

Evaluación de productos satelitales de humedad del suelo, derivados de sensores de microondas, en la Pampa Argentina

Federico Carballo ¹, Héctor Salgado ^{1,2}, Stella Maris Zabala ^{2,3}

¹ Departamento Meteorología, Servicio de Hidrografía Naval, ² Cátedra de Riego, Facultad de Agronomía, Universidad de Nacional de Buenos Aires, ³ División Estadística, Universidad de Nacional de Lujan

E-mail: pulpero@gmail.com

RESUMEN: Se presenta una recopilación de los avances en la evaluación de diferentes productos de humedad edáfica superficial derivados de fuentes satelitales, disponibles de manera gratuita, con frecuencia diaria, comparándolos entre sí y con mediciones de campo. Esta información, con resolución espacial del orden de los 25km, es de gran utilidad para estudios, planificación, pronóstico hidrológico, meteorológico, climático, y de producción agrícola, tanto a escala regional como global. En particular, para pronósticos meteorológicos mediante modelos, el dato de humedad del suelo (HS) influye significativamente en la calidad de las previsiones a corto plazo. En la zona piloto, ubicada en el centro de la Provincia de Buenos Aires, se midió la HS superficial (en los primeros 10cm del suelo), durante el año 2013 mediante sondas dieléctricas calibradas con método gravimétrico. Los productos satelitales testeados provienen de los sistemas AMSR2 (obtenidos mediante los algoritmos JAXA y LPRM derivados de las Bandas C y X, respectivamente), ASCAT, SMOS y Aquarius. La mejor correspondencia entre los productos satelitales se obtiene entre SMOS y Aquarius, y entre SMOS y LPRM, con valores de coeficiente de correlación r entre 0.6 y 0,7 en ambos casos. El mejor ajuste de regresión lineal con las mediciones in situ se logró con los productos ASCAT ($r = 0,7$). Los resultados son comparables con los obtenidos por investigadores en otras partes del mundo, en áreas de interés agrícola similares.

INTRODUCCIÓN

Este trabajo resume los distintos estudios realizados y presentados en congresos y revistas, sobre el análisis comparativo de los datos de distintos productos de humedad del suelo (HS) derivados de sensores remotos con datos in situ, con el fin de discernir la opción más fiable para la caracterización de dicha variable de estado en modelos hidrológicos y meteorológicos (Carballo y Salgado, 2015 y 2016, Carballo et al., 2016 y Salgado et al., 2016).

La HS es uno de los parámetros de mayor importancia en modelización del ciclo del agua. Su obtención directa a escala regional o continental implica una logística con altos costos, debido a su dinámica espacial y temporal. Por esto, los sistemas satelitales ofrecen una alternativa única para el monitoreo de la humedad superficial a gran escala con alta frecuencia temporal. Actualmente, se encuentran disponibles distintos productos operacionales de HS gratuitos generados a partir de datos derivados de diversos sensores que operan en el rango de las microondas, tanto pasivos (radiómetros) como activos (dispersómetros), cada cual con sus propias características de funcionalidad. Entre otros, se destacan el algoritmo desarrollado por la Universidad Tecnológica de Viena (TU Wien), aplicado al sensor Advanced SCATterometer (ASCAT) (Wagner, 1999a, b y c, Wagner y Scipal, 2000 y Wagner et al., 2003; Naeimi, 2009a y b), el de la Agencia Espacial Japonesa (JAXA) para el sensor Advanced Microwave Scanning Radiometer - Earth Observing System (AMSR-E) (Njoku et al., 2003 y 2004) y el 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) aplicado en el AMSR2, el L-MEB aplicado a los datos del satélite Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) (Kerr et al., 2012) y el Single Channel Algorithm (SCA) aplicado para el satélite AQUARIUS/SAC-D (Bindlish et al., 2015). Las diferencias entre los distintos productos se encuentran en las frecuencias utilizadas, la elección de los diferentes parámetros incluidos en el algoritmo y las estrategias para resolver las cuestiones planteadas (humedad del suelo y espesor óptico de la vegetación). No obstante, 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 proveniente de la superficie terrestre) es, a grandes rasgos, función de la temperatura termodinámica del suelo y la temperatura de la vegetación (Jackson, 1993).

Son muchos los trabajos, donde se han evaluado estos productos con modelos de simulación de HS (Al-Yaari et al., 2014a y b; Draper et al., 2009, entre otros) o mediciones in situ (Kim et al., 2015; Jackson et al., 2012; Su et al., 2011; Albergel et al., 2010, entre otros). Sin embargo, son pocos los estudios realizados, donde estos productos hayan sido evaluados de forma sistemática dentro de América del Sur y en particular en Argentina (Carballo et al., 2016; Grings et al., 2015; Dillon et al., 2012).

El control y conocimiento de la humedad del suelo en la región Pampeana, es de gran relevancia, siendo ésta una de las zonas agrícolas de mayor importancia potencial productivo ante una demanda creciente de alimentos a nivel mundial. En este contexto, existen proyectos nacionales cuyo objetivo principal es la obtención de productos operativos de HS derivados de sensores remotos para esta región en particular (Bruscantini et al., 2015 y 2014), adaptando los distintos parámetros de los algoritmos a las condiciones particulares de este área. Aquí se presentan los productos disponibles de HS satelital de baja resolución espacial, para una zona agrícola en la Provincia de Buenos Aires, en Argentina, y su correspondiente medida en el campo para el mismo período.

MATERIALES

El área de estudio (Figura 1) está situada en el Centro de la Provincia de Buenos Aires, Partido de Azul, Argentina (centrada en la Latitud 37° 09'S y Longitud 59° 42'W). Es una zona de relieve ondulado con coberturas predominantes de distintos cultivos estacionales con producción intensiva agropecuaria. Durante el período estival se cultivan maíz, soja, girasol, etc., y en el invernal: trigo, cebada, avena, etc. También se observa, en menor medida, la presencia de rastrojos, pasturas, áreas forestadas, afloramientos rocosos y cuerpos de agua superficiales. Los suelos predominantes son los Argiudoles típicos (US Soil Survey Staff, 1975). 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). El clima de la zona de estudio es templado húmedo sin estación seca, con influencia oceánica, del tipo Cfb (Köppen, 1931), característico de la región centro-este de la provincia de Buenos Aires. La temperatura media anual es de 14.3 °C, con promedios en verano de 21°C y 7.6°C en invierno. El promedio de precipitaciones anuales es de 860 mm con los máximos entre la primavera y el verano (Vilatte et al., 2014).

Con el fin de caracterizar la región de interés, durante el período acotado entre junio de 2009 y mayo de 2015, se realizaron campañas de medición de humedad del suelo con frecuencia mensual, en sitios georreferenciados, y con adecuadas condiciones de acceso y seguridad. El geoposicionamiento se efectuó con un equipo navegador GPS (Garmin E-Trex Legend), referenciado con el Sistema Geodésico 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 (110°C o 105°C hasta constancia de peso durante 48hs).

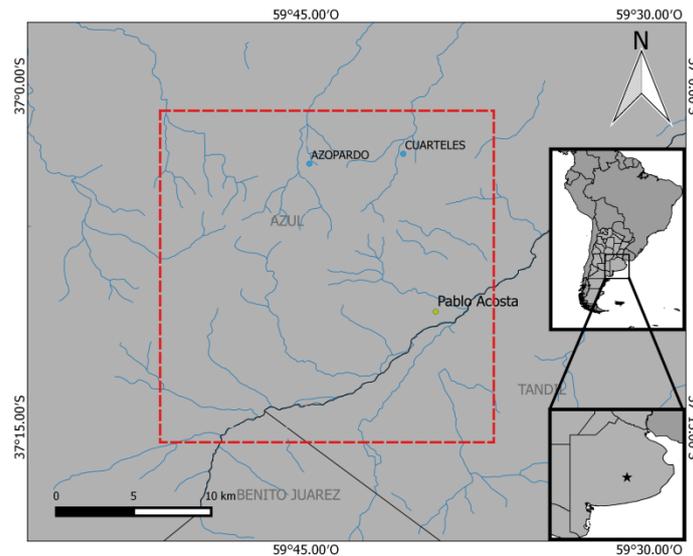


Figura 1.- Ubicación del área de estudio.

Mediciones de humedad del suelo in situ

Los datos de HS de campo (in situ) presentados en este trabajo corresponden a mediciones realizadas durante el periodo enero – diciembre del año 2013, siendo éste el lapso más largo de datos continuos disponible al momento de realizar este análisis. Los datos horarios de HS se registraron con sondas dieléctricas (Stevens Hydra Probe II y Decagon ECH20) instaladas en los primeros 10cm de profundidad, y calibradas de acuerdo a las condiciones texturales del sitio (Salgado et al., 2012).

Mediciones de humedad del suelo satelital

El Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 (AMSR2) se encuentra a bordo del satélite Global Change Observation Mission (GCOM-W1). En este trabajo se han utilizado el producto de HS 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), con los datos derivados de la banda C y X, respectivamente.

El ASCAT es un radar de apertura real montado en el satélite Meteorological Operation-A (MetOp-A). En este análisis se utiliza la versión actualizada de la serie de tiempo, desarrollada por la TU-Wien, desde enero de 2007 hasta julio de 2014, versión 2.2 WARP 5.5. Esta representa el contenido de agua en la capa

superficial, en unidades relativas desde 0 (seco) hasta el 100% (saturado), por lo cual para su conversión a valores volumétricos se utilizan datos auxiliares de propiedades físicas del suelo. Aquí 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).

Aquarius es un sensor abordo del satélite Aquarius/SAC-D, producto de la colaboración entre la National Aeronautics and Space Administration (NASA) y la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE). El producto de humedad del suelo es derivado de las temperaturas de brillo de este sensor con el algoritmo SCA (Single Channel Algorithm) (Bindlish et al., 2015).

El SMOS fue diseñado para el monitoreo de la HS y la salinidad oceánica por la Agencia Espacial Europea ('European Space Agency' ESA), con el sensor "Microwave Imaging Radiometer with Aperture Synthesis" (MIRAS). El producto de HS se obtiene utilizando el modelo directo L-MEB (L-band Microwave Emission of the Biosphere) (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), durante el período que va desde enero de 2010 hasta la actualidad.

La Tabla I resume las distintas características de los anteriormente mencionados satélites y sus productos derivados, utilizados en este trabajo.

Tabla 1.- Descripción de los distintos productos de humedad del suelo derivados de sensores remotos.

<i>Producto (algoritmo)</i>	<i>Sensor</i>	<i>Satélite</i>	<i>Resolución espacial</i>	<i>Polarización</i>	<i>Banda</i>	<i>Hora de pasaje (Hora Local Solar)</i>	<i>Referencia</i>
LPRM	AMSR2	GCOM-W1	25 km	V, H	X	Asc. (13:30) Desc. (01:30)	Owe et. al, 2008
JAXA	AMSR2	GCOM-W1	25 km	V, H	C	Asc. (13:30) Desc. (01:30)	Koike et. al, 2004
ASCAT	ASCAT	METOP-A	25 km	VV	C	Asc. (21:30) Desc. (09:30)	Naeimi et. al, 2009a, b
L-MEB	MIRAS	SMOS	~25 km	V, H	L	Asc. (06:00) Desc. (18:00)	Kerr et al, 2012
SCA	Aquarius	SAC-D	25 km	V, H	L	Asc. (18:00) Desc. (06:00)	Bindlish et al, 2015

MÉTODOS

En cuanto a las mediciones discretas de HS, se eligieron 15 sitios georreferenciados representativos de lotes bajo cultivo. 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). Dado el bajo valor del coeficiente de variabilidad el promedio de las 3 medidas puede considerarse como representativo del sitio.

En cuanto a la comparación con los datos continuos, se eligieron los pixeles de los datos satelitales más cercanos al punto de coordenadas central del área de estudio, donde se realizan las mediciones in situ de la

estación meteorológica. Se clasificaron los datos de los productos satelitales entre las órbitas descendentes (D) y ascendentes (A) (Tabla 1). Las órbitas D de AMSR2, son cercanas al horario de las órbitas A de ASCAT y SMOS, lo cual fue tenido en cuenta al momento de analizar los resultados, estas orbitas son consideradas como nocturnas dado que se producen entre las 21:00 y 03:00 hs (hora local). Asimismo, las órbitas A de AMSR2 se corresponden con las D de ASCAT y SMOS, consideradas órbitas diurnas. Las mediciones in situ fueron comparadas con ambas órbitas. También se generó, en caso de disponibilidad, un producto diario de humedad del suelo derivado del promedio de los datos Ascendentes y Descendentes. Todos los datos fueron llevados a unidades de humedad del suelo volumétricas (m^3/m^3). Aquarius presenta un producto de humedad del suelo semanal, el cual fue comparado con los productos diarios de los distintos modelos. A partir del procesamiento 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 la raíz del error cuadrático medio (RMSE). El grado de asociación de las variables se evaluó mediante el coeficiente de correlación lineal de Pearson (r).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 2 muestra las distintas tendencias de HS de los productos estudiados (promedios diarios), comparada con los datos de las mediciones “in situ” (de campo). Las series de los productos de SMOS y LPRM muestran que estos sistemas son los más sensibles a las lluvias/desecamiento del suelo (no graficado), siendo más notorio en primavera-verano (posiblemente, debido a una mayor evapotranspiración).

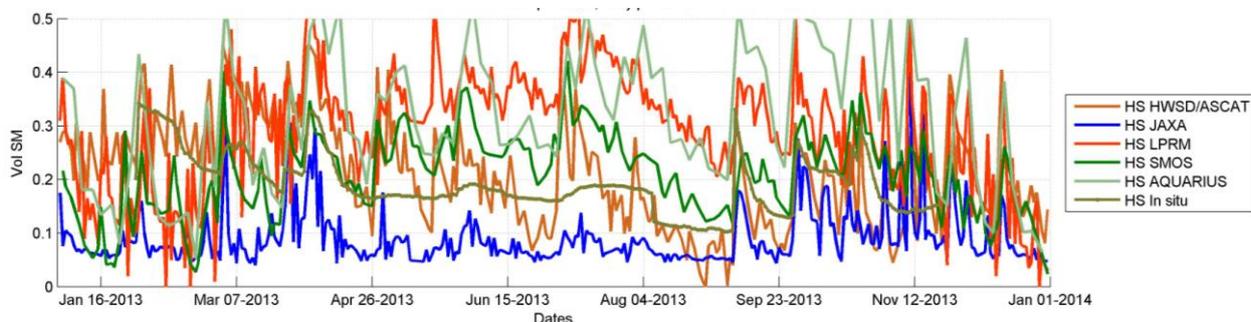


Figura 2.- Datos temporales de los productos satelitales (diarios) de humedad del suelo.

En general, se observa una baja correlación entre los datos de HS de los productos derivados de sensores satelitales y aquellas mediciones obtenidas en campo (Tabla II). Los datos ASCAT son los más vinculados a las mediciones de campo. En cuanto a los productos diarios, también la mejor correspondencia se observa con los valores de ASCAT ($r = 0,68$), con un mejor comportamiento para las pasadas A, con valores de correlación (r) de 0,70 contra 0,60 para las pasadas D. Este comportamiento se observa con los valores más altos de humedad (HS cerca de condiciones de saturación).

Tabla 2.- Correlaciones entre los distintos productos versus datos in situ, órbitas ascendentes (A) y descendentes (D) y el resultado de la combinación de ambas pasadas, respecto de las mediciones de campo.

Producto	Diario	A	D
----------	--------	---	---

JAXA	0,29	0,29	0,37
LPRM	-0,15	-0,29	0,09
ASCAT	0,68	0,70	0,60
SMOS	0,07	0,10	0,04

Los productos restantes analizados presentan intensidad de relaciones bajas y en algunos casos negativos con respecto a los datos in situ. Se observa, aunque en forma débil con valores bajos, una mejor correlación entre las orbitas coincidentes con horarios nocturnos respecto de sus pares matutinos, los demás productos analizados: el producto de LPRM (órbita D, coincidente con el horario nocturno) con valores $r = 0.09$ contra valores no significativos para la órbita ascendente; JAXA, con las mismas orbitas que el producto LRPM, con un r igual a 0,37 para las orbitas D y 0,29 para las A. En cuanto a SMOS, las órbitas ascendentes corresponden a pasadas nocturnas y muestran, también, mejor comportamiento para estos horarios.

La variación de HS en el sector más superficial (mm a 1 o 2 cm) del suelo presenta una mayor amplitud que la medida a 10 cm, por ser más influenciada por factores meteorológicos (evapotranspiración, lluvias leves). Esto se puede observar en la Figura 3, donde las medidas a campo (sonda a 10 cm) son menos extremas que los valores ASCAT (primeros cm del suelo).

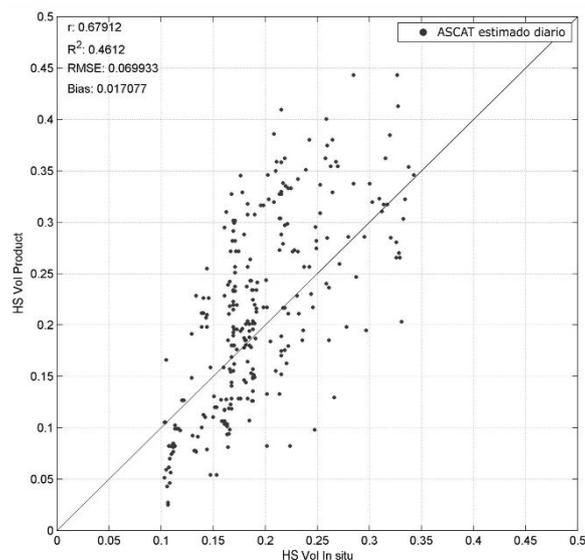


Figura 3.- Gráfico que muestra la relación entre datos diarios de HS obtenido con ASCAT y datos In situ.

En cuanto a la comparación de los distintos productos entre sí, se observa que los productos SMOS y LPRM son los más correspondientes entre sí (tanto para pasadas ascendentes, descendentes y diarios), con valores r que varían entre 0,57 y 0,74, coincidente esta última con la pasada descendente de SMOS y ascendente de LPRM. La Tabla 3 muestra la Matriz de Correlación de Pearson, para las distintas relaciones entre los distintos productos diarios generados.

Tabla 3.- Matriz de Correlación de Pearson para las distintas relaciones entre los distintos productos.

Prod. \ Prod.	AQUARIUS	JAXA	LPRM	ASCAT	SMOS
AQUARIUS	1,00	0,36	0,54	0,10	0,66

JAXA	0,36	1,00	0,18	0,41	0,38
LPRM	0,54	0,18	1,00	0,07	0,73
ASCAT	0,10	0,41	0,07	1,00	0,19
SMOS	0,66	0,38	0,73	0,19	1,00

Los datos del producto de ASCAT y JAXA presentan los mejores resultados, luego de SMOS y LPRM, con coeficientes que varían entre 0,36 y 0,51, siendo este último caso la combinación entre la pasada descendente de ASCAT y la ascendente de JAXA. En los resultados obtenidos por las tendencias de datos diarios (combinando las pasadas A y D), la relación entre SMOS y LPRM, con $r=0,73$, es la de mejor comportamiento. Aquarius y SMOS presentan una aceptable correlación ($r=0,66$). También, se observa una similar correlación ($r=0,54$) con LPRM. Finalmente, el comportamiento de JAXA muestra valores más bajos de correlación con ASCAT, con $r = 0,41$.

Las diferencias observadas pueden ser atribuidas a distintos factores. Aparte de la conocida variabilidad espacial y dinámica temporal de la HS superficial, se le suman factores propios de los productos/sistemas testeados: 1) Diferencia horaria de pasaje satelital (diurno, nocturno); 2) Órbitas Ascendentes/Descendentes con distinta “huella”, luego reprocesada para llegar a una grilla común; 3) Distintas características de los sensores (pasivo/activo, banda, polarización del haz en activos, rango dinámico/sensibilidad, etc.).

En comparación con trabajos realizados en regiones agrícolas en distintas partes del mundo, donde se realizaron estudios similares al presente trabajo, se puede destacar el análisis de Bhimala y Goswami, 2015. Los mismos registraron diferencias estacionales (entre época de lluvias y temporada seca) en la región de estudio (India), en la relación de datos ASCAT con mediciones in situ, obteniendo, en general, coeficientes de correlación entre 0,73 y 0,91. 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 Tíbet, y reportaron valores de r^2 de 0,34 y 0,43.

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. Así, el producto ASCAT de órbitas A (nocturnas) presenta los valores más vinculados con las mediciones in situ. También, se observa que el producto combinado de ASCAT (promedio diario) mejora el desempeño de ambas pasadas individualmente, con $RMSE=7\%$. Estos resultados muestran similitudes con los obtenidos en antecedentes trabajos realizados en otras regiones agrícolas del mundo.

Por lo expuesto, resulta conveniente extender los datos temporales para los distintos productos de HS y prolongar el período de comparación de las mismas a los años 2014 y 2016.

En síntesis, dado que 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, es aconsejable la

continuación y profundización de estudios y posibles correcciones con parámetros locales, para su utilización en modelos hidrológicos y meteorológicos.

REFERENCIAS

- Albergel, C., Calvet, J.C., de Rosnay, P., Balsamo, G., Wagner, W., Hasenauer, S., Naeimi, V., Martin, E., Bazile, E., Bouyssel, F. and Mahfouf, J.-F., 2010. Cross-evaluation of modelled and remotely sensed surface soil moisture with in situ data in Southwestern France. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14, p. 2177–2191.
- Al-Yaari, A., Wigneron, J.P., Ducharne, A., Kerr, Y., de Rosnay, P., de Jeu, R., Govind, A., Al Bitar, A., Albergel, C., Muñoz-Sabater, J., Richaume, P. and Mialon, A., 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, p. 181–195.
- Al-Yaari, A., Wigneron, J.P., Ducharne, A., Kerr, Y.H., Wagner, W., De Lannoy, G., Reichle, R., Al Bitar, A., Dorigo, W., Richaume, P. and Mialon, A., 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, p. 614–626.
- Bhimala, K. R. and Goswami, P., 2015. Comparison of soil moisture data over the Indian region. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(10), pp. 5425-5434.
- Bruscantini, C.A., Grings, F., Barber, M., Perna, P. and Karszenbaum, H., 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.
- Bruscantini, C.A., Konings, A. G., Narvekar, P. S., McColl, K. A., Entekhabi, D., Grings, F. M. and Karszenbaum, H., 2015. L-Band Radar Soil Moisture Retrieval without Ancillary Information. *IEEE Journal of selected topics in applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(12), pp.5526-5540.
- Bindlish, R., Jackson, T., Cosh, M., Tianjie, Z. and O'Neill, P., 2015. Global Soil Moisture From the Aquarius/SAC-D Satellite: Description and Initial Assessment. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 12(5), pp. 923-992, 2015.
- Carballo, F. y Salgado, H., 2015. Diferencia entre datos de humedad del suelo de sistemas satelitales de microondas pasivos y mediciones “in situ”. *Jornadas Argentinas de Geotecnologías 2015*. San Luis, Argentina.
- Carballo, F., Salgado, H. y Zabala, S. M., 2016. Evaluación de datos de humedad del suelo de fuentes gratuitas satelitales de baja resolución para una zona agrícola del centro de Argentina. *IEEE ARGENCON 2016*. C.A.B.A., Argentina.
- Carballo, F. y Salgado, H., 2016. Diferencia entre datos de humedad del suelo obtenidos mediante sistemas satelitales de microondas y mediciones in situ. *Agronomía y Ambiente. Revista de la Facultad de Agronomía (UBA)*. 36(1), pp. 33-44.
- Dente, L., Vekerdy, Z., Wen, J. and Su, Z., 2012. Maqu network for validation of satellite-derived soil moisture products. *Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinf.*, 17, pp. 55–65.
- Dillon, M. E., Collini, E., Ferreira, L., Pujol, G. y Dadamia, D., 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*.
- Draper, C.S., Walker, J.P., Steinle, P.J., de Jeu, R.A.M. and Holmes, T.R.H., 2009. An evaluation of AMSR-E derived soil moisture over Australia. *Remote Sensing of Environment*, 113(4), p. 703–710.
- Grings, F., Bruscantini, C. A., Smucler, E., Carballo, F., Dillon, M. E., Collini, E. A., Salvia, M. and Karszenbaum, H., 2015. Validation Strategies for Satellite-Based Soil Moisture Products over Argentine Pampas. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 8, p. 4094-4105.
- Jackson, T. J., 1993. Measuring Surface Soil Moisture Using Passive Microwave Remote Sensing. *Hydrological Processes*, 7, pp. 139–152.
- Jackson, T.J., Bindlish, R., Cosh, M.H., Zhao, T.J., Starks, P.J., Bosch, D.D., Seyfried, M., Moran, M.S., Goodrich, D.C., Kerr, Y.H. and Leroux, D., 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), p. 1530–1543.
- Kerr, Y.H., Waldteufel, P., Richaume, P., Wigneron, J.P., Ferrazzoli, P., Mahmoodi, A., Al Bitar, A., Cabot, F., Gruhier, C., Juglea, S.E., Leroux, D., Mialon, A. and Delwart, S., 2012. The SMOS soil moisture retrieval algorithm.

- IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(5), pp. 1384–1403.
- Kim, S., Liu, Y. Y., Johnson, F. M., Parinussa, R. M. and Sharma, A., 2015. A global comparison of alternate AMSR2 soil moisture products: Why do they differ? *Remote Sensing of Environment*, 161, p. 43-62.
- Koike, T., Nakamura, Y., Kaihotsu, I., Davva, G., Matsuura, N., Tamagawa, K. and Fujii, H., 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, pp. 217–222.
- Köppen, W. 1931. *Grundriss der Klimakunde*, Walter de Gruyter Co, Berlin und Leipzig. 388 p.
- Matgen, P., Heitz, S., Hasenauer, S., Hissler, C., Brocca, L., Hoffmann, L., Wagner, W. and Savenije, H. H. G., 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), pp. 2346–2359.
- Mo, T., Choudhury, B. J., Schmugge, T.J., Wang, J.R. and Jackson, T.J., 1982. A model for microwave emission from vegetation-covered fields. *Journal of Geophysical Research, Oceans*, 87(C13), pp. 11229–11237.
- Naeimi V., Scipal, K., Bartalis, Z., Hasenauer, S. and Wagner, W., 2009a. An improved soil moisture retrieval algorithm for ERS and METOP scatterometer observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(7), pp. 1999–2013.
- Naeimi, V., Bartalis, Z. and Wagner, W., 2009b. ASCAT Soil Moisture: An Assessment of the Data Quality and Consistency with the ERS Scatterometer Heritage. *Journal Hydrometeor.*, 10, pp. 555–563.
- Njoku, E. G., Jackson, T. L., Lakshmi, V., Chan, T. and Nghiem, S. V., 2003. Soil Moisture Retrieval from AMSR-E. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 41(2), pp. 215-229.
- Njoku, E. G., Chan, T., Crosson, W. and Limaye, A., 2004. Evaluation of the AMSR-E Data Calibration Over Land. *Italian Journal of Remote Sensing*, 30/31, pp. 19-37.
- Owe, M., de Jeu, R.A.M. and Holmes, T.R.H., 2008. Multisensor historical climatology of satellite-derived global land surface moisture. *Journal of Geophysical Research, Earth Surface*, 113.
- Reynolds, C.A., Jackson, T.J. and Rawls, W.J., 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), pp. 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*, 81(6), pp.1281-1299.
- Salgado, H., Romay, C., Zabala S.M. y Génova, L., 2012. Calibración de campo de un sensor dieléctrico para suelos en la Provincia de Buenos Aires. *VI Jornadas Riego y Fertirriego*, Mendoza, Argentina.
- Salgado, H., Carballo, F. and Bernier, M., 2016. Surface soil moisture monitoring in an Argentinean agricultural plain from different active microwave satellite sources. *The 37th Canadian Symposium on Remote Sensing*. Winnipeg, Manitoba, Canada.
- Su, Z., Wen, J., Dente, L., van der Velde, R., Wang, Ma, Y., Yang, K. and Hu, Z., 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), p. 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, USA, 436, pp. 754.
- Vilatte, C., Aguas, L., Confalone, A., 2014. Influencia de los ciclos solares sobre las precipitaciones en Azul, pcia. de Buenos Aires. *Rev. FCA UNCUYO*. 46(1), pp. 227-233.
- 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), pp. 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), pp. 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, pp. 206-216.
- 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), pp. 1777-1782.
- Wagner, W., Scipal, K., Pathe, C., Gerten, D., Lucht, W. and Rudolf, B., 2003. Evaluation of the agreement between the first global remotely sensed soil moisture data with model and precipitation data. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, 108(D19), pp. 4611.

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), pp. 639–655.