 477
- 478
- 479
- 480
- 481
- 482
- 483
- 484
- 485
- 486
- 487
- 488

Artículo en edición

489 Figuras y Tablas



490



491

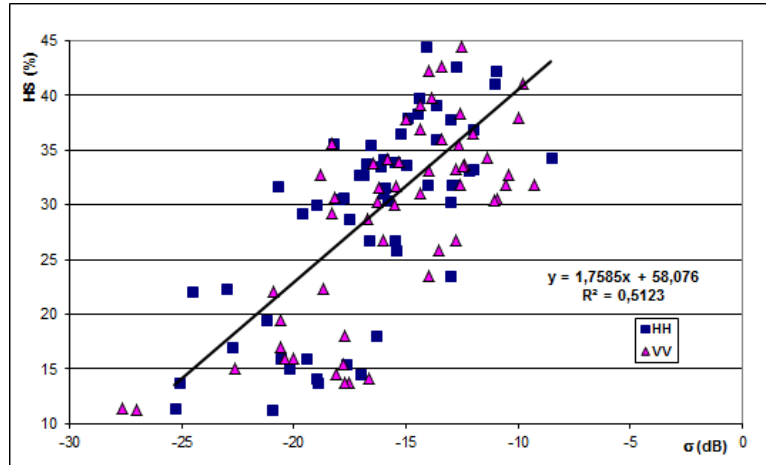
492

493

494

Figura 1: Ubicación geográfica de la Zona Piloto, y detalle de la Cuenca del A. Los Ángeles (marcada con línea roja) y sitios de medición de HS (números arábigos)

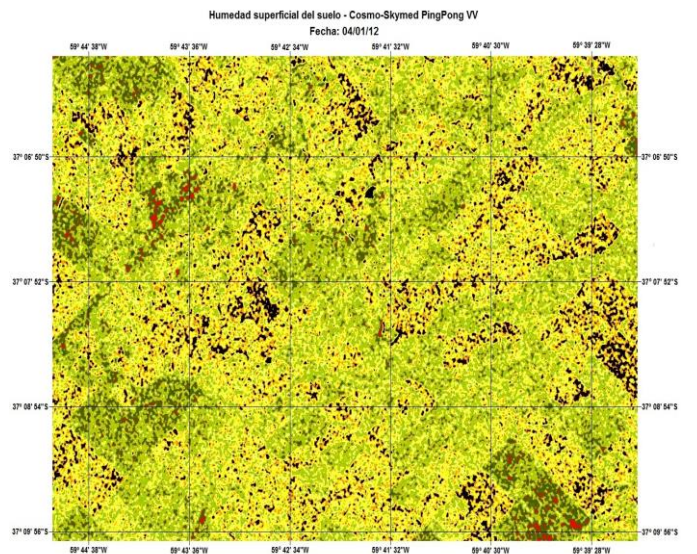
495
496



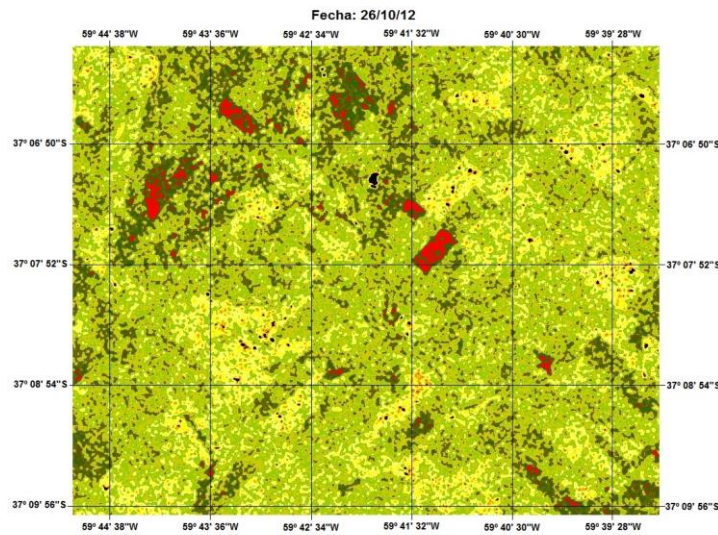
497
498
499
500
501
502
503
504
505
506
507
508
509
510
511
512
513
514
515
516
517
518
519
520
521
522
523

Figura 2: Relación general Humedad del Suelo “HS” vs. Retrodispersión de la Señal Radar “ σ^0 ”

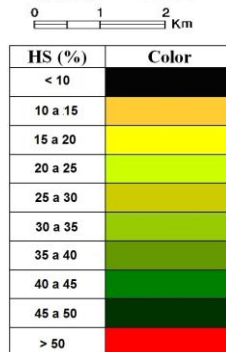
Artículo en edición



524



525



526

527

528

529

Figura 3: Mapas de HS para órbitas Desc, en fechas 4ene12 (seco) y 26oct12 (húmedo). Los colores indican diferentes contenidos de humedad volumétrica, desde <10 a >50 %

Artículo en edición

530
531
532

TABLA I: Mediciones de HS (%) simultáneas con el pasaje satelital

	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Media
4-Ene-12	11.3	15.0	15.4	17.0	23.5	13.7	14.5	13.7	16.0	16.0	11.2	19.4	14.1	18.0	15.6
2-May-12	22.4	31.8	22.1	38.0	32.8	31.9	33.9	35.4	33.8	34.2	30.7	36.5	28.7	35.7	32.0
26-Oct-12	44.5	42.3	25.8	36.9	39.1	31.6	42.6	37.9	36.0	33.2	38.4	39.7	30.2	33.1	36.5
19-Dic-12	30.1	33.7	29.3	30.5	31.9	31.8	32.8	41.1	31.1	26.7	26.8	33.5	30.3	34.3	31.7

533
534
535
536
537
538
539
540
541
542
543
544
545
546
547
548
549
550
551
552
553
554
555
556
557
558
559
560
561
562
563
564
565
566
567
568

Artículo en edición

569
570
571
572

TABLA II: Tipo y % de coberturas, en promedio, para cada fecha

Fecha	Cobertura
4-Ene-12	Soja (60%); Maíz (30%); Rastrojo (10%)
2-May-12	Soja (35%); Rastrojo (35%); Maíz (20%); Avena (10%)
26-Oct-12	Rastrojo (60%); Avena (30%); Colza (5%); Trigo (5%)
19-Dic-12	Rastrojo (55%); Soja (20%); Maíz (20%); Trigo (5%)

573
574
575
576
577
578
579
580
581
582
583
584
585
586
587
588
589
590
591
592
593
594
595
596
597
598
599
600
601
602
603
604
605
606
607
608

Artículo en edición

609

610

TABLA III: Imágenes COSMO-Skymed, con centro en: Latitud 37°08'S; Longitud 59°42'W.

611

612

Fecha	Orbita	Ang. Inc. ϕ (°)	Modo	Polarización	Pixel (m)
04 Ene 12	Desc.	40	Ping-Pong	HH - VV	10
02 May 12	Asc.	40	Ping-Pong	HH - VV	10
26 Oct 12	Desc.	40	Ping-Pong	HH - VV	10
19 Dic 12	Asc.	40	Ping-Pong	HH - VV	10

613

614

615

616

617

618

619

620

621

622

623

624

625

626

627

628

629

630

631

632

633

634

635

636

637

638

639

640

641

642

643

644

645

646

647

Artículo en edición

648
649
650

TABLA IV: Parámetros de las rectas de ajuste

Orbita y Polarización	Ord. al Origen	Pendiente	r²	n
Asc. HH y VV	42,0	0,66	0,31	56
Desc. HH y VV	63,9	2,26	0,65	56
Desc. HH	64,4	2,31	0,69	28
Desc. VV	63,6	2,21	0,62	28

651
652
653
654
655
656
657
658
659
660
661
662
663
664
665
666
667
668
669
670
671
672
673
674
675
676
677
678
679
680
681
682
683
684
685
686
687

Artículo en edición

688

689 TABLA V: Errores: Cuadrático Medio (RMSE) y Medio Cuadrático Normalizado (NMSE)

690

	Pol. HH	Pol. VV
RMSE	6,31	6,97
NMSE	1,62	2,03

691

692

693

694

695

696

697

698

699

700

701

702

703

704

705

706

707

708

709

710

711

712

713

714