agronomía&ambiente
Revista de la Facultad de Agronomía UBA
Nota

DIFERENCIA ENTRE DATOS DE HUMEDAD DEL SUELO OBTENIDOS MEDIANTE SISTEMAS SATELITALES DE MICROONDAS Y MEDICIONES "*IN SITU*"

Carballo, Federico D.[(1)]**; Salgado, Héctor A.**[(1),(2)]

[(1)] Servicio de Hidrografía Naval, Departamento Meteorología, pulpero@gmail.com
[(2)] Universidad de Buenos Aires / Facultad de Agronomía / Cátedra de Riego y Drenaje, hsalgado@agro.uba.ar

Recibido: 04-01-2016
Aceptado:: 12-06-2016

RESUMEN

La humedad del suelo (HS) es una variable hidrológica y climática clave, de interés y aplicación en diversos dominios científicos y operativos. En el ámbito de la meteorología es imprescindible en la inicialización y ajuste de modelos numéricos del tiempo, gravitando decisivamente en el pronóstico de otras variables hidrológicas y climáticas. Existen actualmente diversas fuentes de información de HS, entre las que se destacan aquellas de origen satelital por su amplia cobertura espacial y frecuencia temporal. Los sistemas de microondas se distinguen por su capacidad de brindar información bajo casi todas las condiciones de iluminación solar y nubosidad, lo cual asegura la disponibilidad continua de datos. En este trabajo se recopilan valores de HS provenientes de los sensores/sistemas actualmente accesibles ASCAT, AMSR2 y SMOS, para una zona agrícola de la Provincia de Buenos Aires, Argentina (Latitud 37º 09'S; Longitud 59º 42'W), y los correspondientes medidos en el terreno para la misma fecha. Se realizaron mediciones gravimétricas de HS con frecuencia mensual. También se instalaron sondas dieléctricas a 10 cm de profundidad, contando con una serie continua de más de un año de mediciones horarias. Se tabulan y grafican los estadísticos que evidencian las diferencias entre los productos satelitales y las mediciones de campo. Hasta el momento, los mejores resultados se obtuvieron con los productos LPRM y ASCAT (R^2 =0,5; RMSE= 7%). Este análisis contribuirá a la elección de datos más fiables para la caracterización de la variable de estado en modelos hidrológicos y meteorológicos.

Palabras clave: humedad del suelo, sensores remotos de microondas, modelos climáticos e hidrológicos

DIFFERENCE BETWEEN SATELLITE MICROWAVE SYSTEMS AND "*IN SITU*" SOIL MOISTURE DATA

SUMMARY

Soil moisture (SM) is a hydrological and climatic key variable, relevant for various scientific and operational domains. In the field of meteorology it is essential in starting and setting of numerical weather models, gravitating decisively in forecasting other hydrological and climatic variables. There are currently various sources of SM information, among which stand out satellite sources due to their wide spatial coverage and temporal frequency. Microwave systems are distinguished by their ability to provide information under nearly all conditions of solar lighting and clouds, ensuring continuous data availability. In this paper SM values from the currently accessible ASCAT, AMSR2 and SMOS systems are collected, for an agricultural area of the Province of Buenos Aires, Argentina (Latitude 37 ° 09'S, Longitude 59 ° 42'W), and the corresponding measured in the field for the same date. SM gravimetric measurements were performed on a monthly basis. Dielectric probes were installed at 10 cm deep, with a continuous series of more than one year of timely measurements. Calculated statistics, and graphs show differences between satellite products and field measurements. Best results were obtained with the products LPRM and ASCAT (R^2 =0,5; RMSE= 7%). This analysis allows distinguishing the satellite SM products best adjusted to the corresponding measured "*in situ*" in the study area, which will contribute to more reliable choice for characterizing the state variable in hydrological and meteorological data models.

Key Words: soil moisture, microwave remote sensing, climatic and hydrologic models

INTRODUCCIÓN

La humedad del suelo (HS) es una variable de interés y aplicación en diversos dominios científicos y operativos, clave en materia hidrológica y climática (Drusch, 2007; Wagner *et al.*, 2009). La obtención directa de la misma, a nivel continental o regional, es costosa y consume gran cantidad de tiempo, debido a su alta variabilidad espacial y temporal. Hoy se destacan las fuentes de medición de humedad del suelo de origen satelital, las cuales representan un importante recurso para el conocimiento y control de las variables biofísicas que rigen la dinámica hídrica en la superficie del suelo. Los sensores que operan en la región de las microondas se distinguen por su capacidad de captar datos, bajo condiciones de iluminación solar y nubosidad que son limitantes para otros rangos del espectro electromagnético. Es así, que la HS puede ser detectada en este rango, tanto a partir de sistemas activos (como los radares de apertura sintética), con resolución espacial desde 5 a 10 m y frecuencia mensual, como de sistemas pasivos (como los radiómetros), con resolución espacial del orden de la decena de kilómetros y frecuencia diaria. Se han desarrollado diversos algoritmos para la obtención de datos de humedad del suelo, entre los cuales se destacan el utilizado para el sensor Advanced Scatterometer (ASCAT) (Naeimi *et al.*, 2009 a,b, Wagner *et al.*, 2003, Wagner y Scipal, 2000, Wagner *et al.*, 1999 a,b,c), el del sensor Advanced Microwave Scanning Radiometer - Earth Observing System (AMSR-E) (Njoku *et al.*, 2004, Njoku *et al.*, 2003), el de la agencia espacial japonesa (JAXA) derivado del sensor Advanced Microwave Scanning Radiometer-2 (AMSR2) (Koike *et al.*, 2004), el algoritmo utilizado por el Land Parameter Retrieval Model (LPRM) (Owe *et al.*, 2008), el utilizado por el Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) (Kerr *et al.*, 2012) y el de AQUARIUS/SAC-D (Bindlish *et al.*, 2015). Sin embargo, todos se basan en el mismo principio, la ecuación de transferencia radiativa de orden cero (Mo *et al.*, 1982), donde se define que la temperatura de brillo (radiación que proviene de la superficie terrestre) es a grandes rasgos consecuencia de la temperatura termodinámica del suelo y la temperatura de la vegetación (Jackson *et al.*, 1993). Las diferencias entre los distintos productos radican en las frecuencias utilizadas, la elección de los distintos parámetros incluidos en la ecuación y las estrategias para resolver las incógnitas planteadas (humedad del suelo y espesor óptico de la vegetación –variable adimensional que da idea de la transparencia de un medio-) en esta ecuación. Los productos derivados entonces, han sido evaluados en diversas localidades del mundo (Dorigo *et al.*, 2011a, b) y con diversas estrategias, siendo comparadas frente a modelos de simulación de HS (Al-Yaari *et al.*, 2014a, b, Draper *et al.*, 2009) o con mediciones de HS *in situ* (Kim *et al.*, 2015, Jackson *et al.*, 2012, Albergel *et al.*, 2011, Su *et al.*, 2011, Sahoo *et al.*, 2008). En este contexto, existen pocos trabajos en Sudamérica y particularmente en la Argentina (Grings *et al.*, 2015, Dillon *et al.*, 2012), donde estos productos (derivados de sensores de microondas) son evaluados de forma sistemática.

Por ende, el conocimiento de la humedad del suelo es fundamental para la región pampeana, ya que es una de las extensiones agrícolas más importantes del mundo. Es por esto, que los productos de humedad del suelo derivados de sensores remotos son hoy un elemento estratégico en la región, para uso agro-meteorológico, de utilidad para hidrólogos, agrónomos, productores, ambientalistas, etc., debido a la posibilidad de obtener información de grandes áreas (kilómetros) en poco tiempo (frecuencias diarias) y a bajo costo. Dada la cantidad de productos de las distintas agencias espaciales e instituciones internacionales de investigación, existen proyectos nacionales para la obtención de productos operativos de HS en Argentina (Bruscantini *et al.*, 2014), adaptados a las condiciones locales, lo cual abre un abanico de nuevos análisis y una potencial mejoría de su performance en nuestra región. En este trabajo se presentan los

productos satelitales de HS, obtenibles de manera gratuita y con frecuencia operativa, baja resolución espacial, para una zona agrícola en la Provincia de Buenos Aires, Argentina, y los correspondientes medidos en el terreno para la misma fecha. El objetivo principal de este trabajo es cuantificar las diferencias entre valores de HS provenientes de mediciones satelitales y aquellos obtenidos en campo. En la siguiente sección se describen los materiales utilizados y en la sección Métodos, se realiza una descripción de la metodología utilizada para evaluar los productos. En la sección Resultados y Discusión, se tabulan, calculan y grafican los estadísticos, que evidencian las diferencias entre los valores de los productos satelitales y las mediciones de campo. En la sección Conclusiones, se plantean y discuten las posibles causas de tales diferencias. Este análisis permite distinguir los productos de HS mejor ajustados a los medidos "*in situ*" en el área de estudio, lo cual contribuirá a la elección de datos más fiables para la caracterización de la variable de estado en modelos hidrológicos y meteorológicos.

Materiales

Mediciones de humedad del suelo in situ

El área experimental (Figura 1) está incluida en la cuenca del Arroyo De Los Huesos, en el Partido de Azul, centro de la provincia de Buenos Aires, Argentina (centrada en latitud 37º 09'S; longitud 59º 42'W). Se trata de una zona ondulada, con producción intensiva agropecuaria. Las coberturas predominantes son los cultivos de verano (maíz, soja, girasol, etc.) y de invierno (trigo, cebada, avena, etc.), rastrojos, pasturas y áreas forestadas en los cascos de establecimientos rurales y laderas altas de las sierras. También hay afloramientos rocosos y cuerpos de agua superficiales.

Los suelos predominantes corresponden a la siguiente taxonomía (US Soil Taxonomy, 1975): Orden: Molisoles; Suborden: Udoles; Grandes Grupos: Argiudoles y Hapludoles. Los Argiudoles presentan una sucesión de horizontes (A1 – B1 – B2t – B3 – C), con buen contenido de materia orgánica en el A, y alto % de arcilla en el B2t. Los Argiudoles típicos son los suelos sobre los que se desarrolla la

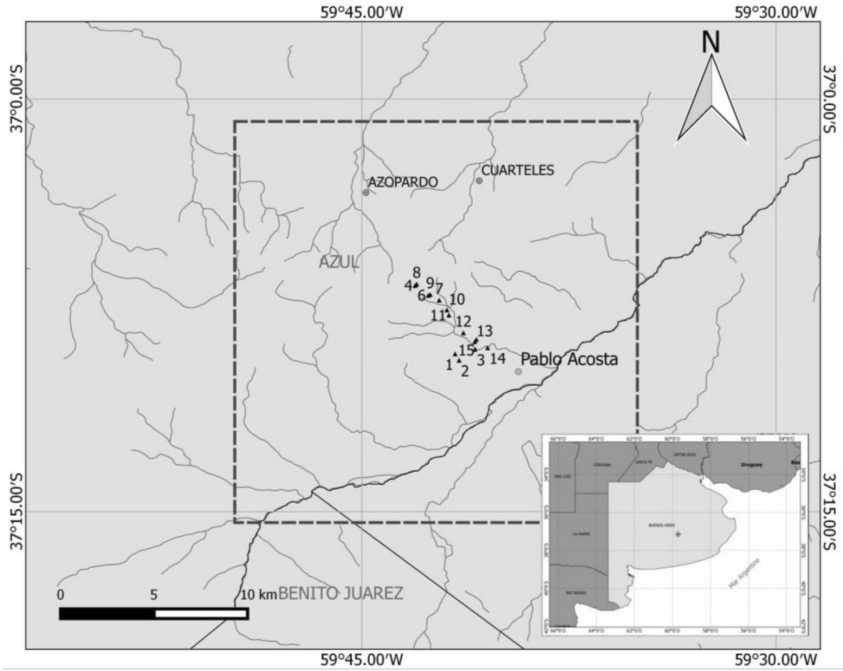


Figura 1: Mapa de ubicación del área piloto con los sitios de medición. Recuadro negro de línea entrecortada corresponde a un área equivalente en tamaño a un pixel de los productos satelitales analizados.

mayor parte de la actividad agrícola provincial. Las clases texturales del horizonte superficial varían entre franco-arcilloso, franco-arcillo-limoso y franco, predominando esta última (22% de arcilla; 33% de limo; 45% de arena).

Los datos de HS de campo provienen de muestreo gravimétrico y de sondas dieléctricas, ambos para el estrato de los primeros 10cm de profundidad.

Las campañas de medición se realizaron con frecuencia mensual, durante el período acotado entre enero de 2012 y mayo de 2015, realizándose un total de 34 campañas, en una red de 15 sitios georreferenciados, representativos de lotes bajo cultivo (ver Fig.1), y con adecuadas condiciones de acceso y seguridad. El geoposicionamiento se efectuó con un equipo navegador GPS (Garmin E-Trex Legend), referenciado con Sistema Mundial (WGS84). Con el objeto de poder comparar tales medidas con las de otras zonas, se empleó el método gravimétrico clásico, considerado Standard (Robock *et al.*, 2000), utilizando barreno, pesada de las muestras, y secado a estufa (110ºC durante 48hs).

A su vez, las mediciones continuas se realizaron con dos sondas dieléctricas (Stevens Hydra Probe II y Decagon ECH20), las cuales fueron calibradas para ajustarse a las condiciones texturales del sitio (Salgado *et al.*, 2012). Mediante un Data Logger se registraron los datos horarios durante todo el período de medición.

Productos satelitales de humedad del suelo

AMSR2

El sensor Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 (AMSR2) mide la temperatura de brillo (TB) de la superficie y atmósfera terrestre, y se encuentra a bordo del satélite Global Change Observation Mission (GCOM-W1), puesto en órbita por la Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) el 18 de mayo de 2012. Las mediciones de TB se encuentran en el rango de las microondas de 6,9 a 89 GHz (en polarización Vertical/Horizontal) y la observación de la Tierra se realiza en órbitas ascendentes (13:30 hora local solar) y descendentes (01:30 hora local solar). Dicho sensor es el sucesor del AMSR-E, en órbita en el satélite Aqua de la agencia espacial estadounidense (National Aeronautics and Space Administration NASA), el cual cesó sus funciones el 3 de octubre de 2011 por desperfectos técnicos.

Diversos algoritmos son aplicados rutinariamente para estimar valores de HS a partir de las observaciones del AMSR2. En este estudio son utilizados dos productos de humedad del suelo: el generado por JAXA (versión 01, referido aquí como el producto de JAXA) (Koike *et al.*, 2004) y el generado para el Land Parameter Retrieval Model (LPRM) (versión 001, referido aquí como el producto de LPRM) (Owe *et al.*, 2008).

El producto de humedad del suelo de JAXA de AMSR2 se puede obtener a través del proveedor de datos de GCOM-W1 (GCOM-W1 Data Providing Service: https://gcom-w1.jaxa.jp/auth.html). Para su generación, el método utilizado en el algoritmo es el mismo que se usó con el AMSR-E. Consiste en estimar los valores de humedad del suelo y contenido de agua en la vegetación simultáneamente (Koike *et al.*, 2004). En principio, se obtienen temperaturas de brillo para un amplio rango de parámetros de suelo y vegetación, en múltiples frecuencias y polarizaciones. Luego, los resultados son usados para generar Cuadros de consulta (Look-Up Tables LUT). Finalmente, la humedad del suelo y contenido de agua en la vegetación son estimados con el Índice de Diferencias de Polarización de Microondas (‘Microwave Polarization Difference Index’ MPDI) en la frecuencia de 10.65 GHz, y el Índice de Agua Líquida Medible en el perfil por el sensor o Índice de Humedad del Suelo (‘Index of Soil Wetness’ ISW) (Koike, Tsukamoto, Kumakura, y Lu, 1996) en las frecuencias 36,5 GHz y 10,65 GHz en la polarización horizontal.

El LPRM constituye una base de datos global de 3 parámetros: humedad del suelo, espesor óptico de la vegetación y temperatura de superficie, los cuales pueden descargarse desde el Global Change Master Directory (http://gcmd.gsfc.nasa.gov/). Éste se basa en el modelo directo de transferencia radiativa, en el que el espesor óptico de la vegetación es expresado como función de la constante dieléctrica del suelo y se utiliza el MPDI para evitar la dependencia de los datos de vegetación adicionales (Meesters, de Jeu, y Owe, 2005). La temperatura del suelo es obtenida independientemente, derivada de banda Ka en polarización vertical (Holmes, de Jeu, Owe, y Dolman, 2009). Finalmente, el valor de HS es el único parámetro desconocido en la ecuación y se obtiene a través de iteraciones no lineales. Esta estrategia permite obtener datos de HS para distintas longitudes de onda. Para este sensor en particular, se obtienen dos productos: uno en banda C y el otro en banda X. En este trabajo se utilizan los datos derivados de la banda X.

ASCAT

El sensor ASCAT es un radar de apertura real montado en el satélite Meteorological Operation-A (MetOp-A) lanzado en octubre de 2006. Orbita la Tierra en el modo ascendente a las 9:30 hora solar local y en modo descendente a las 21:30 hora solar local, operando en banda C (5.255 GHz) en polarización VV. Los valores de HS son obtenidos a partir de las mediciones de retrodispersión de ASCAT, utilizando un método basado en detección de cambios en series de tiempo desarrollado por la Universidad Tecnológica de Viena (TU-Wien) (Wagner *et al.*, 1999 a, b, c y Naeimi *et al.*, 2009 a, b). En este estudio, se utiliza la versión actualizada de la serie de tiempo desde enero de 2007 hasta julio de 2014, versión 2.2 WARP 5.5, provista por la European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT). El producto, descripto como SM-OBS-4, es distribuido por el H-SAF (http://hsaf.meteoam.it/), y representa el contenido de agua en la capa superficial, en unidades relativas desde 0 (seco) hasta el 100% (húmedo). Los datos son derivados de los valores de retrodispersión (σ) normalizados a un ángulo de referencia (40º), escalados entre los valores más bajos y altos de la serie de tiempo. Para convertir estos valores a datos volumétricos y permitir la comparación otros productos, como también con valores humedad del suelo *in situ*, se utilizan datos auxiliares de propiedades físicas del suelo. En este estudio, se trabajó con los datos de porosidad derivados de la Harmonized World Soil Database (HWSD) de la Food and Agriculture Organization (FAO) (Reynolds *et al.*, 2000**).**

SMOS

La Soil Moisture Ocean Salinity (SMOS) es la primera misión de la agencia espacial europea ('European Space Agency' ESA) diseñada especialmente para el monitoreo de la humedad del suelo, con el sensor "Microwave Imaging Radiometer with Aperture Synthesis" (MIRAS), que capta emisiones de microondas de la superficie de la Tierra, en banda L. Desde noviembre de 2009, SMOS provee cobertura global en el Ecuador cada 3 días con una órbita ascendente matutina a las 06:00 hora solar local y una órbita descendente a las 18:00 hora local solar (Kerr *et al.*, 2012). El producto de HS se obtiene utilizando el modelo directo L-MEB (L-band Microwave Emission of the Biosphere) (Wigneron *et al.*, 2007). La humedad del suelo y el espesor óptico de la vegetación son obtenidos de forma simultánea, desde distintos ángulos de visión, dada la configuración del instrumento MIRAS, minimizando una función de costo mediante un algoritmo iterativo de mínimos cuadrados generalizados (Wigneron *et al.*, 2007). En este estudio, se trabajó con el producto de humedad del suelo de SMOS MIRAS de Nivel 2 (aquí referido como el producto de SMOS) que comprende el período que va desde enero de 2010 hasta la actualidad.

En síntesis, los productos satelitales estudiados se presentan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Principales características de los modelos y sensores utilizados en este estudio.

Producto	*Sensor*	*Satélite*	*Resolución espacial*	*Polarización*	*Banda*	*Referencia*
LPRM	AMSR2	GCOM-W1	25 km	V, H	X	Owe *et al.*, 2008
JAXA	AMSR2	GCOM-W1	25 km	V, H	C	Koike *et al.*, 2004
ASCAT	ASCAT	METOP-A	25 km	VV	C	Naeimi *et al.*, 2009 a, b
L-MEB	MIRAS	SMOS	~25 km	V, H	L	Kerr *et al.*, 2012

Métodos

En cada sitio se tomaron 3 muestras con barreno de los primeros 10 cm de suelo. Los valores de humedad gravimétrica, densidad aparente y humedad volumétrica se calcularon siguiendo el método gravimétrico patrón (de pesada y secado). El promedio de las 3 medidas se adoptó como representativo del sitio. Los datos de los 15 sitios fueron promediados. De este modo, se obtuvo un único valor por día de campaña, con el fin de obtener un estimativo de la humedad del suelo de un área comparable con un pixel de los productos satelitales utilizados en este estudio. En cuanto a los datos satelitales, se eligieron los pixeles más cercanos al punto de coordenadas central del área de estudio, donde se realizaron las mediciones *in situ*. Al mismo tiempo, se clasificaron los datos de los productos satelitales entre las órbitas descendentes (D) y ascendentes (A). Las orbitas D de AMSR2, son cercanas al horario de las orbitas A de ASCAT y SMOS, lo cual fue tenido en cuenta al momento de analizar los resultados. Asimismo, las órbitas A de AMSR2 se corresponden con las D de ASCAT y SMOS. Las mediciones *in situ*, de las distintas campañas, fueron comparadas con ambas órbitas, sólo en aquellas fechas coincidentes con las pasadas. Todos los datos fueron llevados a unidades de humedad del suelo volumétricas (m^3/m^3). A partir del proceso de los datos, se obtuvieron distintos estadísticos para cuantificar el nivel de correspondencia entre los distintos productos y los datos de humedad *in situ*, como la diferencia media (Δ) y el error de la raíz del error cuadrático medio (RMSE). La correlación lineal se evaluó mediante el coeficiente de determinación (R^2) para un nivel de significancia $p < 0,05$, considerado como estadísticamente significativo (Albergel *et al.*, 2011).

Se realizó un análisis complementario, comparando la serie de tiempo de humedad del suelo de los sensores instalados en la estación y la serie provista por ASCAT, empleando los mismos parámetros anteriores (Δ, RMSE y R^2).

Cabe destacar que el sensor ASCAT representa una serie de tiempo de datos continuos disponibles desde 2007 hasta la actualidad, lo que permite potenciales análisis meteorológicos de mayor longitud temporal, a diferencia de los datos de LPRM que presentan una mejor performance con los datos *in situ*. Por este motivo, se realiza el análisis comparativo con los datos continuos del sensor *in situ* con la serie derivada de ASCAT.

Resultados y discusión

En esta sección presentamos las comparaciones de valores correspondientes a cada producto satelital, con respecto a los datos *in situ*. Se obtuvieron los estadísticos Δ, RMSE y R^2 y se generaron los diagramas de dispersión de los datos satelitales con los correspondientes a las distintas fechas de las campañas realizadas durante 2012-2015, que se observa en Figura 2.

En general, los valores de los productos satelitales resultan más bajos que los correspondientes a mediciones de campo (Fig.2a, b, e, f, g y h). Uno de los posibles motivos de tales diferencias, podría radicar en que las mediciones de campo con barreno se efectúan en la capa de los primeros 10cm de profundidad,

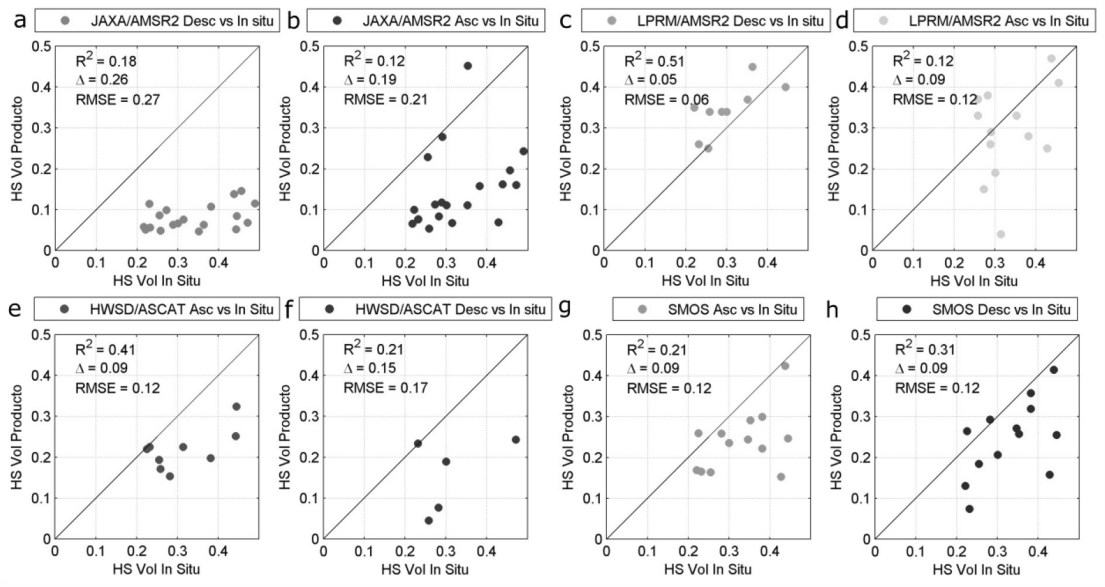


Figura 2: Diagramas de dispersión entre los productos satelitales versus los datos in situ promediados, en el siguiente orden, de izquierda a derecha: a) JAXA D, b) JAXA A, c) LPRM D, d) LPRM A, e) ASCAT A, f) ASCAT D, g) SMOS A, h) SMOS D.

mientras que la HS detectable por los sistemas satelitales de microondas corresponden a unos pocos cm. En este fino estrato superficial la dinámica de la HS es mayor, y, ante la ausencia de lluvia, la HS es menor que en estratos más profundos (Salgado *et al.*, 2014).

A su vez, los datos LPRM muestran mayor relación con los datos de campaña (Fig.2c y d), principalmente los de órbita D.

Los estadísticos, ordenados por órbita Descendente (D) o Ascendente (A) se presentan en la Cuadro 2.

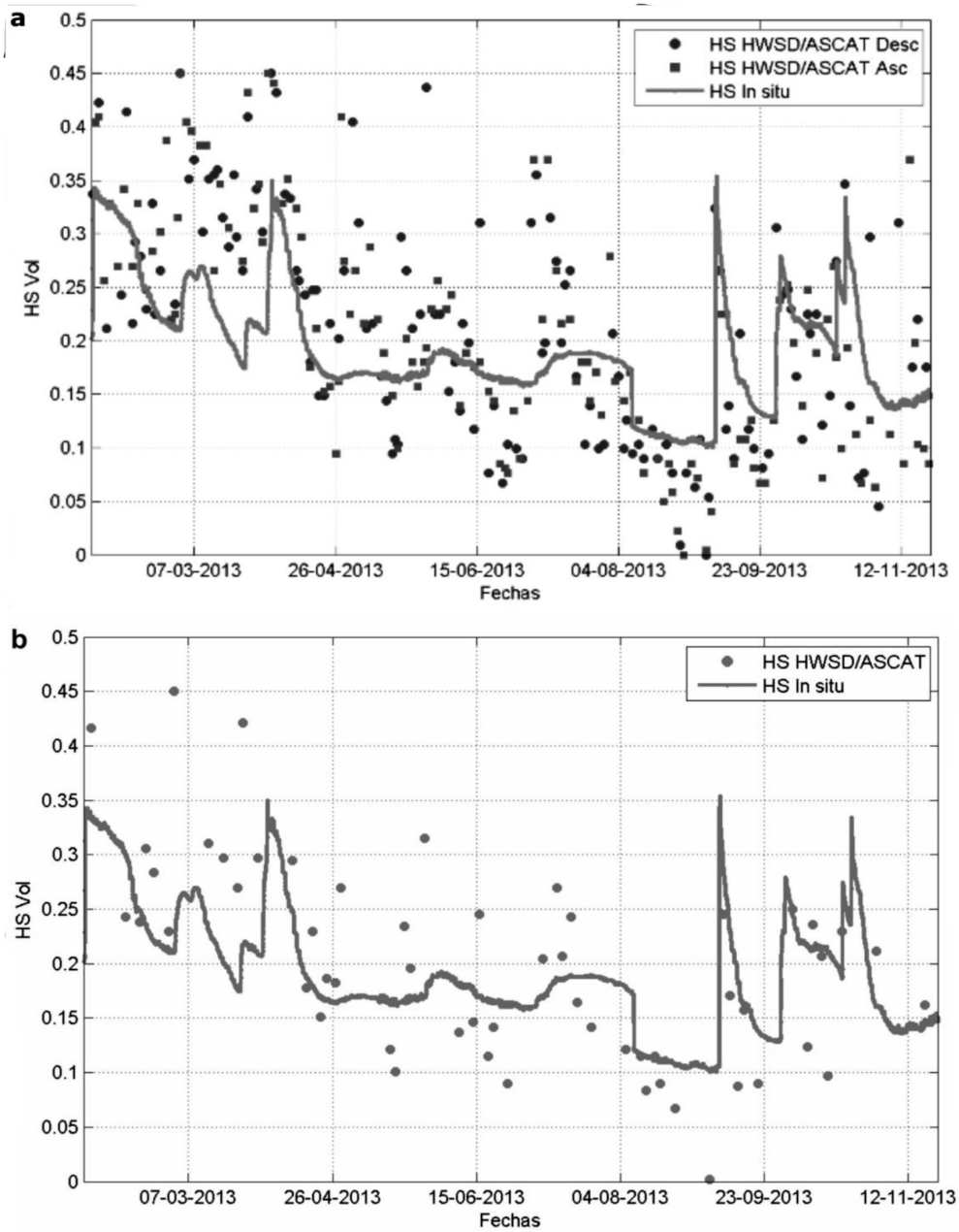
La regresión lineal presenta en general baja correlación para los distintos productos, con un valor de R^2 que apenas alcanza el 0,51 para los datos LPRM en orbitas D. En este caso, la Diferencia Media (Δ) es de 5%, con un RMSE de 7%.

En cuanto a las series de tiempo, se grafican los datos obtenidos en la estación de medición de HS por la sonda dieléctrica (a 10 cm) durante el año 2013, y se comparan con los datos derivados del sensor ASCAT en pasadas A y D (Fig.3a), utilizando los datos auxiliares de porosidad provistos por la FAO (45% en este caso). Además, se promediaron las pasadas (A y D) de ASCAT (Fig.3b), para evaluar su performance en un único producto diario combinado.

Cuadro 2: Parámetros estadísticos resultado de la comparación de los distintos productos respecto de los datos *in situ* obtenidos en las distintas campañas.

Producto	***Descendente***			***Ascendente***		
	R^2	***Δ***	***RMSE***	***R^2***	***Δ***	***RMSE***
JAXA	0,18	0,26	0,27	0,12	0,19	0,21
LPRM	0,51	0,05	0,07	0,12	0,09	0,12
ASCAT	0,21	0,15	0,17	0,41	0,10	0,12
SMOS	0,31	0,09	0,12	0,21	0,09	0,12

Figura 3: Evolución temporal de HS medida en la Estación (línea continua) vs. datos ASCAT: a) Orbitas A y D; b) Promedio entre A y D diario.



Los parámetros estadísticos, en Cuadro 3, muestran un mejor ajuste para las órbitas A (R^2 = 0,44). Al considerar las 2 órbitas diarias, el valor de R^2 desciende levemente. Dicho ajuste coincide con lo obtenido para pasadas A de ASCAT en el conjunto de datos anterior (Cuadro 2).

Cuadro 3: Estadísticos derivados del análisis comparativo entre series de tiempo del producto ASCAT y los datos de HS de la estación.

Producto	*R^2*	*Δ*	*RMSE*
Descendente	0,29	0,07	0,09
Ascendente	0,44	0,06	0,08
Diario	0,41	0,06	0,07

En síntesis, hasta el momento se han obtenido los mejores resultados con los productos LPRM (pasivo, rango 6,9 a 89 GHz, polarización H y V) en orbitas D (nocturnas, a la 04:30hs), y ASCAT (activo, en banda C, polarización VV) en orbitas A (nocturnas, a las 02:00hs).

Diferentes estudios en distintas regiones del mundo mostraron correlaciones significativas con los datos orbitales ASCAT. Los análisis de Albergel *et al.* (2009) en el SW de Francia con más de 13 sitios para el año 2007 mostraron una correlación significativa con los datos derivados de ASCAT en 11 estaciones con los datos obtenidos de orbitas descendentes, pero sólo en 4 estaciones la correlaciones fueron significativas con los datos de órbitas ascendentes, obteniendo valores de RMSE entre 3 y 9%, con un valor medio de 6%. Brocca *et al.* (2011) compararon el producto humedad del suelo ASCAT con tres productos AMSR-E y observaciones *in situ* en 17 sitios en Europa (Italia, España, Francia y Luxemburgo), y obtuvieron una buena correlación entre los datos ASCAT con los correspondientes datos AMSR-E y las mediciones de campaña del orden de r=0.71. Matgen *et al.* (2012) encontraron una buena correlación (r = 0,86) en una cuenca experimental en Luxemburgo con la serie derivada de ASCAT. Dente *et al.* (2012) compararon también el producto de ASCAT con datos de una red de monitoreo de humedad del suelo en la meseta del Tibet, y reportaron valores de R^2 de 0.34 y 0.43. Estudios realizados y recopilados por Bhimala y Goswami (2015) en 7 sitios en la India registraron diferencias estacionales en la relación de datos ASCAT con mediciones *in situ*, obteniendo un coeficiente de correlación mayor para la época de lluvias (verano, otoño), y moderado para la temporada seca (invierno, primavera). En general, los coeficientes de correlación variaron entre 0,73 y 0,91.

CONCLUSIONES

Los resultados muestran una mejor performance para las pasadas coincidentes con horarios nocturnos en los cuales, ante ausencia de precipitaciones, la HS es más estable.

El producto LPRM de órbitas D presenta los resultados más vinculados con las mediciones *in situ*.

Para las series de tiempo, el producto combinado de ASCAT (diario) ha mejorado el desempeño de ambas pasadas, con RMSE=7%. Los resultados muestran similitudes con los obtenidos en trabajos realizados en otras regiones agrícolas del mundo. Resulta conveniente extender las series de tiempo, para los distintos productos de HS y prolongar el período de comparación de las mismas.

Los productos de humedad satelitales representan una potencial herramienta para el conocimiento, monitoreo y control de la HS en la región productiva de la Argentina.

En vista de todo lo anterior, es aconsejable la continuación y profundización de estudios y realización de análisis y posibles correcciones con parámetros locales para los datos de HS, para su utilización en modelos hidrológicos y meteorológicos.

BIBLIOGRAFÍA

Albergel, C.; E. Zakharova; J. C. Calvet; M. Zribi; M. Pardé; J. P. Wigneron; N. Novellod; Y. Kerr; A. Mialon and N. Fritz. 2011. A first assessment of the SMOS data in southwestern France using *in situ* and airborne soil moisture estimates: The CAROLS airborne campaign. *Remote Sensing of Environment*, 115(10): 2718–2728.

Albergel, C.; C. Rüdiger; D. Carrer; J.-C. Calvet; N. Fritz; V. Naeimi; Z. Bartalis and S. Hasenauer. 2009. An evaluation of ASCAT surface soil moisture products with *in situ* observations in Southwestern France. Hydrol. *Earth Syst. Sci.*, 13(2):115–124.

Al-Yaari, A.; J. P. Wigneron; A. Ducharne; Y. Kerr; P. de Rosnay; R. de Jeu; A. Govind; A. Al Bitar; C. Albergel; J. Muñoz-Sabater; P. Richaume and A. Mialon. 2014a. Global-scale evaluation of two satellite-based passive microwave soil moisture datasets (SMOS and AMSR-E) with respect to Land Data Assimilation System estimates. *Remote Sensing of Environment*, 149: 181–195.

Al-Yaari, A.; J. P. Wigneron; A. Ducharne; Y. H. Kerr; W. Wagner; G. De Lannoy; R. Reichle; A. Al Bitar; W. Dorigo; P. Richaume and A. Mialon. 2014b. Global-scale comparison of passive (SMOS) and active (ASCAT) satellite based microwave soil moisture retrievals with soil moisture simulations (MERRALand). *Remote Sensing of Environment*, 152: 614–626.

Bhimala, K. R. and P. Goswami. 2015. Comparison of soil moisture data over the Indian region. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(10): 5425-5434.

Bindlish, R.; T. Jackson; M. Cosh; Z. Tianjie and P. O'Neill. 2015. Global Soil Moisture From the Aquarius/SAC-D Satellite: Description and Initial Assessment. Geoscience and Remote Sensing Letters, *IEEE*, 12(5): 923-992 doi: 10.1109/LGRS.2014.2364151

Bruscantini, C. A.; F. Grings; M. Barber; P. Perna and H. Karszenbaum. 2014. A Bayesian approach for a SAC-D/aquarius soil moisture product. 13th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment (MicroRad) 2014. p.1-4. doi: 10.1109/MicroRad.2014.6878896

Brocca, L.; S. Hasenauerb; T. Lacavac; F. Melonea; T. Moramarcoa; W. Wagnerb; W. Dorigob; P. Matgend; J. Martínez-Fernándeze; P. Llorensf; J. Latronf; C. Marting; M. Bittellih. 2011. Soil moisture estimation through ASCAT and AMSRE sensors: An intercomparison and validation study across Europe. *Remote Sens. Environ.*, 115(12): 3390–3408.

Dente, L.; Z. Vekerdy; J. Wen, and Z. Su. 2012. Maqu network for validation of satellite-derived soil moisture products. *Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinf.*, 17: 55–65.

Dillon, M. E.; E. Collini; L. Ferreira; G. Pujol; D. Dadamia. 2012. Comparación entre los datos de humedad de suelo obtenidos en campañas de medición y los resultados de modelos globales de suelo y estimaciones de sensores remotos. IFRH 2012, 1er Encuentro de Investigadores en Formación de Recursos Hídricos.

Dorigo, W. A.; W. Wagner; R. Hohensinn; S. Hahn; C. Paulik; A. Xaver; A. Gruber; M. Drusch; S. Mecklenburg; P. van Oevelen: A. Robock and T. Jackson. 2011a. The International Soil Moisture Network: A data hosting facility for global *in situ* soil moisture measurements. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15 (5): 1675-1698.

Dorigo, W.; P. Van Oevelen; W. Wagner; M. Drusch; S. Mecklenburg; A. Robock and T. Jackson. 2011b. A new international network for *in situ* soil moisture data. *Eos*, 92(17): 141-142.

Draper, C. S.; J. P. Walker; P. J. Steinle; R. A. M. de Jeu and T. R. H. Holmes. 2009. An evaluation of AMSR-E derived soil moisture over Australia. *Remote Sensing of Environment*, 113(4): 703–710.

Drusch, M. 2007. Initializing numerical weather prediction models with satellite-derived surface soil moisture: Data assimilation experiments with ECMWF's Integrated Forecast System and the TMI soil moisture data set. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 112-D3. ISSN 2156-2202. DOI 10.1029/2006JD007478

Grings, F.; C. A. Bruscantini; E. Smucler; F. Carballo; M. E. Dillon; E. A. Collini; M. Salvia and H. Karszenbaum. 2015. Validation Strategies for Satellite-Based Soil Moisture Products Over Argentine Pampas. IEEE *Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8: 4094-4105.

Holmes, T. R. H.; R. A. M. de Jeu; M. Owe and A. J. Dolman. 2009. Land surface temperature from Ka band (37 GHz) passive microwave observations. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 114(D04113). http://dx.doi.org/10.1029/2008JD010257.

Jackson, T. J.; R. Bindlish; M. H. Cosh; T. J. Zhao; P. J. Starks; D. D. Bosch; M. Seyfried; M. S. Moran; D. C. Goodrich; Y. H. Kerr and D. Leroux. 2012. Validation of Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) soil moisture over watershed networks in the US. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(5): 1530–1543.

Jackson, T. J. 1993. Measuring Surface Soil Moisture Using Passive Microwave Remote Sensing. *Hydrological Processes*, 7: 139–152.

Kerr, Y. H.; P. Waldteufel; P. Richaume; J. P. Wigneron; P. Ferrazzoli; A. Mahmoodi; A. Al Bitar; F. Cabot; C. Gruhier; S. E. Juglea; D. Leroux; A. Mialon and S. Delwart. 2012. The SMOS soil moisture retrieval algorithm. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(5): 1384–1403.

Kim, S.; Y. Y. Liu; F. M. Johnson; R. M. Parinussa and A. Sharma. 2015. A global comparison of alternate AMSR2 soil-moisture products: Why do they differ? Remote Sensing of Environment, 161: 43-62 http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.02.002

Koike, T.; Y. Nakamura; I. Kaihotsu; G. Davva; N. Matsuura; K. Tamagawa and H. Fujii. 2004. Development of an Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR-E) algorithm of soil moisture and vegetation water content. *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, JSCE, 48: 217–222.

Koike, T.; T. Tsukamoto; T. Kumakura and M. Lu. 1996. Spatial and seasonal distribution of surface wetness derived from satellite data. Proceeding of the International Workshop on Macro-scale Hydrological Modeling, 87–96.

Matgen, P.; S. Heitz; S. Hasenauer; C. Hissler; L. Brocca; L. Hoffmann; W. Wagner and H. H. G. Savenije. 2012. On the potential of MetOp ASCAT-derived soil wetness indices as a new aperture for hydrological monitoring and prediction: A field evaluation over Luxembourg. *Hydrol. Process.*, 26(15): 2346–2359.

Meesters, A. G.; R. A. M. de Jeu and M. Owe. 2005. Analytical derivation of the vegetation optical depth from the microwave polarization difference index. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2(2): 121–123.

Mo, T.; B. J. Choudhury; T. J. Schmugge; J. R. Wang and T. J. Jackson. 1982. A model for microwave emission from vegetation-covered fields. Journal of Geophysical Research, Oceans, 87(C13): 11229–11237.

Naeimi, V.; K. Scipal; Z. Bartalis; S. Hasenauer and W. Wagner. 2009a. An improved soil moisture retrieval algorithm for ERS and METOP scatterometer observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(7): 1999–2013.

Naeimi, V.; Z. Bartalis and W. Wagner. 2009b: ASCAT Soil Moisture: An Assessment of the Data Quality and Consistency with the ERS Scatterometer Heritage. Journal Hydrometeor., 10: 555–563. doi: http://dx.doi.org/10.1175/2008JHM1051.1

Njoku, E. G.; T. Chan; W. Crosson and A. Limaye. 2004. Evaluation of the AMSR-E Data Calibration Over Land. *Italian Journal of Remote Sensing*, 30/31: 19-37.

Njoku, E. G.; T. L. Jackson; V. Lakshmi; T. Chan and S. V. Nghiem. 2003. Soil Moisture Retrieval from AMSR-E. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(2): 215-229.

Owe, M.; R. A. M. de Jeu and T. R. H. Holmes. 2008. Multisensor historical climatology of satellite-derived global land surface moisture. Journal of Geophysical Research, Earth Surface, 113, F01002. http://dx.doi.org/10.1029/2007JF000769.

Reynolds, C. A.; T. J. Jackson and W. J. Rawls. 2000. Estimating soil water-holding capacities by linking the Food and Agriculture Organization Soil map of the world with global pedon databases and continuous pedotransfer functions. *Water Resources Research*, 36(12): 3653–3662.

Robock A., Vinnikov K., Srinivasan G., Entin J., Hollinger S., Sperankaya N., Liu S. and Namkhai A., 2000. The Global Soil Moisture Data Bank. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol.81, N 6, June 2000, USA, pp.1281-1299.

Sahoo, A. K.; P. R. Houser; C. Ferguson; E. F. Wood; P. A. Dirmeyer and M. Kafatos. 2008. Evaluation of AMSR-E soil moisture results using the in-situ data over the Little River Experimental Watershed, *Georgia. Remote Sensing of Environment*, 112(6): 3142–3152.

Salgado H.; S. M. Zabala y C. Romay. 2014. Monitoreo de la humedad del suelo a escala de cuenca hídrica. En: "Desarrollos de Ingeniería Agrícola en América Latina". Editores: M. C. Edgar Ramirez Galeano, Dr. Gilberto de Jesús López Cantens y Dr. Eugenio Romantschik Kriuchkova, Universidad Autónoma de Chapingo, México. ISBN 978-607-12-0356-4. 7pp.

Salgado H.; C. Romay; S. M. Zabala y L. Génova. 2012. Calibración de campo de un sensor dieléctrico para suelos en la Provincia de Buenos Aires. VI Jornadas Riego y Fertirriego, Mendoza, 7-9 noviembre 2012, 8 pp.

Su, Z.; J. Wen; L. Dente; R. van der Velde, Wang; Y. Ma; K. Yang and Z. Hu. 2011. The Tibetan Plateau observatory of plateau scale soil moisture and soil temperature (Tibet-Obs) for quantifying uncertainties in coarse resolution satellite and model products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(7): 2303–2316.

US Soil Survey Staff, 1975. Soil Taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil maps, US. Department of Agriculture, Agriculture Handbook N°436, USA, 754 pp.

Wagner, W., N. E. C. Verhoest, R. Ludwig, and M. Tedesco, 2009. Remote sensing in hydrological sciences. In Hydrology and Earth System Sciences, 13, 813-817.

Wagner, W., Scipal, K., Pathe, C., Gerten, D., Lucht, W. and Rudolf, B., 2003. Evaluation of the agreement be-tween the first global remotely sensed soil moisture data with model and precipitation data. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, 108(D19), Art. No. 4611.

Wagner, W. and Scipal, K., 2000. Large-scale soil moisture mapping in western Africa using the ERS scatterometer. *IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing*, 38(4), 1777-1782.

Wagner, W., Lemoine, G., Borgeaud, M. and Rott, H., 1999a. A study of vegetation cover effects on ERS scatterometer data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(2II), 938-948.

Wagner, W., Lemoine, G. and Rott, H., 1999b. A method for estimating soil moisture from ERS scatterometer and soil data. *Remote Sensing of Environment*, 70(2), 191-207.

Wagner, W., Noll, J., Borgeaud, M. and Rott, H., 1999c. Monitoring soil moisture over the Canadian Prairies with the ERS scatterometer. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37, 206-216.

Wigneron, J. P., Kerr, Y., Waldteufel, P., Saleh, K., Escorihuela, M. J., Richaume, P., Ferrazzoli, P., de Rosnay, P., Gurney, R., Calvet, J.-C., Grant, J. P., Guglielmetti, M., Hornbuckle, B., Mätzler, C., Pellarin, T., and Schwank, M., 2007. L-band Microwave Emission of the Biosphere (L-MEB) model: Description and calibration against experimental data sets over crop fields. *Remote Sensing of Environment*, 107(4), 639–655.