

EVALUACIÓN DE LAS MEDIDAS DE HUMEDAD DE SUELO GENERADAS CON DATOS DISGREGADOS DE SATÉLITE A ESCALA DE PARCELA AGRÍCOLA

M. Fontanet¹, D. Fernández², F. Ferrer¹, G. Rodrigo¹

¹ LabFerrer, C/ Ferran el Catòlic, 3, 25200, Cervera.

mireia@lab-ferrer.com. www.lab-ferrer.com

² Universitat Politècnica de Catalunya, C/ Jordi Girona, 31, 08034 Barcelona.

daniel.fernandez.g@upc.edu

RESUMEN. El interés de medir la humedad de suelo a escala de parcela de cultivo mediante teledetección ha aumentado debido a la fácil disponibilidad de los datos y, que a diferencia de los sensores de humedad de suelo, no es necesario dedicar tiempo y dinero a la instalación y mantenimiento en campo. Estas medidas tienen una baja resolución espacial de 40 km. El algoritmo DisPATCH disgrega los valores de humedad de suelo de 40 km a 1 km de resolución. En este trabajo se han comparado medidas de humedad in situ de la parcela con los valores obtenidos con el algoritmo DisPATCH para evaluar en qué escenarios puede estimar correctamente la humedad de suelo a 1 km de resolución. También se ha realizado un estudio geostatístico mediante variogramas para comprobar que DisPATCH estima la humedad de suelo a la resolución comentada. Los resultados muestran que DisPATCH no es capaz de estimar la humedad de suelo

cuando las condiciones de humedad del área de estudio son distintas a las de la región donde se encuentra.

ABSTRACT. The interest of measuring soil moisture at field scale using remote sensing techniques has increased. Data is readily available and, soil moisture sensors, field installation and maintenance tasks are not required. These measurements have a spatial resolution of 40 km. DisPATCH algorithm disaggregates soil moisture data from 40 km down to 1 km resolution, improving the use fullness of remote data at field scale. In this study, in situ measurements and DisPATCH algorithm values have been compared in order to asses under which scenarios DisPATCH may correctly estimate soil moisture at 1 km resolution. At the same time, a geostatistical analysis using variograms has been computed to determine wether DisPATCH

detects soil moisture variations at 1 km. Results indicated that when the field conditions are different from the region where is placed, DisPATCh cannot estimate correctly soil moisture at 1 km.

1. INTRODUCCIÓN

En agricultura, la humedad de suelo es importante para el manejo, la planificación y programación del riego, es decir, cuando y cuánta agua hay que aplicar en el suelo para garantizar que el cultivo pueda desarrollarse correctamente (Clothier et al., 1993) y de forma eficiente. También es importante para calcular el balance de agua de la parcela y poder definir cada uno de los elementos que lo conforman (drenaje, evapotranspiración, agua disponible...) (Sun et al., 2006).

Cuando se mide la humedad de suelo, hay que definir previamente el objetivo principal del trabajo, los procesos a caracterizar, las propiedades a medir y finalmente el método de medida a utilizar ya que cada uno de ellos tiene un componente de escala que afecta a las medidas finales (van ES et al., 2002). La humedad de suelo tiene una variabilidad espacio-temporal como resultado a la heterogeneidad de las propiedades hidráulicas del suelo, topografía, cobertera del suelo, evapotranspiración y acciones entrópicas del suelo. Dada esta heterogeneidad no siempre es fácil escoger el método de medida y por lo tanto medir la humedad del suelo. Bear (1972) introdujo el concepto de Volumen Elemental Representativo (VER), que se definió como el volumen de suelo más pequeño que puede representar el rango de variaciones a escala microscópica.

Existen distintas técnicas para medir humedad de suelo a diferentes escalas. Las medidas gravimétricas (Gardener 1985) y los sensores de humedad capacitivos (Gardener, 1986), son métodos experimentales que miden la humedad de suelo in situ de la parcela. Actualmente, los sensores de humedad de suelo son el método más extendido para medir humedad de suelo en manejo del riego a escala de parcela (Fares et al., 2006, Thompson et al., 2007, Vallidis et al., 2007). Estos sensores tienen un volumen de medición determinado, que les hace muy útiles para medir procesos a escala puntual, pero en cambio, para obtener la humedad de suelo a escala regional, se necesitan de varias medidas distribuidas espacialmente.

La teledetección, especialmente la radiometría de onda pasiva (Jackson et al., 1996) es capaz de estimar la humedad de superficial del suelo a escala regional. El satélite SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) lanzado en Noviembre 2009 (Kerr et al., 2001), es capaz de estimar la humedad de suelo superficial entre 35 – 55 km de resolución con una frecuencia de 3 días (6:00 y 18:00 hora solar). Las estimaciones hechas por SMOS han sido validadas por varias intensivas campañas de campo (Al Bilatr et al., 2012, Delwart et al., 2008) y sus valores han sido utilizadas para aplicaciones hidrológicas y climáticas (Lievens et al., 2015, Wander et al., 2014).

Actualmente el interés de estimar la humedad de suelo mediante técnicas de teledetección a resoluciones más altas que las que ofrece SMOS ha aumentado para aplicaciones agronómicas, ya que de esta forma, se podrían substituir los sensores de humedad, y ahorrar los usuarios las tareas de instalación y mantenimiento de sensores. El algoritmo DisPATCh (Dissaggregation

base on Physical And Theoretical Change) (Merlin et al., 2012) disgrega la humedad superficial del suelo estimada por SMOS a 1 km de resolución. Para ello utiliza los datos de NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) y Temperatura de Suelo (TS) estimados por MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) a 1 km de resolución calculando la Eficiencia de Evaporación del Suelo (EES) (Fig.1). DisPATCh está basado en la EES, asumiendo que cuando EES es alta, hay más humedad del suelo y que la TS es baja, mientras que cuando EES es baja, se traduce que hay menos humedad en el suelo y que la TS es alta (Merlin et al., 2008). EES está relacionada con humedad de suelo a resolución de 40 km utilizando la relación lineal expresada por Budyko (1956) y Manabe (1969)

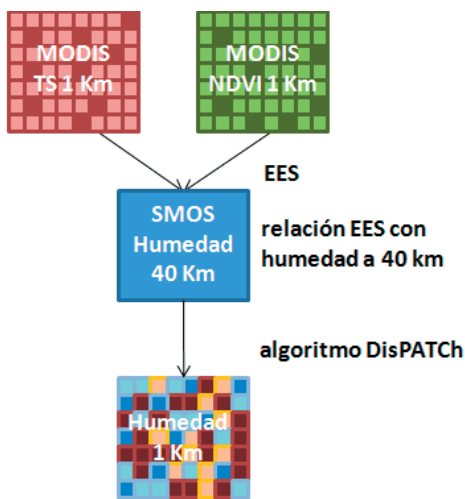


Fig. 1. Proceso de ejecución del algoritmo DisPATCh.

DisPATCh ha sido validado en zonas homogéneas donde el régimen y escenarios de humedad eran similares en la zona

explorada a gran escala y sin analizar pixeles por separado (Merlin et al., 2012; Merlin, et al., 2015; Malbêteau, et al., 2016; Molero, et al., 2016). Este estudio, se ha llevado a cabo en la zona del Canal Segarra Garrigues, donde las parcelas se están transformando de secano a regadío instalando sistemas de riego. Actualmente son pocos los agricultores que a día de hoy han instalado un sistema de riego en la parcela, y por este motivo, a escala regional, se considera que la región es aún de secano. En el oeste del sistema Segarra – Garrigues, se encuentra la zona del Urgell, donde a diferencia de la anterior, las parcelas de esta zona poseen sistema de riego instalado y se considera que toda la región es de regadío.

La geoestadística permite caracterizar patrones de correlación de una variable determinada (Entin et al., 2000; Mohanty et al., 2000; Liu, 2001; Western et al., 2002). La función más utilizada es el variograma (Yates S.R. et al., 2002), que es usado para estudiar el comportamiento espacial de una variable. Los variogramas están definidos básicamente por la meseta y el rango. La meseta nos indica la máxima variabilidad del variograma coincidiendo con la varianza, mientras que el rango nos indica la distancia donde existe correlación espacial. Diversos autores (Garrigues et al., 2006; Tarnavsky et al., 2007) han mostrado las utilidades de los variogramas para definir y cuantificar la heterogeneidad espacial de variables medidas con teledetección calculando el rango, meseta.

En este trabajo se han comparado datos de humedad de suelo medidos in situ (con el método gravimétrico y con sensores de humedad de suelo) con los datos de humedad superficial del suelo estimados por DisPATCh, para evaluar la viabilidad de si

DisPATCh es una buena herramienta para medir la humedad de suelo a escala de campo. También se ha llevado a cabo un estudio geoestadístico usando variogramas de los datos usados por DisPATCh (NDVI y TS) para observar como influencia su variabilidad espacial en el resultado final de DisPATCh.

Los objetivos principales de este trabajo son:

- Comparar los datos de gravimetría de suelo repartidos por toda el área de la parcela, con los datos de los sensores de humedad para determinar, si con algunos puntos de monitorización de la humedad de suelo con sensores, se puede representar la humedad general de la parcela.
- Evaluar si DisPATCh se puede emplear a escala de parcela y determinar en qué escenarios estima correctamente la humedad de suelo.
- Comprobar la resolución espacial de DisPATCh haciendo un estudio geoestadístico con variogramas de los datos de NDVI y TS empleados por DisPATCh.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El área de estudio se encuentra en el municipio de La Foradada (La Noguera, Lleida). Esta zona se encuentra en el sistema Canal Segarra – Garrigues (Fig. 2).

La parcela de cultivo de La Foradada (1.015 lat, 41.866 lon) tiene una extensión de 20 ha, donde el riego es aplicado por aspersión. En el 2011 la parcela sufrió una nivelación del suelo debido a una concentración parcelaria. La región donde se en-

cuentra la parcela se caracteriza por tener parcelas de cultivo sin sistema de riego y bosques de encinares.

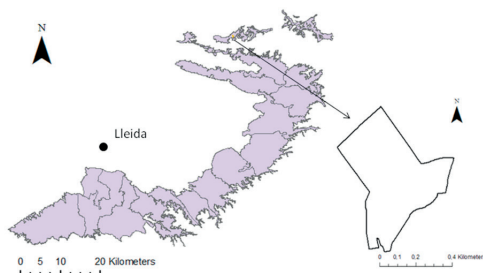


Fig. 2. Situación de la zona de estudio dentro del sistema Segarra – Garrigues.

2.2. Medidas in situ de humedad de suelo

2.2.1. Medidas gravimétricas

Un total de 9 campañas de campo se han realizado para tomar muestras de suelo para medir el contenido gravimétrico de agua de cada muestra de suelo según descrito por Gardener (1986). Se han fijado 101 puntos de muestreo a lo largo de toda el área de la parcela (Fig. 3).

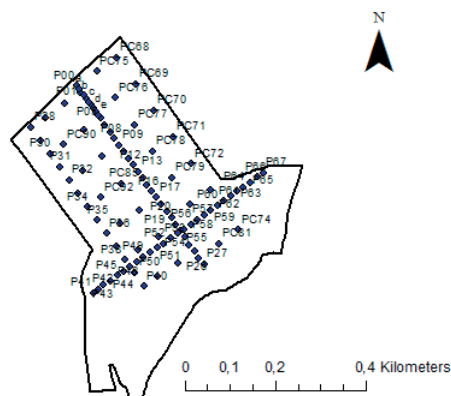


Fig. 3. Puntos de muestreo de gravimetrías.

Las medidas gravimétricas han sido convertidas a unidades volumétricas utilizando la densidad aparente media de la parcela y a continuación se ha obtenido la media aritmética de todas ellas con sus desviaciones estándares.

2.2.2. Sensores humedad de suelo

Se han definido 5 puntos de monitorización (Fig. 4) en continuo de la humedad del suelo con 1 sensor de humedad EC-5 (METER Group, Pullman, WA, USA) instalado a 5 cm de profundidad y conectados a dataloggers EM50G (METER Group, Pullman, WA, USA). El intervalo de lectura fue de 5 minutos, y su precisión es de $\pm 3\%$. Los puntos de monitorización se han definido siguiendo una de las líneas de muestreo gravimétricas y cada uno de ellos representa un sector de riego distinto.

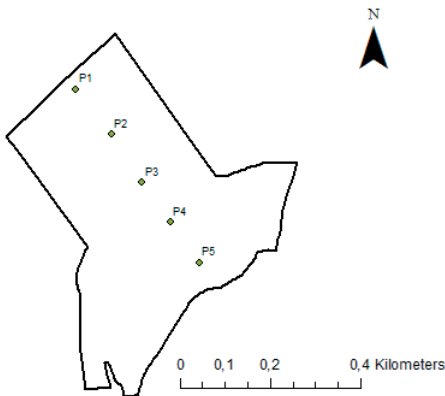


Fig. 4. Puntos de monitorización con sensores de humedad.

Se ha calculado la humedad representativa de toda la parcela utilizando la media ponderada de todos los puntos de monitoreo ya que en función del área de cada sector de riego, cada punto de monitoriza-

ción tendrá más o menos influencia en la humedad de toda la parcela.

2.3. Estimaciones de humedad por teledetección

2.3.1. Humedad estimada a alta resolución

El algoritmo DisPATCH ha sido ejecutado del 5 de febrero 2016 al 24 de octubre de 2016. Los días nublados que impedían la lectura de los satélites no se han podido ejecutar el algoritmo.

2.3.1. Humedad estimada a baja resolución

Los datos de humedad superficial del suelo a baja resolución estimadas por SMOS se obtuvieron de la página web Earth Online (<https://earth.esa.int/web>) del 5 de febrero al 24 de octubre de 2016.

2.4. Variogramas experimentales

Los datos de NDVI y TS corresponden a los días 15 de Abril, 15 Junio y 15 Agosto, representando diferentes estados hidrológicos del suelo y de crecimiento del cultivo. Los datos han sido descargados de la página web Google Earth Engine (<https://earthengine.google.com>).

Los variogramas experimentales han sido calculados (Ec. 1) utilizando el programa SGems (v2.5b) a diferentes direcciones para comprobar la isotropía del variogram. La máxima distancia incluida en el variograma ha sido de 60000 m, donde la zona del sistema Segarra – Garrigues (zona de secano) y la zona del Urgell (zona regada) están incluidas.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad (1)$$

Los variogramas se ajustaron con los modelos, exponencial (Ec. 2) para el NDVI,

$$\gamma(h) = \sigma^2 \left(1 - \exp\left(-\frac{3h}{r}\right) \right) \quad (2)$$

y el esférico (Ec. 3) para la TS.

$$\gamma(h) = \sigma^2 \left(\frac{3h}{2r} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{r} \right)^3 \right) \begin{cases} \text{if } h \leq r \\ \sigma^2 \text{ if } h > r \end{cases} \quad (3)$$

3. RESULTADOS

3.1. Medidas humedad de suelo

Diferentes escenarios de lluvia y riego son representados por las Figuras 5 y 6 mediante los valores máximos y mínimos diarios medidos por los sensores de humedad, las medias aritméticas de las medidas de gravimetría con sus desviaciones estándares, y los valores de humedad estimados por el algoritmo DisPATCH con sus desviaciones estándares.

Si se comparan las medidas de humedad de suelo generados con las gravimetrías con los máximos y mínimos de los sensores de humedad, se puede observar que las medidas gravimétricas coinciden con la franja definida por los sensores de humedad.

Los datos estimados por DisPATCH con respecto a los valores que ofrecen los sensores de humedad muestran un comportamiento distinto en función del escenario

en que se encuentra la zona de estudio. La Figura 4 representa periodos de lluvia generales, y aunque en este caso, los valores estimados por DisPATCH no muestran un valor absoluto similar a los sensores de humedad, sí que muestran la misma dinámica.

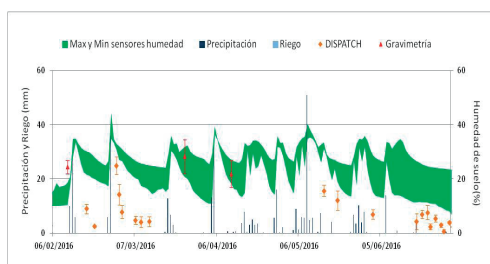


Fig. 5. Valores de humedad de suelo en el periodo de lluvias generalizadas.

En la Figura 5 hay representado el periodo de tiempo donde se ha aplicado riego local. Los valores estimados por DisPATCH no detectan el incremento de humedad producido por el riego local, mientras que los sensores de humedad lo han registrado durante todo el periodo.

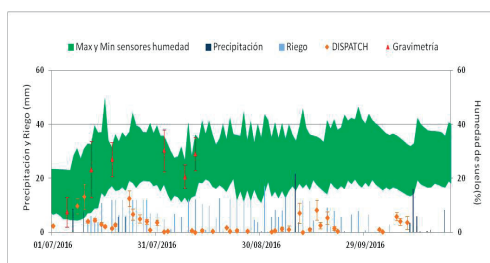


Fig. 6. Valores de humedad de suelo en el periodo de riego localizado.

En la Figura 7 se han correlacionado las estimaciones de humedad de SMOS con

las generadas con el algoritmo DisPATCH. Se puede observar que ambos valores tienen una correlación de un R^2 de 0,7841 y una pendiente de 1,01.

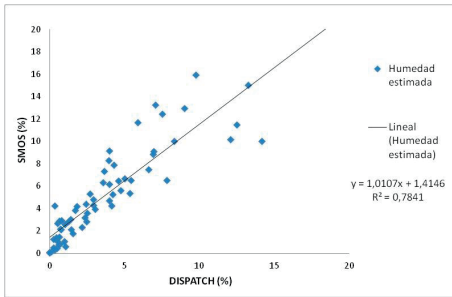


Fig. 7. Valores de humedad estimados por DisPATCH y SMOS durante el periodo de lluvias generalizadas.

3.2. Variogramas

Al analizar los variogramas que representan el NDVI (Fig. 8), se observa que el mes donde hay más variabilidad es en el mes de Abril con una meseta de 0,034, mientras que en los meses de Junio y Agosto la variabilidad es similar, siendo de 0,019 y 0,021 respectivamente (Tabla 1). Referente a la continuidad espacial, representados por el rango, ambos meses presentan valores semejantes. Los variogramas que representan los meses de Junio y Agosto, presentan un efecto hueco (Pyrcz et al., 2003), mientras que en el mes de Abril este efecto es inexistente.

Tabla 1. Parámetros de los variogramas de NDVI de Abril, Junio y Agosto.

NDVI			
	Modelo	Meseta	Rango (km)
Abril	Exponencial	0,034	34
Junio	Exponencial	0,019	34
Agosto	Exponencial	0,021	38

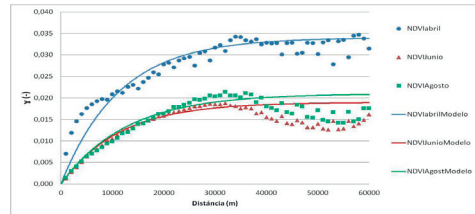


Fig.8.Variogramas NDVI que representan el mes de Abril, Junio y Agosto.

Los variogramas de TS (Fig. 9) presentan una máxima variación en Agosto, siendo de 18, mientras que en el mes de Abril es cuando existe una mínima variación de 8,4 (Tabla 2). Los rangos varían entre meses. El efecto hueco se vuelve a observar en los variogramas de Junio y Agosto.

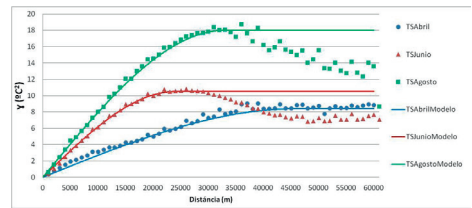


Fig. 9.Variogramas TS que representan el mes de Abril, Junio y Agosto.

Tabla2. Parámetros de los variogramas del TS de Abril, Junio y Agosto.

	TS		
	Modelo	Meseta	Rango (km)
Abril	Esférico	8,4	46
Junio	Esférico	10,5	24
Agosto	Esférico	18	33

4. DISCUSIÓN

4.1. Medidas humedad de suelo

Los valores absolutos de las medidas gravimétricas y de los máximos y mínimos

de los sensores de humedad, muestran que los 5 puntos de monitoreo de los sensores de humedad son representativos de toda el área de la parcela de cultivo y que representan la posible variabilidad espacial existente en la parcela.

En los valores estimados por DisPATCH se observa una influencia de las condiciones de la región donde se encuentra la parcela, ya que, cuando hay lluvias generalizadas en la zona, la dinámica de humedad de los valores estimados y medidos son parecidos, mientras que cuando hay riego localizado en la parcela de cultivo, pero no lo hay en el resto de la región, los valores estimados y medidos son muy dispares. Esta observación también se aprecia en los valores sin disgregar que ofrece SMOS, que son muy similares a los datos disgregados por DisPATCH, es decir, no existen grandes diferencias antes y después de la disgregación.

4.2. Variogramas

El variograma de NDVI en Abril, presenta su máxima variabilidad dado a las diferencias de crecimiento del cultivo que hay en la zona. Los variogramas de Junio y Agosto, tienen menos variación dada a que no hay crecimiento del cultivo en Junio, y que en Agosto el cultivo ya está desarrollado en todo el territorio. Los rangos muestran correlaciones espaciales mucho más grandes que 1 km, es por esta razón, que variaciones de 1 km no van a ser detectadas por las medidas de NDVI. Los efectos hueco de Junio y Agosto están asociados a las dos zonas incluidas en el variograma (Urgell y Segarra – Garrigues), ya que en estos meses tienen valores de NDVI

muy diferenciados. En Abril este efecto es inexistente dado a la homogeneidad que tienen ambas zonas.

La variación que presentan los variogramas de TS coincide en la aplicación de riego en las zonas comprendidas en ellos. Cuando hay máxima variabilidad en Agosto, coincide en que toda la zona del Urgell se aplica riego, mientras que en el sistema Segarra – Garrigues la gran mayoría de parcelas no aplican riego, traduciendo este hecho a una zona con bajas temperaturas y la otra con altas temperaturas. En Abril que es cuando hay menos variabilidad, se puede atribuir por la presencia de lluvias generalizadas que hacen que la TS sea más homogénea. Los rangos aunque muestran una correlación espacial más pequeña que en los variogramas de NDVI, estos son más grandes que 1 km. Es decir, variaciones más pequeñas que los rangos de TS no van a ser detectados. Por lo que hace a los efectos huecos en los variogramas de TS, en Junio y Agosto está presente dada a que en la zona del Urgell el riego está extendido por toda la zona, mientras que en la zona de Segarra – Garrigues, el riego solamente es puntual en pocas parcelas. En Abril, el efecto hueco es inexistente ya que las lluvias generalizadas provoca que las dos zonas sean más homogéneas.

5. CONCLUSIONES

Se ha observado que los sensores de humedad de suelo pueden representar la humedad del suelo de una parcela de cultivo si se instalan con una correcta distribución espacial.

Se ha demostrado que DisPATCH no puede detectar la humedad a nivel de par-

cela si esta está situada en una zona donde las condiciones de humedad externas son muy distintas a las que existen en ella. Esto es debido a la continuidad espacial que ofrecen las medidas de NDVI y TS de MODIS siendo más grandes que 1 km afectando a la resolución espacial final de DisPATCh.

DisPATCh, por el momento, no puede substituir los sensores de humedad de suelo para estimar la humedad de suelo a nivel de parcela de cultivo.

Agradecimientos. Quiero agradecer a las personas colaboradoras del proyecto Marie Curie REC para la cesión de los datos, así como el personal de ASG para ceder la parcela de La Foradada como parcela experimental.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Al Bitar, A., Leroux, D. J., Kerr, Y. H., Merlin, O., Richaume, P., Sahoo, A., & Wood, E. F. (2012). Evaluation of SMOS soil moisture products Over Continental U.S. using the SCAN/SNOTEL network. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(5), 1572–1586.
- Bear, J. 1972. Dynamics of fluids in porous media. Elsevier, New York.
- Budyko, M.I. (1956) Heat balance from the Aquarius/SAC-D satellite: description and initial assessment. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(5), 923-927.
- Clothier, B.E., Green, S.R., 1993. Rootzone Processes and the efficient use of irrigation water. *Agricultural Water Management* 25 (1994) 1-12
- Delwart, S., Bouzinac, C., Wursteisen, P., Berger, M., Drinkwater, M., Martín-Neira, M., Kerr, Y. H. (2008). SMOS validation and the COSMOS campaigns. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(63), 695–703. <http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2007.914811>.
- Entekhabi, D., 1995. Recent advances in land-atmosphere interactions research. *Rev. Geophys*, 33 (S2).
- Entin, J.K., Robock, A., Vinnikov, K.Y., Hollinger, S.E., Liu, S.X., Namkhai, A., 2000. Temporal and spatial scales of observed soil 132 A.W. Western et al. / *Journal of Hydrology* 286 (2004) 113–134 moisture variations in the extratropics. *Journal of Geophysical Research—Atmospheres* 105 (D9), 11865–11877.
- Gardner, W., 1986. Water content. In: A. Klute (Editor), *Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods. American Society of Agronomy, Inc., Madison, WI*.
- Garrigues, S., Allard, D., Baret, F., Weis Influence, M., 2006. Influence of landscape spatial heterogeneity on the non-linear estimation of leaf area index from moderate spatial resolution remote sensing data. *Remote Sensing of Environment* 105 (2006) 286–298
- Jackson, T.J., Schmugge, J., Engman, E.T., 1996. Remote sensing applications to hydrology: soil moisture. *Hydrological Sciences Journal* 41 (4), 517-530
- Kerr, Y. H., Waldteufel, P., Wigneron, J. -P., Martinuzzi, J. M., Font, J., & Berger, M. (2001). Soil moisture retrieval from space: the soil moisture and ocean salinity (SMOS) mission. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(8), 1729–1735. <http://dx.doi.org/10.1109/36.942551>.
- Lievens, H., Tomer, S. K., Al Bitar, A., De Lannoy, G. J. M., Drusch, M., Dumedah, G., Pauwels, V. R. N. (2015). SMOS soil moisture assimilation for improved hydrologic simulation in the Murray Darling Basin, Australia. *Remote Sensing of Environment*, 168, 146–162. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.06.025>.
- Liu, S.X., 2001. Spatial variation of soil moisture in China: geostatistical characterization. *Journal of the Meteorological Society of Japan* 79 (1B), 555–574.
- O. Merlin, J.P. Walker, A. Chehbouni, Yann Kerr. Towards deterministic downscaling of SMOS soil moisture using MODIS derived soil evaporative efficiency. *Remote Sensing of Environment, Elsevier*, 2008, 112 (10), pp.3935-3946.
- Manabe, S. (1969). Climate and the ocean circulation. *The atmospheric circulation and the hydrology of the Earth's surface. Monthly Weather Review*, 97(11), 739-774

- Merlin, O, Christoph Rüdiger, Ahmad Al Bitar, Philippe Richaume, Jeffrey Walker, et al. 2012. Disaggregation of SMOS soil moisture in southeastern Australia. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012, 50 (5), pp.1556-1571.*
- Mohanty, B.P., Famiglietti, J.S., Skaggs, T.H., 2000. Evolution of soil moisture spatial structure in a mixed vegetation pixel during the Southern Great Plains 1997 (SGP97) hydrology experiment. *Water Resources Research 36 (12), 3675–3686*
- Pyrcs, M. J., Deutsch, C. V., 2003. The Whole Story on the Hole Effect. *Geostatistical Association of Australasia, Newsletter*
- Sun, H.Y., Liu, C.H., Zhang a, X. Y., Shen, Y. J., Zhang, Y. Q., 2006. Effects of irrigation on water balance, yield and WUE of winter wheat in the North China Plain. *Agricultural water management 85 (2006) 211–218*
- Thompson, R.B., Gallardo, M., Valdez., L.C., Fernandez, M.D. 2007. Determination of lower-limits for irrigation management using in situ assessments of apparent crop water uptake made with volumetric soil water content sensors.
- Van ES, H., Warrick, A. 2002. *Methods of Soil Analysis. Chap 1. pp8*
- Vellidis, G., Tucker. M., Perry, C., Kvein, C., 2007. A real time sensor array for scheduling irrigation. *Agronomy Monographs No. 9, pp. 422-423.*
- Wanders, N., Bierkens, M., de Jong, S. M., de Roo, A., & Karssenber, D. (2014). The benefits of using remotely sensed soil moisture in parameter identification of large-scale hydrological models. *Water Resources Research, 50(8), 6874–6891. <http://dx.doi.org/10.1002/2013WR014639>.*
- Western, A.W., Grayson, R.B., Bloßschl, G., 2002. Scaling of soil moisture: a hydrologic perspective. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences 205, 20–37.*
- Yates, S.R., A.W. Warrick 2002. Geostatistics, p, 81 – 118, In J.H. Dance and G.C. Topp (eds) *Methods of soil analysis Part 4, 3rd edn, Chapter 1, Soil sampling and statistical procedures. Soil Science Society of America, Madison, WI.*