

CALIBRACIÓN DE DATOS OBSERVADOS DE CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO CON SENSORES CAPACITIVOSLucía Curto^{1,3}, Mauro Covi¹, María Isabel Gassmann^{1,3}, Matías Cambareri², Aída Della Maggiora²¹ Dpto. de Cs. de la Atmósfera y los Océanos, FCEyN, UBA. Piso 2, Pabellón 2, Cdad. Universitaria, C1428EGA, CABA, Argentina.² Unidad Integrada Estación Experimental INTA Balcarce – Fac. de Cs. Agrarias, Univ. Nac. de Mar del Plata. Balcarce, Prov. de Buenos Aires, Argentina.³ Consejo Nac. de Inv. Científicas y Técnicas, Av. Rivadavia 1917, C1033AAJ, CABA, Argentina.

(Manuscrito recibido el 14 de diciembre de 2015, en su versión final el 20 de marzo de 2016)

RESUMEN

La humedad o contenido de agua en el suelo es una variable de importancia para la meteorología, la agronomía, la hidrología y las ciencias del suelo. En Argentina las mediciones de humedad de suelo son poco sistemáticas y con distribución espacial escasa. Existen distintos métodos de medición de humedad de suelo: gravimétrico, neutrónico y dieléctrico, entre otros. Las mediciones de humedad de suelo utilizadas en este trabajo se realizaron en la localidad de Balcarce, durante la campaña agrícola 2012-2013, sobre un lote de producción de soja. Como objetivo de este trabajo se propuso calibrar los datos observados con un sensor capacitivo con datos gravimétricos y neutrónicos, y posteriormente generar una base de datos de alta resolución temporal. Se ajustaron funciones lineales de calibración para cada nivel de medición. No se pudo caracterizar de manera adecuada la respuesta del sensor capacitivo a las variaciones de humedad de suelo en los dos niveles más profundos. Tanto la calidad de los datos observados como la calidad de las curvas de calibración impactan en el error final de los datos del sensor capacitivo. Para generar la base de datos se utilizaron la totalidad de los datos disponibles, que se interpolaron con el método de Kriging. Se obtuvieron datos de humedad de suelo con buena representatividad espacial en la vertical y temporal, en la que se puede observar la variabilidad del agua en el suelo asociada al aporte de la precipitación y los ritmos de consumo de la vegetación.

Palabras clave: *Argiudol típico, sonda de neutrones, función lineal de calibración*

CALIBRATION OF SOIL WATER CONTENT MEASUREMENTS OBSERVED WITH CAPACITANCE PROBES**ABSTRACT**

Soil moisture or soil water content is an important variable for Meteorology, Agronomy, Hydrology and Soil Science. In Argentina, measurements of soil moisture are both spatially and temporally sparsely distributed. There are different methodologies of measuring soil moisture content like the gravimetric, neutron and dielectric methods, among others. During the growing season 2012-2013, soil moisture measurements were performed in a soybean crop field. The aim of this paper is to

calibrate observed capacitive data with gravimetric and neutron methods as well as to build a high temporal resolution soil moisture database. Linear functions were used to calibrate data for each depth of measurement with the exception of the two deepest levels where retrieved functions have a poor data fitting. The quality of the observed data and the calibration functions have direct impact on the capacitive sensor errors. Gravimetric, neutron and capacitive soil moisture measurements were interpolated with the Kriging method to construct the high resolution database. Variability of soil water content was observed at different soil depths due to precipitation and plant water uptake.

Keywords: Typical Argiudol, neutron moisture meter, linear calibration function

1. INTRODUCCIÓN

La humedad o el contenido de agua en el suelo es una variable compleja que resulta de interés para las ciencias que estudian la pedósfera y su interacción con la atmósfera, como la agronomía, la meteorología, la hidrología y las ciencias del suelo.

Una de las principales dificultades que presenta esta variable es su medición, ya que cualquier método de observación o instalación de sensores para medir la cantidad de agua que se almacena en la matriz del suelo, implica necesariamente una perturbación del medio que se desea muestrear. Existen diversas metodologías destinadas a la medición de agua en el suelo. Entre ellos se destacan el método gravimétrico, el método neutrónico y el método dieléctrico con sensor capacitivo.

En la observación con el método gravimétrico se toman muestras de suelo a distintos niveles de profundidad y por diferencia de peso entre la muestra húmeda y seca se determina el contenido másico de humedad del suelo. Es el método de medición directa de humedad de suelo, con mayor exactitud y se destaca por la sencillez de su procedimiento. Por esta misma razón es considerado el método patrón primario para la calibración de humedad de suelo observado con otros sensores. Entre sus desventajas puede señalarse que el dato no es instantáneo ya que las muestras deben ser procesadas, se requiere de personal capacitado para realizar el muestreo,

y la medición destruye el perfil del suelo, por lo que no se lo puede usar para realizar un registro continuo de la variable (OMM, 1994).

El método de observación con sonda de neutrones consiste en un equipo que posee una fuente radiactiva que emite neutrones rápidos. Éstos colisionan con el hidrógeno presente en las moléculas de agua alojadas en la matriz del suelo, y retornan como neutrones lentos. La sonda contabiliza la cantidad de neutrones que vuelven al sensor y convierte ese valor a datos de humedad volumétrica del suelo a través de una curva de calibración (OMM, 1994). Su instalación solo requiere la colocación de un tubo de aluminio en el suelo por donde se ingresa la sonda para realizar mediciones a diferentes profundidades. El sensor muestrea un volumen esférico de suelo que puede variar, dependiendo de las condiciones de humedad, de 0,10 a 0,25 m de radio. Las ventajas de este método de medición es que es bastante exacto (Van Bavel y otros, 1956; Di Pietro y Suero, 1983b; Gardner y otros, 1986) y menos destructivo y laborioso que el método gravimétrico. Las mediciones requieren de la obtención de una curva de calibración a partir del método patrón. Dentro de sus desventajas se puede mencionar que necesita de personal capacitado y que cuente con permisos especiales otorgados por la entidad reguladora nuclear, dado que utiliza una fuente radiactiva (Evet y Steiner, 1995). No puede utilizarse para muestreo continuo de la variable, y no es recomendable medir con este equipo en profundidades menores a los 0,20 m (Hillel, 1998), debiendo utilizarse otras metodologías de muestreo en este estrato

Prof. (m)	n	$\frac{\rho_b}{\rho_w}$	CC	PMP	%Arcilla	%Limo	%Arena
0 - 0,13	0,54	1,17	0,34	0,15	37,1	34,2	34,1
0,13 - 0,30	0,52	1,21	0,35	0,15	32,1	33,1	34,8
0,30 - 0,49	0,59	1,30	0,38	0,21	46,2	24,1	29,7
0,49 - 0,81	0,62	1,32	0,35	0,21	45,2	23,2	31,6
0,81 - 1,10	0,52	1,23	0,28	0,19	33,9	32,1	34,0

Tabla I: Valores de porosidad del suelo (n) (Salazar, 1989), cociente entre la densidad aparente del suelo y la del agua (ρ_b/ρ_w) (Di Pietro y Suero, 1983 a), capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) expresados como contenido volumétrico de agua en el suelo (θ) para la localidad de Balcarce a distintas profundidades (Batallanez, 1972) y datos asociados a la textura del suelo (Salazar, 1989). Los valores de profundidades definidos son aproximados, y dado que las características del suelo pueden presentar variabilidad espacial, se los considera válidos sólo en un entorno del área de medición.

del suelo.

El método dieléctrico por reflectometría en el dominio de frecuencias (FDR, por sus siglas en inglés) requiere de la utilización de un sensor capacitivo que mide la constante dieléctrica aparente o permitividad relativa de un volumen de suelo, la cual es dependiente de su humedad. Los sensores capacitivos pueden usarse para un registro continuo ya que obtienen datos con una alta resolución temporal, y al igual que en el caso del método neutrónico, se realiza un orificio en el suelo solo una vez. Se pueden conectar a dataloggers (Evelt y Steiner, 1995) y tienen un costo accesible. Una desventaja que presentan estos sensores es la poca representatividad espacial (Paltineanu y Starr, 1997), ya que el volumen de suelo muestreado no supera al de una esfera de 0,10 m de radio. En consecuencia, las mediciones de los sensores capacitivos pueden resultar sensibles a irregularidades producidas en torno del sensor por el proceso de instalación (Paltineanu y Starr, 1997; Fares y Polyakov, 2006). Otra desventaja consiste en que las mediciones son sensibles a las propiedades del volumen de suelo (densidad aparente, granulometría, etc.) que rodea al sensor (Gardner y otros, 1998; Gessing y otros, 2004; Chandler y otros, 2004).

Los datos obtenidos mediante sensores

capacitivos requieren de una calibración, para la cual OMM (2008) recomienda utilizar como patrón el método gravimétrico o el neutrónico. Al comparar la precisión de las mediciones de humedad de suelo con método neutrónico y con método capacitivo utilizando como patrón mediciones de humedad de suelo con método gravimétrico, se obtienen mejores resultados con sonda de neutrones (Evelt y Steiner, 1995). Dado que las mediciones del sensor capacitivo dependen de la estructura del suelo y de la instalación, numerosos autores (Evelt y Steiner, 1995; Paltineanu y Starr, 1997; Chandler y otros, 2004; Gessing y otros, 2004; Fares y Polyakov, 2006) sugieren que es necesario realizar la calibración con medidas a campo, puesto que de ese modo se tiene en consideración la variabilidad en las propiedades del suelo. Esa calibración generalmente es específica para cada lugar y cada sensor (OMM, 1994).

Argentina tiene una carencia importante de bases de datos con mediciones sistemáticas de la humedad del suelo, en particular, aquellas con suficiente resolución espacial y temporal tal que permita validar modelos atmosféricos (Ferreira y otros, 2011). Si bien existen numerosos productos obtenidos a partir de imágenes satelitales (www.smn.gov.ar, www.ina.gov.ar, www.inta.gov.ar, www.ora.gov.ar), modelos

hidrológicos o modelos meteorológicos acoplados, la información que ofrecen generalmente no se encuentra validada con datos observacionales. El uso de sensores capacitivos correctamente calibrados, de relativamente bajo costo para las prestaciones que ofrece, permitiría la diagramación de una red de observación de medidas de humedad en el suelo con buena resolución temporal y aceptable resolución espacial, necesaria para la validación de modelos y productos que brinden información especializada a escalas nacional o regional.

Este trabajo tiene como objetivo estudiar la viabilidad del método dieléctrico como sistema de observación del contenido de agua en el suelo para usos de suelo agrícola en la región de la Pampa Húmeda argentina. A partir de la instalación de un sistema de observación capacitivo de humedad del suelo, se desarrolló una metodología de calibración de los datos, utilizando como medida patrón o con trazabilidad garantizada las observaciones obtenidas con los métodos gravimétrico y neutrónico. A su vez, se realizó una evaluación de la calibración obtenida utilizando las metodologías usuales en la disciplina y posteriormente se generó una base de datos de contenido de agua en el suelo de gran resolución temporal para un período de aproximadamente 90 días.

2. DATOS Y MÉTODOS

2.1. Campaña experimental

El experimento se desarrolló durante la campaña agrícola 2012-2013 en la Unidad Integrada Balcarce (UIB; Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata – Estación Experimental Agraria Balcarce del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria), provincia de Buenos Aires (37°45'S; 58°18'O). En el lugar se desarrolló un experimento micrometeorológico utilizando un lote de producción de 19 has, sembrado con un cultivo extensivo de soja crecido bajo condiciones de secano en un suelo Argiudol Típico (Di Pietro y Suero, 1983a). Este suelo se caracteriza por ser oscuro, profundo y

moderadamente bien drenado; presenta una capa de tosca a una profundidad que puede variar entre 0,40 y 2,00 m, la cual impide prácticamente la infiltración. En el sitio de muestreo la capa de tosca se encontró a la profundidad de 1,10 m. Los valores de algunas características físicas del suelo se detallan en la Tabla I. La siembra del cultivo de soja se realizó el 21 de noviembre de 2012 y se registró el desarrollo del cultivo, mediante observaciones fenológicas dos veces por semana (Tabla II) siguiendo la escala de Fehr y Caviness (1977).

Dentro del cultivo de soja se instaló un arreglo de sensores capacitivos Sentek EnviroSCAN (Sentek Sensor Technologies, Stepney, Australia), posicionados para medir humedad de suelo en cinco niveles: 0,08; 0,18; 0,38; 0,58 y 0,98 m. Los sensores se colocaron dentro de un tubo de acceso de PVC hasta la profundidad máxima de medición, de acuerdo a las recomendaciones de instalación sugeridas por el fabricante (Sentek, 2003). La profundidad máxima del perfil de suelo utilizada, se determinó como aquella que pudiera

Fase del cultivo	Descripción	Fecha
	Siembra	19-23/11
V2	2 nudos	07/01
V9	9 nudos	22/01
R1-V9	Comienzo de floración	25/01
R3-V12	Comienzo de formación de vainas	05/02
R5-V15	Comienzo de llenado de granos	22/02
R7	Madurez fisiológica	06/04

Tabla II: Estadios fenológicos de soja (Fehr y Caviness, 1977). Se indican los eventos más significativos y las fechas de ocurrencia respectivas.

ser explorada por las raíces del cultivo a lo largo de su desarrollo. La disposición de los sensores en la vertical respondió a la utilizada por el modelo de suelo NOAH que se acopla a modelos de pronóstico meteorológicos para la simulación de procesos de interacción superficie-atmósfera (Rosero y otros, 2010). La variable provista por los sensores es una frecuencia de respuesta adimensional estandarizada (SF, scaled frequency por sus siglas en inglés), la cual depende de la constante dieléctrica aparente del suelo. La información registrada por los sensores fue colectada y almacenada por un sistema de adquisición de datos (datalogger) Campbell CR1000 (Campbell Scientific Inc., Logan, USA), que a su vez administró la alimentación del conjunto de sensores capacitivos. El datalogger se configuró para realizar muestreos cada 30 segundos y almacenar promedios cada 15 minutos. El período de mediciones utilizado comprendió desde el 6 de enero hasta el 8 de abril de 2013 (92 días).

Alternativamente, se realizaron mediciones de humedad de suelo con los métodos gravimétrico y neutrónico con una periodicidad aproximada de siete días. Estas dos metodologías serán mencionadas de aquí en adelante como métodos de referencia. Las mediciones con método gravimétrico se tomaron en dos capas de 0 - 0,10 m, y 0,10 - 0,15 m, a las que se les asignaron las profundidades representativas de 0,05 y 0,125 m, respectivamente. En cada observación, se realizaron tres repeticiones en puntos cercanos al área donde se encontraba el arreglo de sensores capacitivos. Los datos obtenidos por este método fueron convertidos a unidades volumétricas de humedad de suelo utilizando los valores de densidad aparente correspondiente a cada nivel (Tabla I; Di Pietro y Suero, 1983a). Las mediciones con método neutrónico se realizaron con una sonda Troxler modelo 4300 Depth Moisture Gauge (Troxler Electronics Laboratories Inc., Research Triangle Park, USA) en 3 sitios alrededor del tubo de medición con sensores capacitivos. Para este fin se instalaron tubos de acceso para sonda de neutrones y se efectuaron mediciones a seis

profundidades: 0,24, 0,34, 0,44, 0,64, 0,84 y 1,04 m. Los datos fueron convertidos a humedad volumétrica a través de la ecuación de calibración propuesta por Suero y Travasso (1988) para los suelos de Balcarce. De esta manera se pudieron determinar valores promedios para cada fecha de muestreo y cada profundidad observados con los métodos de referencia. En el período de observación se realizaron un total de 11 muestreos de humedad en el perfil de suelo.

Se utilizaron los datos de precipitación diaria observados en el período de enero-abril 2013 en la Unidad Integrada Balcarce, medidos acorde a los estándares de la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2008).

2.2. Calibración

Para la calibración fue necesario unificar espacial y temporalmente la información provista por los distintos métodos de observación. Se interpolaron linealmente los datos de los métodos de referencia para establecer valores representativos en profundidades coincidentes con los niveles de medición de los sensores capacitivos. Los datos de estos sensores se promediaron temporalmente durante los períodos en los que se habían realizado mediciones con los métodos de referencia (aproximadamente 1 hora de duración por conjunto de observaciones).

Antes de realizar la calibración, se analizó la coherencia espacial y temporal de los datos observados. Para ello, se graficó y analizó en detalle cada uno de los perfiles de humedad de suelo obtenidos con los métodos de referencia y capacitivos (SF) de las 11 fechas con mediciones simultáneas. También se analizaron las series temporales por nivel de los SF y los datos de humedad de suelo medidos con los métodos de referencia interpolados a los mismos niveles.

La metodología de calibración seleccionada consistió en un ajuste por mínimos cuadrados ponderados por los errores de estimación, para los cuales se ensayaron dos tipos de funciones para cada nivel de medición: una potencial

(Baumhardt y otros, 2000; Fares y otros, 2004) - con y sin ordenada al origen - y una lineal (Fares y Polyakov, 2006). Se determinaron los parámetros asociados a cada ajuste, con su error respectivo y se estimaron los coeficientes de determinación (r^2) y raíz del desvío cuadrático medio:

$$RDCM = \sqrt{\sum_{i=1}^N (\theta_{v,E} - \theta_{v,O})^2} \quad (1)$$

Donde $\theta_{v,E}$ representa los valores de humedad del suelo observados mediante el sensor capacitivo de acuerdo con las curvas de calibración obtenidas, y $\theta_{v,O}$ los valores correspondientes obtenidos por los métodos de referencia. La sumatoria se realizó sobre los datos disponibles para la calibración. De la misma manera, el RDCM se obtuvo para las estimaciones de humedad del suelo, calculadas de acuerdo a la curva de calibración estándar provista por el fabricante.

2.3. Estimación de errores en los datos para la calibración

Los errores asociados al valor promedio de las mediciones de SF se obtuvieron como la suma de las contribuciones de las posibles fuentes de error. Para ello se consideraron tres fuentes: un error temporal (estimado), un error de profundidad (acotado superiormente) y un error propio del instrumental (estimado), los que se ponderaron mediante una propagación lineal de errores. El error temporal ($Er(SF(t))$) se consideró como aquel asociado a la tendencia observada en los SF durante los períodos de muestreo de los métodos de referencia, para cada fecha y profundidad. En el error por profundidad ($Er(SF(Z))$) se tuvieron en cuenta los errores asociados a los defectos de instalación del tubo en el suelo, incluyendo la verticalidad. El error propio del instrumental ($Er(SF(\theta_v))$) fue el provisto por el fabricante, evaluado mediante mediciones sucesivas en suelo equilibrado (Campbell Scientific, 2009). El error total para cada valor de SF (promediado en el lapso de muestreo de los métodos de referencia) se obtuvo en base a una propagación lineal, de

acuerdo con:

$$E_r^2(SF) = E_r^2(SF(t)) + E_r^2(SF(Z)) + E_r^2(SF(\theta_v)) \quad (2)$$

Finalmente se calculó la contribución relativa de cada una de las fuentes al error total, al error, en términos cuadráticos, de acuerdo con la Ecuación (1).

Se determinaron los errores asociados al valor promedio de las mediciones de humedad de suelo obtenidas con los métodos de referencia considerando el desvío estándar correspondiente a las mediciones realizadas en los tres puntos de muestreo, para cada fecha y profundidad. Al interpolar los valores de humedad del suelo obtenidos con los métodos de referencia a los niveles de medición del sensor capacitivo, se propagaron linealmente sus errores, considerando el aporte del error de medición para estos datos y el error por profundidad.

2.4. Generación de la base de datos

Luego de haber establecido una curva de calibración para cada nivel, se determinaron los datos de humedad volumétrica de suelo a partir de la información de SF observada con sensores capacitivos. Los errores asociados a estos valores se determinaron con una propagación lineal de los errores de los SF y de los parámetros obtenidos de los ajustes por mínimos cuadrados, evaluando luego el aporte relativo de cada fuente de error. Se analizaron las series obtenidas en busca de patrones dudosos, para no introducir información errónea. Estos patrones se identificaron como aumentos y disminuciones abruptas de la humedad de suelo, asociados a eventos de precipitación. Dicho comportamiento no es consistente con entradas de agua en el medio en el cual se está produciendo la infiltración (Hillel, 1998; Starr y Paltineanu, 1998), pero sí se puede relacionar con procesos de infiltración a lo largo del tubo que contiene los sensores. Se eliminaron datos que presentaron este comportamiento, tomando como criterio la remoción de datos a partir del valor mínimo de humedad de suelo antes del aumento abrupto, hasta el valor mínimo luego del mismo. En caso

Nivel de medición (m)	Contribución porcentual al error total de medición		
	Profundidad	Tiempo	Instrumental
0,08	82,11	17,89	$4,98 \times 10^{-9}$
0,18	90,06	9,94	$4,09 \times 10^{-9}$
0,38	95,04	4,96	$3,39 \times 10^{-9}$
0,58	95,15	4,85	$2,14 \times 10^{-9}$
0,98	99,98	0,02	$4,39 \times 10^{-9}$

Tabla III: Contribución en porcentaje de cada fuente de error al error total de SF, para cada nivel donde se realizaron las mediciones.

de no encontrar un mínimo relativo luego del aumento de la humedad de suelo, se eliminaron datos hasta encontrar dos valores consecutivos que indicaran humedad de suelo constante. También se incluyeron en la base de datos las mediciones obtenidas con los métodos de referencia, en sus niveles de medición originales.

Se realizó una interpolación de los datos observados mediante el método de Kriging (Cressie, 1993; Snepvangers y otros, 2003; Schume y otros, 2003; Jost y otros, 2005; De Lannoy y otros, 2006) entre 0 y 1,10 m de profundidad con una resolución espacial de 0,01 m y una resolución temporal de 15 minutos en todo el período disponible. Para simplificar el proceso de interpolación de los datos se utilizó una escala espacial en centímetros y una escala temporal en días, lo que permitió que el dominio tuviera, en términos numéricos, extensiones semejantes en tiempo y profundidad. Se analizó el variograma de los datos (Cressie, 1993) y se le ajustó un modelo lineal de respuesta, con lo que se pudieron determinar los errores generados por la interpolación de la información. Al modelo de variograma también se le forzó un valor mínimo de efecto pepita, definido como el cuadrado de los errores asociados al valor promedio de las mediciones de humedad de referencia. En los datos interpolados se consideraron dos fuentes de error, una debido los errores de los datos utilizados, y otra asociada al proceso de interpolación.

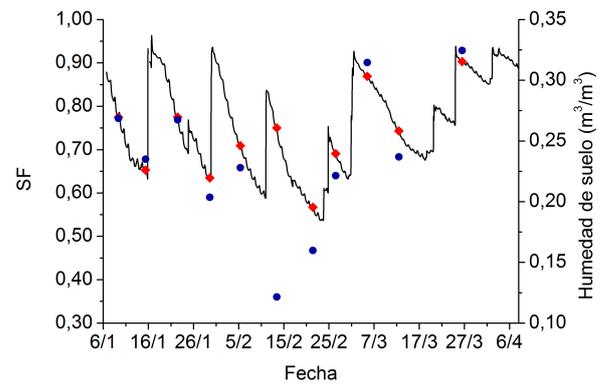


Figura 1: Mediciones de humedad de suelo (m^3/m^3) obtenidas con métodos de referencia (círculos azules), series de SF (líneas negras) y datos de SF coincidentes en tiempo con las mediciones de los métodos de referencia (rombos rojos) para el nivel de 0,08 m.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Errores en los datos, calibración y errores de calibración

Se analizaron las contribuciones al error total de los SF debida a cada fuente de error. Se observó que la mayor contribución al error total para la calibración de cada sensor capacitivo fue el error por profundidad y en menor medida el error temporal (Tabla III). La contribución debida al error propio del instrumental fue prácticamente despreciable. Este patrón se repitió para todos los niveles de medición, aumentando el aporte absoluto (resultados no mostrados) y relativo del error por profundidad al aumentar la misma.

Al analizar la consistencia de los perfiles de humedad de suelo y las series temporales de los datos por nivel de muestreo con los tres métodos, se encontraron dos días en los que las observaciones mostraron diferencias entre sí. En la Figura 1 se presentan, a modo de ejemplo, los valores correspondientes al nivel de 0,08 m en el período completo de medición, donde se puede observar que en el muestreo del 13 de febrero existen diferencias sustanciales entre

metodologías. Desajustes similares se observan para el mismo día en el nivel 0,18 m y para el día 26 de marzo (no mostrado), en los niveles de 0,38 y 0,58 m. Por tal motivo se decidió eliminar los perfiles completos correspondientes a estas fechas del conjunto de datos para realizar la calibración, ya que las diferencias observadas no respondían al patrón de comportamiento usual de los datos.

En términos relativos, el rango de variación de los datos utilizados para la calibración decrece con la profundidad más rápidamente en los valores de SF que en los de contenido volumétrico de humedad medidos con los métodos de referencia (sectores (a) y (b) de la Tabla IV). Esto indica que existió una respuesta diferencial de los sensores capacitivos a medida que aumentó la profundidad, disminuyendo su respuesta frente a la variabilidad del contenido de agua en el suelo. Los valores de SF utilizados para la calibración no siempre lograron representar adecuadamente el rango de variación total de los SF registrados en todo el período (i.e. valores máximos para los niveles de 0,08 y 0,18 m, sectores (b) y (c) de la Tabla IV). Los SF utilizados en la calibración se correspondieron con los momentos de medición de humedad de suelo con los métodos de referencia, por lo que si se quisiera tener una mejor representación de los valores máximos de SF en las calibraciones convendría realizar los muestreos de humedad de suelo con los métodos patrón inmediatamente después de los eventos de precipitación.

De los tres tipos de ajuste ensayados, el lineal resultó ser el más representativo de los datos, además de tener como ventaja una mayor simplicidad matemática. Los resultados del ajuste potencial sin ordenada al origen mostraron que, en la mayoría de las profundidades, la potencia no difiere significativamente de 1, confirmando la relación lineal. Por otro lado los ajustes potenciales con ordenada al origen no nula dieron como resultado dos parámetros, potencia y ordenada al origen, los cuales resultaron no significativamente distintos de 1 y 0, respectivamente, en la mayoría de las profundidades (no mostrado). La curva de

calibración más difundida y que a su vez, es la recomendada por el fabricante, es la no-lineal. Sin embargo, varios autores, en coincidencia con este trabajo, han hallado relaciones lineales para la calibración de estos sensores (Fares y Polyakov, 2006).

Para los primeros tres niveles de profundidad (0,08, 0,18 y 0,38 m) los ajustes lineales pudieron representar adecuadamente la variabilidad de las observaciones de referencia (Tabla V, y Figura 2 (a)). Sin embargo, en los dos niveles de mayor profundidad (0,58 y 0,98 m) el elemento sensor a calibrar no registró adecuadamente la variabilidad observada por el elemento patrón, lo cual se puede evidenciar en la reducción del coeficiente de determinación (r^2) de los ajustes lineales (Tabla V, y Figura 2 (b)), y por lo tanto se optó por no utilizar las curvas de calibración obtenidas. La relación lineal encontrada para el nivel de 0,38 m resultó tener una ordenada al origen no significativamente distinta de cero, por lo que se optó por una relación proporcional entre los SF y la humedad volumétrica de suelo. Este cambio en el nivel de 0,38 m simplificó la curva de calibración sin perder representación de los datos, e hizo que el valor de r^2 aumentara de 0,94 a 0,99. Se observó que los parámetros de los ajustes resultaron distintos entre niveles de medición, utilizando como medida de la diferencia sus errores de estimación, lo que refuerza la hipótesis de una posible dependencia del tipo de suelo y/o proceso de instalación.

Los RDCM hallados en la bibliografía (Evelt y Steiner, 1995; Morgan y otros, 1999; Weinzettel y Usunoff, 2003; Geesing y otros, 2004; Polyakov y otros, 2005; Da Silva y otros, 2007) varían entre 0,007 y 0,058, calibrando en base a datos de referencia gravimétricos. Los valores hallados en este trabajo (Tabla V) se hallan comprendidos dentro de ese rango, considerando que se utilizaron datos de referencia mixtos (gravimétricos y de sonda de neutrones), y que se debieron interpolar verticalmente con el fin de obtener los valores de referencia en los niveles de medición del sensor capacitivo. Los RDCM respecto de la curva de calibración

Datos	(a) Humedad de suelo medida con métodos de referencia interpolada					(b) SF utilizados para la calibración					(c) SF				
	0,08	0,18	0,38	0,58	0,98	0,08	0,18	0,38	0,58	0,98	0,08	0,18	0,38	0,58	0,98
Nivel de medición	0,08	0,18	0,38	0,58	0,98	0,08	0,18	0,38	0,58	0,98	0,08	0,18	0,38	0,58	0,98
N	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	8750	8750	8750	8750	8750
Mínimo	0,16	0,20	0,30	0,34	0,24	0,57	0,65	0,69	0,88	0,71	0,54	0,63	0,68	0,87	0,68
Máximo	0,31	0,34	0,41	0,42	0,33	0,87	0,84	0,93	0,97	0,73	0,96	0,91	0,95	0,97	0,73
Rango	0,15	0,14	0,11	0,08	0,08	0,30	0,19	0,24	0,09	0,02	0,43	0,27	0,28	0,10	0,05
Media	0,24	0,29	0,36	0,37	0,28	0,71	0,76	0,83	0,93	0,72	0,76	0,77	0,80	0,92	0,71
Desvío Estándar	0,04	0,05	0,04	0,03	0,03	0,09	0,07	0,10	0,04	0,01	0,11	0,06	0,08	0,04	0,01

Tabla IV: Estadísticos descriptivos de los valores de humedad de suelo (m^3/m^3) medidos con los métodos de referencia, interpolados a las profundidades de medición del sensor capacitivo (a), de los SF medidos con sensor capacitivo utilizados para la calibración (b), y de los SF originales medidos con un sensor capacitivo (c; datos promediados cada 15 minutos).

Nivel de medición (m)	$\theta = aSF + c$				Curva del fabricante
	a	c	r^2	RDCM	RDCM
0,08	0,505±0,042 **	-0,130±0,031 **	0,95	0,014	0,033
0,18	0,651±0,062 **	-0,201±0,046 **	0,94	0,016	0,034
0,38	0,452±0,043 ** ¹ 0,437±0,005 ** ²	0,013±0,037 ¹ 0 ²	0,94 ¹ 0,99 ²	0,018 ¹ 0,018 ²	0,062
0,58	1,183±0,294 **	-0,728±0,284 **	0,70	0,020	0,069
0,98	5,090±2,910	-3,370±2,101	0,30	0,032	0,061

Tabla V: Parámetros para los ajustes entre humedad de suelo (m^3/m^3) (θ) y frecuencias SF y coeficiente de determinación (r^2), obtenidos con métodos gravimétrico y neutrónico y método capacitivo, respectivamente. Se muestran valores significativos al 99% (**).

estándar son sistemáticamente mayores a los correspondientes a las curvas de calibración halladas en este trabajo (Tabla V). En general, se ha observado un mejor ajuste para curvas de calibración específicas para cada sitio respecto de una curva general (como la curva estándar), independientemente del tipo de sensor utilizado (Morgan y otros, 1999; Weinzettel y Usunoff, 2003; Chandler y otros, 2004; Geesing y otros, 2004; Czarnomski y otros, 2005; Jabro y otros, 2005; Polyakov y otros, 2005; Da Silva y otros, 2007).

3.2. Generación de base de datos

Con las curvas de calibración obtenidas se

calcularon los datos de humedad volumétricos para los niveles de 0,08, 0,18 y 0,38 m de profundidad a partir de los SF y sus errores asociados. En el ajuste lineal de 0,38 m se estimó un solo parámetro mientras que en los dos niveles más superficiales se estimaron dos, cada uno de los cuales aportó su error. De este modo, en la propagación se redujeron los errores en el resultado final para ese nivel respecto de los dos niveles superiores (Tabla V). También se redujo la contribución porcentual del ajuste lineal al error final de humedad de suelo volumétrico (Tabla VI).

Una vez calibrados los datos de los sensores

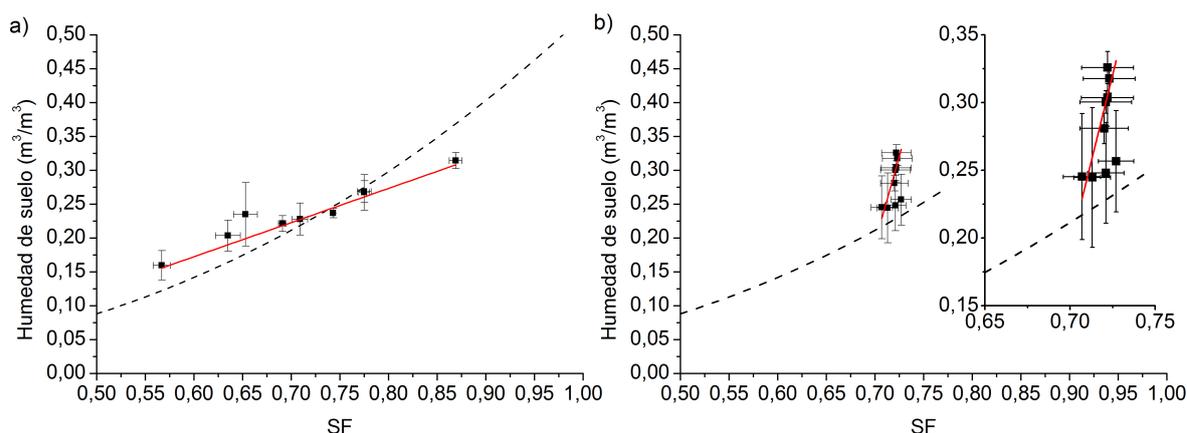


Figura 2: Mediciones de SF vs. Humedad de suelo (m^3/m^3) obtenidas con método capacitivo y métodos gravimétrico y neutrónico, respectivamente, para los niveles de profundidad de suelo de 0.08 (a) y 0.98 m (b). Las barras verticales indican el error estimado para cada observación por los métodos de referencia y las barras horizontales los estimados para los SF. Las líneas punteadas indican la curva de calibración estándar propuesta por el fabricante Sentek EnviroSCAN, y las líneas llenas rojas indican la recta resultante del ajuste lineal.

Nivel de medición (m)	Contribución porcentual al error total de medición	
	SF	Ajuste lineal
0,08	0,75	99,25
0,18	0,20	99,80
0,38	19,03	80,97

Tabla VI: Contribución en porcentaje al error de las estimaciones de humedad volumétrica de suelo dada por SF y los ajustes lineales, para cada nivel donde se realizaron las mediciones de SF.

capacitivos de los primeros tres niveles, se analizó el comportamiento de las series completas de datos medidos. Se pudieron identificar casos de dudoso comportamiento los días 24 y 25 de febrero, y 25 de marzo. En ambos casos se visualizaron aumentos y disminuciones abruptas de la humedad de suelo en todos los sensores del perfil (inclusive en los más profundos - no calibrados), posiblemente asociados a infiltraciones de agua a lo largo del tubo de acceso

de la sonda. Se decidió en estos casos remover los períodos con lluvia de las series temporales de datos de humedad de suelo.

Mediante un variograma se determinó que la representatividad de la información en un determinado punto disminuye aproximadamente en la misma medida en 40 días y para distancias de 0,20 m en la vertical. Se ajustó un modelo lineal, que presentó una anisotropía con un cociente entre su eje mayor y el menor de 3,39, con un ángulo de $161,7^\circ$. El efecto pepita no se apartó del valor mínimo impuesto en el modelo. Considerando la función del variograma ajustado, se realizó una interpolación anisotrópica de la base de datos de humedad de suelo con el método de Kriging.

La humedad de suelo aumentó desde el nivel de superficie hasta aproximadamente 0,50 m de profundidad (Figura 3), donde es mayor la retención de agua debido a que el tipo textural de suelo de ese nivel es más arcilloso (Tabla I). En los niveles más superficiales (por encima de 0,40 m) se observan con cierta periodicidad las recargas de agua asociadas al ingreso de la

precipitación desde superficie. Las disminuciones posteriores se deben a la evaporación del suelo, al consumo de agua por parte del cultivo y a la percolación hacia capas más profundas. En los niveles en los que se dispuso de información de alta resolución temporal proveniente de los sensores capacitivos, se observó en términos generales variaciones más lentas de la humedad del suelo al aumentar la profundidad. La falta de observaciones por encima de los 0,08 m produce en la interpolación una resolución poco realista de su humedad, ya que los aumentos abruptos asociados a la precipitación deberían observarse desde superficie. Esta es una limitación tanto del método de interpolación como del sistema de medición. Por debajo de 0,40 - 0,50 m, la humedad del suelo disminuye con la profundidad. Se observa que, a medida que se secan los niveles más cercanos a superficie, se activa el consumo en raíces más profundas (Starr y Paltineanu, 1998), secándose paulatinamente el suelo desde niveles superiores hacia los inferiores.

Los mínimos valores en el contenido de agua, tanto en capas superficiales como profundas se observaron aproximadamente entre el 10 y el 25 de febrero (35 y 50 días posteriores al 6 de enero, respectivamente). Como la variedad de soja utilizada era de crecimiento indeterminado, durante ese período el cultivo se encontraba entre los estadios V4 o R3 (comienzo de formación de vainas) y V14 o R5 (comienzo de llenado de granos). En esas etapas del desarrollo la demanda de agua es elevada y combinado con un escaso aporte por precipitaciones (15 mm), se produjo una marcada disminución del agua del suelo (Figura 3). A partir de R5 las plantas empiezan a movilizar carbohidratos y nutrientes hacia los frutos en formación, aumentando paulatinamente la biomasa seca, por lo que la demanda de agua por parte del cultivo sigue siendo elevada pero decrece gradualmente. Entre el 25 de febrero y el 7 de marzo se produjeron 63 mm de precipitación, lo cual determinó un aumento del agua del suelo.

Se estimaron los errores de humedad de suelo interpolados con Kriging (Figura 4) utilizando el variograma ajustado (no mostrado). Los errores

asociados a mediciones con sensor capacitivo son mayores que el estimado con los métodos de referencia: las mediciones de humedad de suelo con sensor capacitivo tienen mayores errores iniciales, y a esos se les suman los asociados a las curvas de calibración. Los errores de interpolación se incrementaron más rápidamente con el tiempo hacia profundidades menores, al distanciarse de los datos originales de humedad de suelo, dada la anisotropía del modelo de variograma utilizado. En los niveles cercanos a 0,38 m los errores son de poca magnitud debido a que los datos tuvieron una muy buena representación con el modelo lineal con ordenada al origen nula. Los mayores errores están asociados a los niveles cercanos a la profundidad de 0,18 m, que se ven reducidos en el lapso en que se realizan muestreos gravimétricos a 0,125 m. Los valores de los errores en ese nivel de medición llegan a ser del orden de los valores de humedad del suelo, lo que resalta la importancia de tener mayor resolución vertical de los datos de referencia en niveles cercanos a superficie para las calibraciones, donde la variabilidad espacial de la humedad es mayor. Hacia el final del período de medición (desde el 15 de marzo y hasta el 8 de abril), también se produce un incremento de los errores dado que solo se dispuso de las observaciones con los sensores capacitivos.

4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se exploraron metodologías de calibración de sensores, generando una base de datos de humedad del suelo de alta resolución temporal. Para la calibración se utilizaron observaciones gravimétricas, con sonda de neutrones y con sensores capacitivos. Se generaron criterios objetivos para verificar la calidad de la información obtenida, identificando problemas asociados al proceso de medición y cuantificando los errores para la información disponible.

El proceso de calibración del sensor capacitivo indicó que la mejor función de transformación para el conjunto de los datos disponibles fue la lineal. La función no sólo es más sencilla sino que también mejora el valor estimado con la

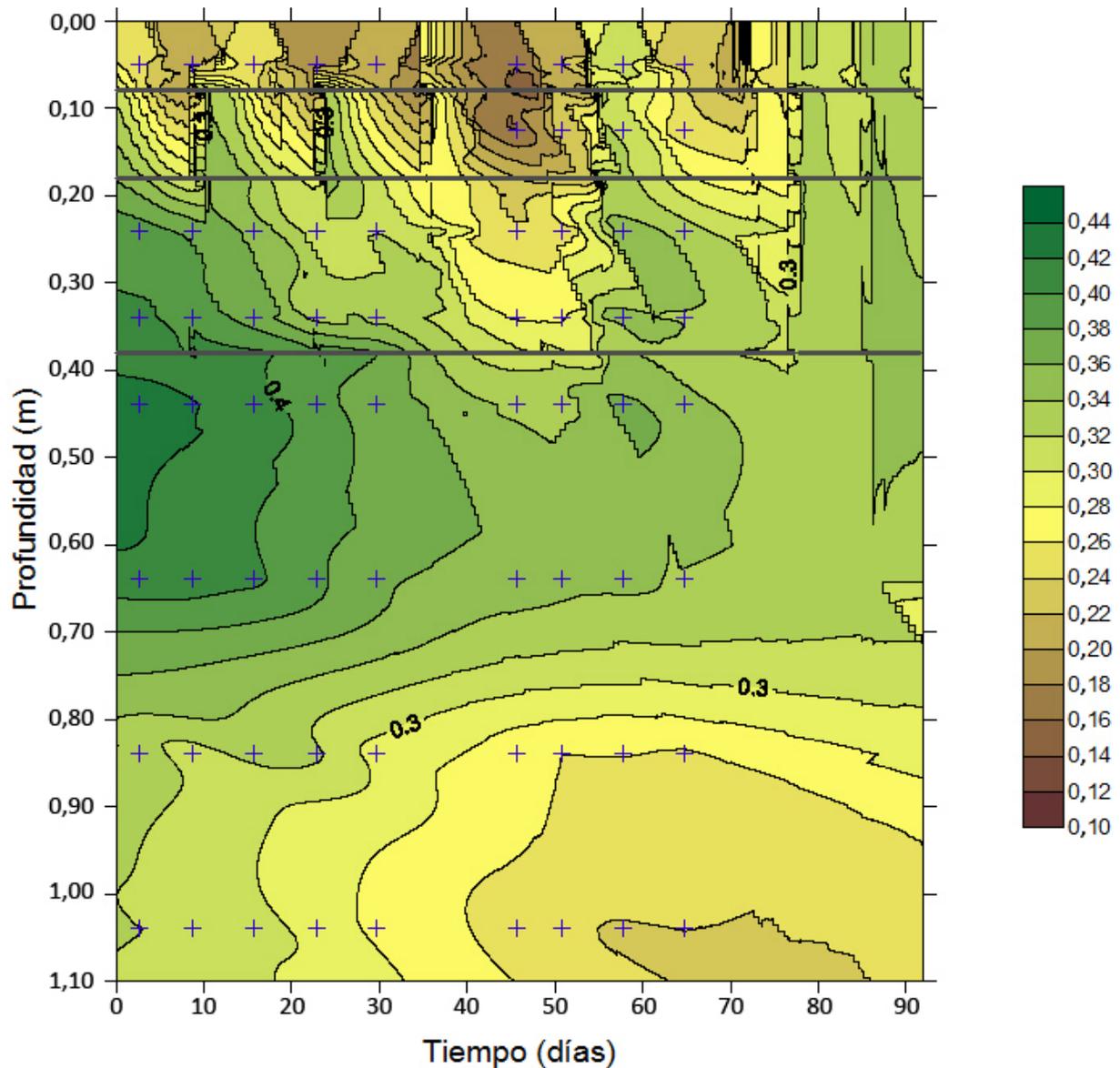


Figura 3: Datos de humedad de suelo (m^3/m^3) interpolados con el método de Kriging con su respectiva escala de valores. En el eje vertical se indica la profundidad en metros. En el eje horizontal se indica el tiempo transcurrido en días, desde el 06 de enero del 2013 a las 17:45 h, momento de inicio del registro de datos. Las cruces azules indican la profundidad y el momento de los muestreos con método gravimétrico y sonda de neutrones. Las líneas continuas grises indican las profundidades para las que hay datos de humedad de suelo cada 15 minutos, reconstruidos de las mediciones con sensor capacitivo.

función potencial propuesta por el fabricante. Los coeficientes de ajuste lineal fueron diferentes para la calibración de cada nivel de profundidad, es decir que las curvas de ajuste para cada nivel de medición resultaron diferentes entre sí. Esto posiblemente haya estado asociado a las diferencias texturales y de densidad aparente de

cada horizonte, por lo que se puede concluir que se necesita una calibración no sólo para cada tipo de suelo, sino para cada profundidad. Se pudo representar de manera adecuada las mediciones de humedad de suelo con sensor capacitivo en los primeros tres niveles, pero posibles deficiencias en la instalación del equipamiento no permitieron

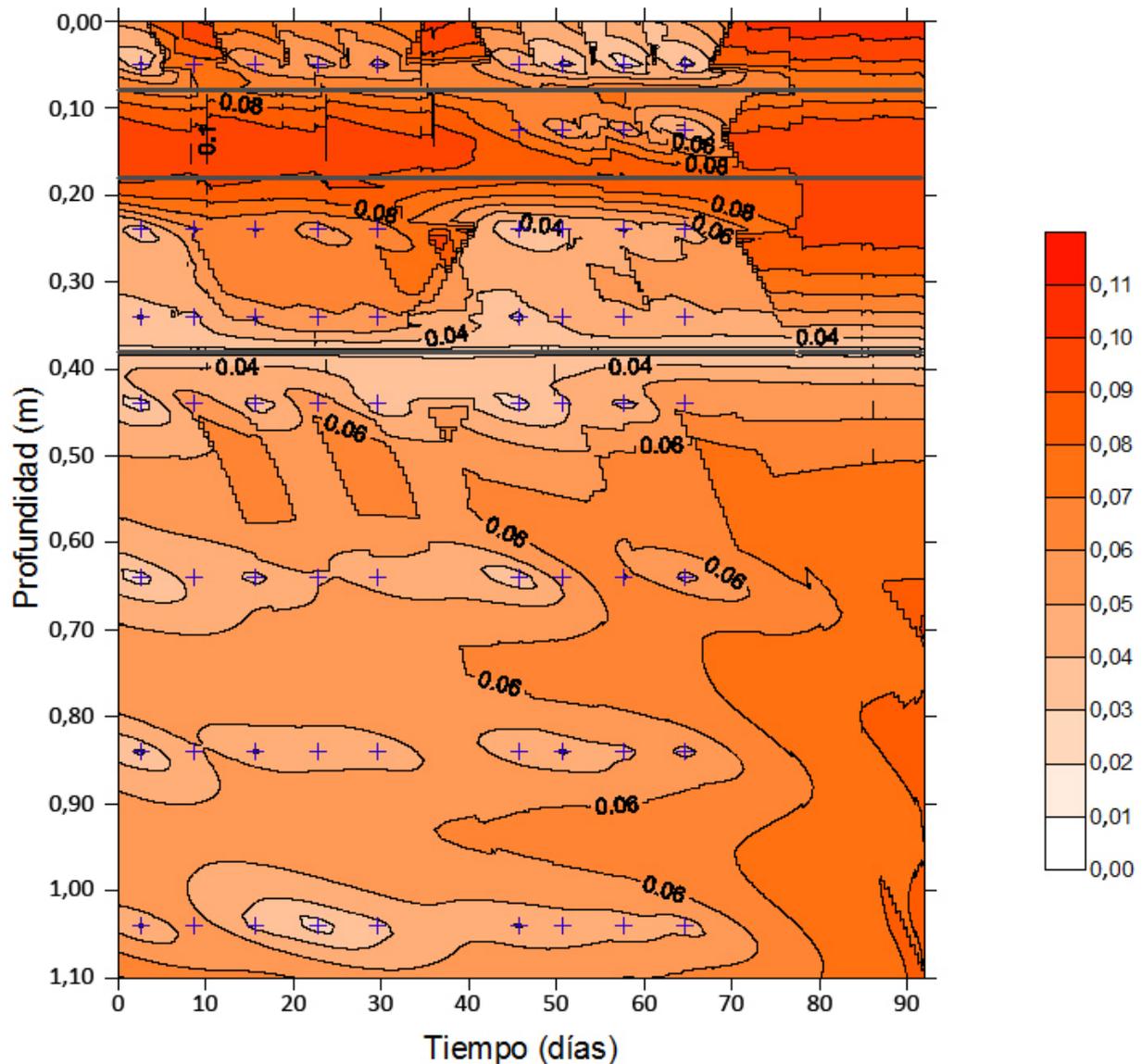


Figura 4: Ídem Figura 3, donde la variable representada es el error total de los datos de humedad de suelo (m^3/m^3), con su respectiva escala de valores.

calibrar los dos niveles más profundos del perfil de suelo. Es posible que la falta de respuesta en estos dos últimos niveles se haya debido a defectos de instalación tales como una brecha con aire en el entorno del sensor, lo que destaca la necesidad de realizar la instalación del instrumental con sumo cuidado y siguiendo las recomendaciones del fabricante, y verificar su respuesta posterior frente a las mediciones de referencia. Los mayores errores en la calibración estuvieron asociados al valor con el que se realizó la acotación de error en la verticalidad de la instalación del tubo de

observación. Es aconsejable, desde el punto de vista de la calibración, realizar los muestreos con los métodos de referencia en los mismos niveles de medición del sistema capacitivo para reducir los errores asociados a la interpolación de los datos. En este trabajo, la configuración vertical de las mediciones de referencia estaba determinada de antemano dado que la campaña contempló otro tipo de observaciones además de las aquí utilizadas, por lo que fue no fue posible modificarla. Es aconsejable también optimizar los momentos de muestreo de modo de cubrir

el rango total de variabilidad en la humedad del suelo para cada nivel. La calidad de la información y el modelo utilizado en la curva de calibración determinan los errores de los parámetros, y por ende impactan en el error final informado para los datos del sensor capacitivo.

El método de interpolación de Kriging permitió generar una base de datos de muy buena resolución temporal y espacial de los datos de contenido de humedad. Sin embargo, debido a la discontinuidad que representa el nivel de superficie el método no permite una interpolación adecuada de los datos cerca de la misma. En caso de requerirse información más precisa en los primeros centímetros de suelo, deberían utilizarse sensores dispuestos específicamente para ello. Los mayores errores resultaron del mismo orden de magnitud de los valores de humedad de suelo obtenidos, y estuvieron asociados a los errores de las mediciones con sensor capacitivo y a su propagación lineal, con excepción del nivel de 0,38 m, en el cual la buena representación de los datos dada por el ajuste lineal sin ordenada al origen produjo mínimos errores. Para reducir los errores de interpolación es conveniente disponer de datos con alta resolución temporal y vertical.

Agradecimientos: Este trabajo fue financiado con fondos de los proyectos PIP 11220100100044 (CONICET, Argentina) y PICT 2010-0554 (ANPCyT, Argentina).

REFERENCIAS

- Baumhardt R.L., Lascano R.J. y Evett S.R., 2000. Soil material, temperature, and salinity effects on calibration of multisensor capacitance probes. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64, 6, 1940-1946.
- Batallanez E., 1972. Capacidad de almacenaje de humedad para cuatro series de suelos del S.E. de la Provincia de Buenos Aires. Tesis Ingeniero Agrónomo-Universidad Católica de Mar del Plata, Balcarce.
- Chandler D.G., Seyfried M., Murdock M. y McNamara, J.P., 2004. Field calibration of water content reflectometers. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68, 5, 1501-1507.
- Cressie N., 1993. *Statistics for Spatial Data*, rev. ed. Wiley, New York, 900 págs.
- Czarnomski N.M., Moore G.W., Pypker T.G., Licata J. y Bond B.J., 2005. Precision and accuracy of three alternative instruments for measuring soil water content in two forest soils of the Pacific Northwest. *Can. J. For. Res.*, 35, 1867-1876.
- Da Silva C.R.D., Andrade Júnior A.S.D., Alves Júnior J., Souza A.B.D., Melo F.D.B. y Coelho Filho M.A., 2007. Calibration of a capacitance probe in a Paleudult. *Scientia Agricola.*, 64, 6, 636-640.
- De Lannoy G.J., Verhoest N.E., Houser P.R., Gish T.J. y Van Meirvenne M., 2006. Spatial and temporal characteristics of soil moisture in an intensively monitored agricultural field (OPE 3). *J. Hydrol.*, 331, 3, 719-730.
- Di Pietro L.B. y Suero E.E., 1983a. Medición de densidad aparente del suelo utilizando una sonda gamma. *Ciencia del Suelo* 1, 1, 93-94.
- Di Pietro L.B. y Suero E.E. 1983b. Calibración a campo de una sonda de neutrones para medición de humedad en un argiudol del sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo* 1, 2, 1-4.
- EnviroSMART soil water content profile probes (Revision 3/09), 2009. Campbell Scientific, Inc., 44 págs. (www.campbellsci.com).
- Evett S.R. y Steiner J.L., 1995. Precision of neutron scattering and capacitance type soil water content gauges from field calibration. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59, 961-968.
- Fares A., Buss, P., Dalton M., El-Kadi A. I. y Parsons, L. R., 2004. Dual field calibration of capacitance and neutron soil water sensors in a shrinking-swelling clay soil. *Vadoze Zone J.*, 3, 1390-1399.
- Fares A. y Polyakov V., 2006. Advances in crop water management using capacitance sensors. *Adv. Agron.*, 90, 43-77.
- Ferreira L.J., Salgado H., Saulo S. y Collini E., 2011. Modeled and observed soil moisture variability over a region of Argentina. *Atmos. Sci. Lett.*, 12, 334-339.
- Fehr W.R. y Caviness C.E., 1977. Stages of soybean development. *Iowa Agric. Exp. Stn.*

- Spec. Rep., 80 págs.
- Gardner W.H. y Klute A., 1986. Water content: Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods, 493-544.
- Gardner C.M.K., Dean T.J. y Cooper J.D., 1998. Soil water content measurement with a high-frequency capacitance sensor. *J. Agric. Engng. Res.*, 71, 395-403.
- Geesing D., Bachmaier M. y Schmidhalter U., 2004. Field calibration of a capacitance soil water probe in heterogeneous fields. *Aust. J. Soil Res.*, 42, 289-299.
- Hillel D., 1998. *Environmental Soil Physics*, Academic Press, San Diego, 771 págs.
- Jabro J.D., Leib B.G. y Jabro, A.D., 2005. Estimating soil water content using site-specific calibration of capacitance measurements from sentek EnviroSCAN systems. *Applied engineering in agriculture*.
- Jost G., Heuvelink G.B.M. y Papritz A., 2005. Analysing the space-time distribution of soil water storage of a forest ecosystem using spatio-temporal kriging. *Geoderma*, 128, 3, 258-273.
- Morgan K.T., Parsons L.R., Wheaton T.A., Pitts D.J. y Obreza T.A., 1999. Field calibration of a capacitance water content probe in fine sand soils. *Soil Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63, 4, 987-989.
- OMM-WMO, 1994. *Guía de prácticas hidrológicas N° 168*, Quinta edición, Geneva, 818 págs.
- OMM-WMO, 2008. *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation N° 8*, Seventh edition, Geneva, 681 págs.
- Paltineanu I.C. y Starr J.L., 1997. Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: Laboratory calibration. *Soil Sci. Soc. of Am. J.*, 61, 6, 1576-1585.
- Polyakov V., Fares A. y Ryder M.H., 2005. Calibration of a capacitance system for measuring water content of tropical soil. *Vadose Zone J.*, 4, 4, 1004-1010.
- Rosero E., Yang Z.L., Wagener T., Gulden L.E., Yatheendradas S. y Niu G.Y., 2010. Quantifying parameter sensitivity, interaction, and transferability in hydrologically enhanced versions of the Noah land surface model over transition zones during the warm season. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115, 1984-2012.
- Salazar L., Plaza J.C. y Moscatelli G., 1989. *Mapa de suelos de la Provincia de Buenos Aires*. Editorial Edipubli S.A, Buenos Aires, Argentina.
- Sentek Sensor Technologies *Acces Tube Intalation Guide (V 1.0)*, 2003. Sentek Pty Ltd., 57 págs. (<http://www.sentek.com.au>)
- Schume H., Jost G. y Katzensteiner K., 2003. Spatio-temporal analysis of the soil water content in a mixed Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.)–European beech (*Fagus sylvatica* L.) stand. *Geoderma*, 112, 3, 273-287.
- Snepvangers J.J.J.C., Heuvelink G.B.M. y Huisman, J.A., 2003. Soil water content interpolation using spatio-temporal kriging with external drift. *Geoderma*, 112, 3, 253-271.
- Starr J.L. y Paltineanu I.C., 1998. Real-time soil water dynamics over large areas using multisensor capacitance probes and monitoring system. *Soil and Tillage Research* 47, 1, 43-49.
- Suero E.E. y Travasso M.I., 1988. *Medición del contenido de agua en suelos. Métodos de radiación*. XII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.
- Van Bavel C.H.M., Underwood N. y Swanson R.W., 1956. Soil moisture measurement by Neutron moderation. *Soil Sci.*, 82, 29-41.
- Weinzettel P. y Usunoff E., 2003. Calibración de una sonda de capacitancia en suelos argiudoles de la zona central de la provincia de Bs. As., Argentina. *Zona no Saturada del Suelo*, 6, 165-170.

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo la licencia Creative Commons, que permite el uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.