

USO DE LA HUMEDAD DEL SUELO SATELITAL PARA EL ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD DE LA PRODUCCIÓN DE TRIGO: EL CASO DE CASTILLA Y LEÓN

Laura Almendra-Martín*, Carlos M. Herrero-Jiménez, José Martínez-Fernández, Ángel González-Zamora, Nilda Sánchez

Instituto Hispano Luso de Investigaciones Agrarias, Universidad de Salamanca. Duero, 12, 37185 Villamayor. lauraalmendra@usal.es, <http://campus.usal.es/~hidrus>

RESUMEN. Se ha empleado la base de datos de satélite CCI (*Climate Change Initiative, European Space Agency*) con una resolución espacial de 25 km y escala temporal diaria, con el objeto de analizar si es factible su utilización para el estudio de la variabilidad del rendimiento del trigo y la detección de los periodos críticos en relación con esta variable a lo largo del ciclo fenológico. El trabajo se ha realizado con los datos de rendimiento de este cereal en Castilla y León (1979-2016). Para el análisis de correlación, los datos medios de humedad del suelo diarios se han calculado a partir de medias móviles de diferente duración (1, 7, 15 y 30 días). A escala regional, los resultados han mostrado dos periodos críticos en la relación entre humedad del suelo y rendimiento del trigo, uno en primavera y otro en otoño. Se han observado diferencias significativas a escala provincial entre las diferentes zonas.

ABSTRACT. The CCI (Climate Change Initiative European Space Agency) satellite database was used with a spatial resolution of 25 km and daily scale to analyze if it is feasible its use for the study of the variability of the wheat yield and the detection of critical periods in relation to this variable during the phenological cycle. The work was done with the wheat yield of the Castilla y León region (1979-2016). For the analysis of correlation, the daily average soil moisture data was calculated from moving averages of different lengths (1, 7, 15 and 30 days). At the regional level, the results showed two critical periods in the relationship between soil moisture and wheat yield, one in spring and one in autumn. Significant differences were observed at provincial scale amongst different areas.

1.- Introducción

Los cereales ocupan un lugar muy destacado en la agricultura mundial y gran parte de la alimentación de la población depende de su producción (FAO, 2016). En un escenario de incertidumbre climática, esta evidencia adquiere todavía más relevancia, sobre todo en regiones como la Mediterránea, en donde está previsto que la producción de cereal se vea afectada negativamente por la evolución del clima en los próximos años (Cammarano et al. 2019).

Para el análisis de la fenología de los cereales y de la variabilidad de su producción se emplean diferentes variables que hacen referencia a factores ambientales como la precipitación, la temperatura, el fotoperiodo, la vernalización y otros, casi siempre de carácter climático

(Iglesias y Quiroga, 2007; Rodríguez-Puebla et al. 2007). Por ejemplo, se ha estudiado la temperatura por su relación con el rendimiento a través de la formación del grano, de forma que se sabe que las altas temperaturas reducen la formación de los granos (Hergoz, 1986; Wiegand y Cuellar, 1981) y su calidad (Asseng et al. 2002; Martre et al. 2006). Las bajas temperaturas, entre 4 °C y 8 °C permiten la vernalización, que mejora la capacidad de floración (Porter, 1993; Ritchie, 1991). En cambio, valores por debajo de 4 °C pueden ser peligrosos si se dan en la fase de floración (WMO, 2010). En relación con las bajas temperaturas, la exposición a heladas, expresadas en horas por debajo de 0 °C, tienen un reflejo directo en el rendimiento por cuanto afectan al estrés y supervivencia de las plantas (McKersie, 1981).

La precipitación se utiliza, en ocasiones, por considerase un indicador del contenido de agua del suelo (Freebairn et al. 2018). La existencia de agua disponible para las plantas o su ausencia, sobre todo en el periodo fenológico entre floración y maduración, es un factor determinante de la calidad y cantidad de la cosecha (McMaster et al. 2005).

La radiación solar que reciben los cultivos, en particular la radiación fotosintéticamente activa, determinada a través de la intensidad y duración, es otro factor con clara influencia en el crecimiento y rendimiento de las plantas (Fischer y Stockman, 1980; Kemp y Whingwiri, 1980; McMaster et al. 1987).

Además, la mayoría de los modelos de estimación de la producción utilizan enfoques basados en datos climáticos o producto de la modelización climática (McMaster y Wilhelm, 2003; Wu et al. 2004). Cuando dichos modelos han empleado variables obtenidas a partir de sensores situados a bordo de satélites, éstas han sido mayoritariamente índices de vegetación y, con mucha frecuencia, el NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), (Han et al. 2019).

Sin embargo, a pesar de que se sabe que la disponibilidad de agua en el suelo es un factor de primera magnitud (McMaster et al. 2005), rara vez se utiliza la humedad del suelo en este tipo de análisis. Eso se ha debido, en gran medida, a la escasa disponibilidad de bases de datos adecuadas. En la mayor parte de los casos, los estudios en los que se ha aplicado el contenido de agua del suelo han empleado series de corta duración (Fares y Alva, 2000; Thompson et al. 2007), o bien series largas provenientes de la modelización, aunque de un alcance espacial muy limitado (Liang et al. 2016). En las últimas décadas ha habido un creciente interés por la investigación

y el desarrollo tecnológico en el campo de la monitorización de la humedad del suelo mediante satélite. En la actualidad se dispone de información de alcance global, con una resolución espacio/temporal adecuada para muchas aplicaciones que hasta hace poco eran impensables. No obstante, todavía son muy pocos los trabajos en los que se utiliza la humedad del suelo satelital (White et al. 2019).

En este trabajo se ha empleado la base de datos de satélite CCI (*Climate Change Initiative, European Space Agency*) (Dorigo et al. 2015), con una resolución espacial de 25 km y escala temporal diaria, con el objeto de analizar si es factible su utilización para el estudio de la variabilidad del rendimiento del trigo y la detección de los periodos críticos en relación con esta variable a lo largo del ciclo fenológico. A partir de la humedad superficial de CCI, se ha estimado la humedad en la zona radicular mediante el modelo SWI (*Soil Water Index*) (Ceballos et al. 2005; Wagner et al. 1999). El trabajo se ha realizado con los datos de rendimiento de este cereal en la comunidad autónoma de Castilla y León durante el periodo 1979-2016. Esta región es la principal productora de cereales de España y en ella se obtiene algo más del 50% del total nacional de trigo (García Navas, 2017).

2.- Material y métodos

2.1. Datos de rendimiento del trigo

Los datos de rendimiento de trigo se han obtenido del anuario de estadística del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA, 2019). Para llevar a cabo el análisis de los datos procedentes del anuario y dado que algunos de ellos proceden de documentos escaneados y con unidades de medida no empleadas actualmente, se ha elaborado una base de datos que contiene la serie de rendimientos de trigo total (sin distinguir su dureza) en grano en seco desde el año 1979 hasta el año 2016 para cada una de las provincias de la Comunidad Autónoma de Castilla y León, así como la serie regional.

2.2. Base de datos CCI

La base de datos de humedad del suelo *Climate Change Initiative* (CCI) de la *European Space Agency* (ESA, <http://www.esa-soilmoisture-cci.org/>), integra todos los datos disponibles desde 1979 de sensores de microondas en banda L, C, X y Ku de satélites, tanto activos como pasivos, para producir una base de datos de humedad del suelo global, consistente y de larga duración (Dorigo et al., 2017). De la base de datos CCI se ha utilizado el producto combinado de humedad del suelo diaria con una resolución espacial de 25 km, en su versión 4.2. Esta base de datos ha sido validada en numerosos trabajos en diferentes países y bajo distintas condiciones ambientales (Dorigo et al. 2015; González-Zamora et al. 2019). Dentro de Castilla y León solo se seleccionaron los píxeles de CCI que tienen un uso del suelo eminentemente agrícola, asumiendo que la mayor parte de ella está dedicada a cereales de secano y que el trigo es el cultivo más extendido (García Navas, 2017).

A partir de la humedad del suelo superficial de CCI, y aplicando el modelo SWI siguiendo la metodología de González-Zamora et al. (2016) y Pablos et al. (2018), se ha obtenido la humedad en la zona radicular diaria para el periodo comprendido entre enero de 1979 y diciembre de 2016.

2.3. Metodología

Para analizar si la humedad del suelo obtenida con satélite es útil para estudiar la variabilidad del rendimiento del trigo y detectar cuáles son los momentos críticos de su ciclo, se ha empleado el análisis de correlación. Se calculó el coeficiente de correlación de Pearson (R) entre las series de datos de CCI de cada día del ciclo fenológico del trigo, calculadas como la media móvil de diferentes intervalos (1, 7, 15 y 30 días), con las series de rendimiento anual. Esto se hizo desde el día 1 de septiembre del año previo, considerado el primer día del año agrícola, hasta el 31 de julio del año correspondiente, cuando ha terminado la cosecha. Así, la serie de datos, desde 1979 hasta 2016, de cada 1 de septiembre, la serie de cada día 2 de ese mes y así sucesivamente, se correlacionaron con las series de rendimiento anual para ese mismo periodo. De ese modo, se obtuvo una serie de 334 valores de R y se identificaron aquellos que tuvieron significación estadística ($p < 0.05$).

Debido a los avances en la tecnología agrícola, como es el caso de la fertilización, el uso de nuevas variedades, el control de semillas o las mejoras en el laboreo, en la mayor parte de las zonas agrícolas se ha observado a lo largo de las últimas décadas un constante aumento de la productividad (FAO, 2016). Con el objeto de excluir el factor tecnológico en la variabilidad del rendimiento del trigo y dejar solamente aquella que es debida a factores ambientales, se eliminó la tendencia en las series de rendimiento empleando el método utilizado por Potopová et al. (2015). Una vez obtenidas las series sin tendencia, se calcularon los residuos estandarizados del rendimiento (Sun et al. 2011) y se correlacionaron con los datos de CCI, tal y como se ha explicado.

Además, para estudiar la relación entre la humedad y el rendimiento del trigo, se aplicó el *iterative chi-square analysis* desarrollado por Caprio (1966). Esta metodología ha sido empleada en diferentes trabajos para estimar los valores umbral (superior o inferior) a partir de los cuales la influencia que ejerce la variable humedad sobre el rendimiento es significativa (Champagne et al., 2019; White et al., 2019). El análisis se realizó comparando los años de alto y bajo rendimiento con los de rendimiento normal. La agrupación de los distintos años se obtuvo a partir de los cuartiles, realizando previamente una media móvil de 5 años en las series de los residuos del rendimiento. El valor de chi-cuadrado (χ^2) se calculó utilizando una ventana móvil de 30 días y los umbrales de humedad se buscaron en intervalos de $0.02 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$.

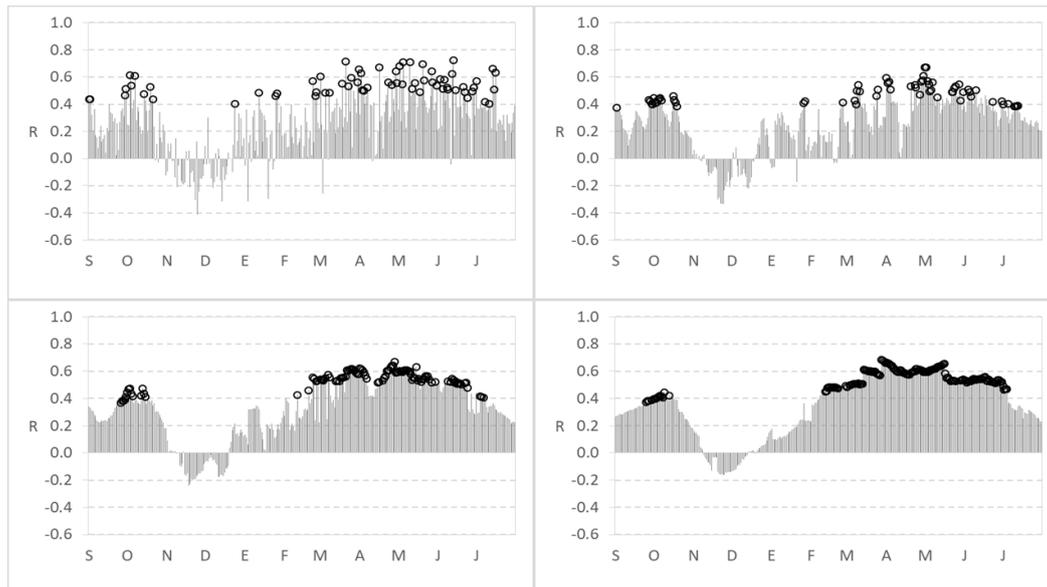


Fig. 1. Valores diarios de R entre el rendimiento de trigo en Castilla y León y la humedad del suelo CCI, para medias móviles de 1 (arriba izda.), 7 (arriba dcha.), 15 (abajo izda.) y 30 (abajo dcha.) días. Datos con significación estadística, $p < 0.05$ (círculos).

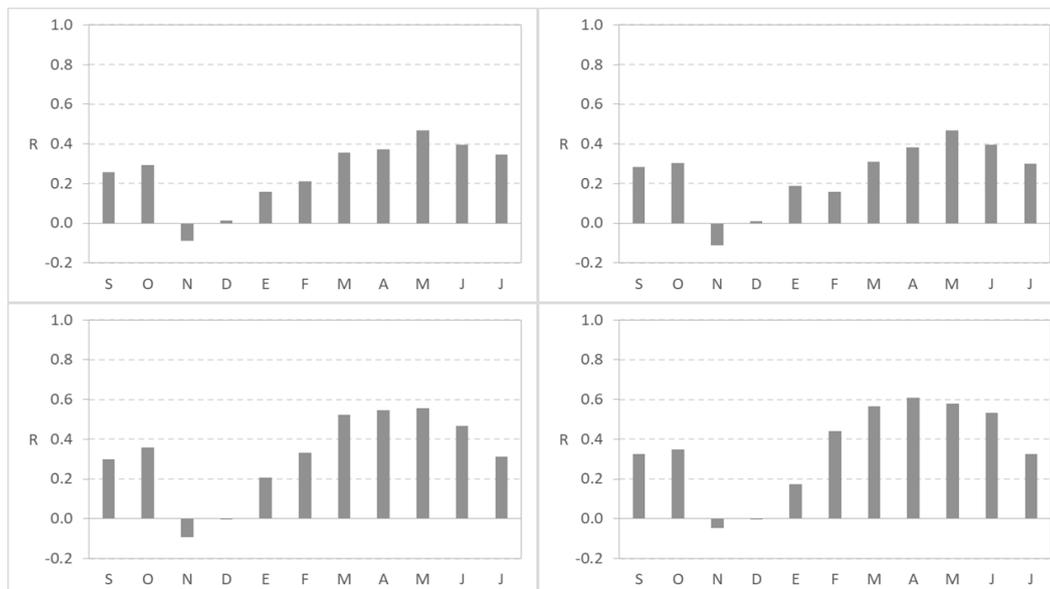


Fig. 2. Medias mensuales de R entre el rendimiento de trigo en Castilla y León y la humedad del suelo CCI, para medias móviles de 1 (arriba izda.), 7 (arriba dcha.), 15 (abajo izda.) y 30 (abajo dcha.) días.

3.- Resultados y discusión

Los resultados del análisis de correlación (Fig. 1) ponen de manifiesto la vinculación que existe entre el rendimiento del trigo en Castilla y León y el contenido de agua en el suelo, expresado por los datos de las series de CCI. Del mismo modo, permiten determinar cuáles son los periodos críticos, es decir, aquellos en los que la humedad del suelo tiene un papel más determinante en relación con la productividad de este cereal en esta región. A pesar de que aparece mucho más definido para la ventana de 30 días de media móvil (Fig. 1), en los cuatro casos analizados se observan claramente los momentos en los que la relación entre ambas variables es significativa. Por tanto, los

resultados reflejan que los periodos más relevantes son, por un lado, la primavera entendida en un sentido amplio (marzo a junio) y, por otro, el otoño centrado en el mes de octubre. Dichos intervalos se corresponden con las fenofases que van del encañado a la maduración, y la de germinación y nascencia, respectivamente.

Si se analizan los resultados a partir de los promedios mensuales del coeficiente de correlación (Fig. 2) se puede observar con mayor definición ese patrón temporal. Por un lado, el papel secundario pero relevante del periodo otoñal de siembra, con una mayor prevalencia de octubre. Por otro, el periodo primaveral, entre marzo y junio, con un carácter más destacado en mayo en el caso de las ventanas de 1, 7 y 15 días, y abril en la de 30 días.

Tabla 1. Máxima diaria y mensual de R entre el rendimiento de trigo en Castilla y León y la humedad del suelo CCI, para medias móviles de 1, 7, 15 y 30 días.

Medias móviles (días)	Diaria Máx.	Día	Mensual Máx.	Mes
1	0.71	10 mayo	0.47	mayo
7	0.67	1 mayo	0.47	mayo
15	0.67	28 abril	0.56	mayo
30	0.69	28 marzo	0.61	abril

En la Tabla 1 se recogen los valores máximos de R, tanto diarios como mensuales, obtenidos para las cuatro ventanas temporales analizadas. A escala diaria, ese máximo ha oscilado entre el 28 de marzo y el 10 de mayo. En el caso del promedio mensual, el valor máximo de R se ha obtenido en mayo para las ventanas de 1, 7 y 15 días, y abril en la de 30 días. Páscoa et al. (2017) encontraron que las condiciones del mes de mayo ejercen un gran control sobre la producción de trigo en la Península Ibérica.

En ambos casos, análisis diario y mensual, no se ha podido establecer una concreción mayor en relación con el momento crítico, sobre todo en el periodo primaveral. Esto puede haberse debido, probablemente, al hecho de considerar en su conjunto a toda la región de Castilla y León. Hay que tener en cuenta que se trata de una región muy extensa, con más de 94000 km², y eso puede encubrir comportamientos diferenciales entre unas zonas y otras dentro de la misma región. Por esta razón, se hizo un análisis similar a escala provincial (Tabla 2). De este modo se ha podido observar como, por ejemplo, en provincias del sur de la región como Salamanca, Segovia o Ávila el mes crítico es junio, coincidente con la fase de maduración del trigo. En el caso de provincias como Burgos, Palencia o Soria, más al norte y mayor altitud media, marzo tiene un mayor protagonismo, aunque secundariamente aparece también mayo y junio. En las dos provincias más occidentales, León y Zamora, el mes con un valor promedio de R más alto es mayo en todos los casos. Este análisis provincial más pormenorizado pone de manifiesto, por tanto, lo que se observaba a escala regional, la relevancia que tiene ese periodo primaveral en sentido amplio, como se comentó anteriormente. También ha permitido identificar comportamientos diferenciales entre provincias. Hay casos como el de la provincia de León en los que se observa un patrón sumamente claro con un máximo muy significativo a mediados de mayo y un pico de R secundario, pero también significativo, en la segunda quincena de septiembre. Sin embargo, en provincias como Valladolid o Zamora dicho patrón está muy difuminado, y en el caso de la segunda se han obtenido muy pocos días con valores de R estadísticamente significativos.

Tabla 2. Máxima diaria y mensual de R entre el rendimiento de trigo en las provincias de Castilla y León, y la humedad del suelo CCI, para medias móviles de 1, 7, 15 y 30 días.

Provincia	Medias móviles (días)	Diaria Máx.	Día	Mensual Máx.	Mes
Ávila	1	0.76	13 junio	0.59	junio
	7	0.74	11 junio	0.62	junio
	15	0.75	1 octubre	0.63	junio
	30	0.76	30 septiembre	0.66	junio
Burgos	1	0.86	18 marzo	0.43	octubre
	7	0.83	19 marzo	0.49	mayo
	15	0.82	19 marzo	0.68	marzo
	30	0.82	18 marzo	0.79	marzo
León	1	0.83	11 mayo	0.55	mayo
	7	0.77	22 mayo	0.60	mayo
	15	0.79	16 mayo	0.68	mayo
	30	0.76	14 mayo	0.72	mayo
Palencia	1	0.81	21 marzo	0.50	marzo
	7	0.72	1 marzo	0.54	marzo
	15	0.69	25 marzo	0.61	marzo
	30	0.75	28 marzo	0.57	abril
Salamanca	1	0.83	15 junio	0.64	junio
	7	0.76	30 mayo	0.67	junio
	15	0.74	9 junio	0.69	junio
	30	0.74	12 junio	0.72	junio
Segovia	1	0.87	6 junio	0.72	junio
	7	0.84	26 mayo	0.73	junio
	15	0.84	11 junio	0.76	junio
	30	0.84	12 junio	0.80	junio
Soria	1	0.80	3 abril	0.48	mayo
	7	0.77	31 marzo	0.52	marzo
	15	0.73	29 marzo	0.57	marzo
	30	0.69	29 marzo	0.57	marzo
Valladolid	1	0.82	2 mayo	0.40	junio
	7	0.66	30 abril	0.45	octubre
	15	0.67	29 marzo	0.47	junio
	30	0.63	4 octubre	0.49	mayo
Zamora	1	0.73	29 abril	0.40	mayo
	7	0.62	1 mayo	0.43	mayo
	15	0.50	16 mayo	0.46	mayo
	30	0.48	9 mayo	0.47	mayo

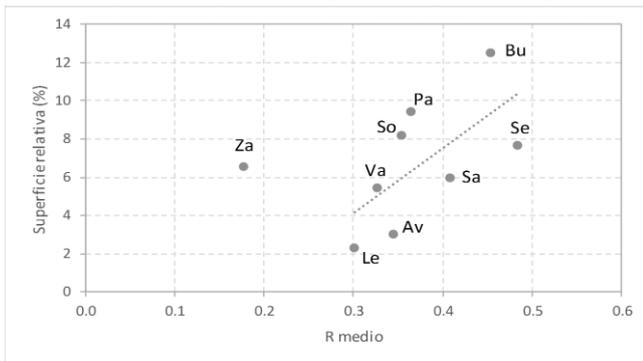


Fig. 3. Relación entre el valor medio de R (rendimiento del trigo vs humedad del suelo CCI) y superficie relativa dedicada al cultivo de trigo en las provincias de Castilla y León.

Con el objeto de analizar el posible origen de este comportamiento anómalo se correlacionó el valor medio de R de cada provincia con el valor relativo de superficie dedicada al cultivo del trigo (Fig. 3) y se observó que, en todos los casos excepto en Zamora, hay una relación positiva. Es decir, a medida que la superficie dedicada a trigo aumenta también lo hace la correlación entre rendimiento y humedad del suelo CCI. Esto induce a pensar que, en algunas provincias como Zamora, la resolución espacial de CCI (25 km) no sea la adecuada. No obstante, y a la vista de lo obtenido en el resto de provincias y en el cómputo global de Castilla y León, la humedad del suelo satelital puede ser una herramienta útil para analizar la variabilidad de la productividad agrícola. La disponibilidad de productos satelitales de humedad del suelo con resoluciones mayores (Reichle et al. 2017) y con series suficientemente largas, permitirá muy pronto superar esta aparente limitación.

Otro aspecto que puede haber influido en la dificultad de encontrar, en algunos casos, un periodo crítico mejor definido puede estar relacionado con la dinámica climática reciente. Las tendencias que se observan en las condiciones climáticas de muchas regiones están modificando notablemente del ciclo fenológico de multitud de especies (Linderholm, 2006). Así, Oteros et al. (2015), en un estudio sobre las variaciones recientes en la fenología de los cereales en España, encontraron que la fase de hinchamiento de las espigas (embuchamiento) del trigo que tiene lugar entre marzo y mayo, según las zonas, ha experimentado en las últimas décadas un adelantamiento de hasta 3 días por año.

En el análisis de χ^2 , se consideró una relación significativa entre las variables para un nivel de confianza del 1%. En los resultados obtenidos se observa que esto se cumple para prácticamente todo el año agrícola en la región de Castilla y León. Además, los periodos en los que se alcanza un valor máximo de χ^2 y por tanto la influencia de la humedad sobre el rendimiento es mayor, coinciden con los valores máximos obtenidos en el análisis de correlación. Tanto para el estudio con años de alto rendimiento como para aquellos en los que ha sido bajo, el máximo de χ^2 se obtiene en primavera. Para los años de alto rendimiento, la humedad en el periodo primaveral posee un exceso de valores inferiores a $0.28 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ y superiores a $0.20 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$. Mientras que en los

años de bajo rendimiento existe un exceso de valores inferiores a $0.22 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ y superiores a $0.18 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ en este mismo periodo. Además, se obtuvo otro máximo en otoño en los años de bajo rendimiento, aunque con un valor de χ^2 menor que el de primavera. En este intervalo la humedad muestra un exceso de valores inferiores a $0.16 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$. Es decir, se ha obtenido una relación entre un bajo contenido de humedad en otoño y en primavera con años de bajo rendimiento, y un alto contenido de humedad en primavera con años de alto rendimiento, como cabía esperar. Pero además se ha cuantificado esta variable en los diferentes escenarios. Como se ha mostrado, este análisis ha permitido identificar la influencia que ejerce la humedad en los periodos más relevantes (primavera y, en menor medida, otoño), de manera similar y complementaria a lo obtenido con el análisis de correlación.

4.- Conclusiones

Es bien conocido que el contenido de agua del suelo es una variable clave para entender la dinámica de la productividad agrícola. Sin embargo, dicha variable no se utiliza habitualmente en este tipo de estudios por la dificultad de encontrar una estrategia adecuada de monitorización y de disponer de series de larga duración. Desde este punto de vista, la teledetección puede ser una alternativa viable, sobre todo, teniendo en cuenta los avances experimentados recientemente en esta disciplina y, especialmente, en el campo de la observación de la humedad del suelo.

En este estudio se ha demostrado que la humedad del suelo satelital es suficientemente reactiva y sensible para identificar el patrón temporal de productividad del trigo e identificar los periodos críticos respecto a esta variable en las diferentes fases de su ciclo fenológico. El trabajo llevado a cabo con el rendimiento del trigo en Castilla y León, ha puesto de manifiesto la relevancia del contenido de agua del suelo en el periodo primaveral y, secundariamente, en el momento de la siembra. Un análisis más pormenorizado ha puesto en evidencia la existencia de comportamientos particulares en las diferentes provincias, como era de esperar tratándose de una región tan extensa. Factores como las variaciones temporales del ciclo fenológico observadas en los últimos años como consecuencia de la tendencia climática o la diversidad de ambiental de cada territorio, han de tenerse en cuenta en análisis de este tipo. Por otro lado, se ha observado también que la resolución espacial de CCI podría ser inadecuada en zonas donde la distribución de los usos del suelo no sea concordante con el objetivo que se pretende. Afortunadamente, en la actualidad ya están disponibles productos de humedad del suelo satelital con mayor resolución espacial que van a permitir salvar ese obstáculo en un futuro próximo.

Los resultados obtenidos en este trabajo muestran que esta aproximación puede ser útil y que el uso de la humedad del suelo satelital puede ayudar en la investigación de la relación entre los factores ambientales y la productividad agrícola.

Agradecimientos. Los autores desean expresar su agradecimiento al Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (proyecto ESP2017-89463-C3-3-R) y al Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) por financiar este estudio. Del mismo modo, agradecen a la *European Space Agency* por el suministro de la base de datos de CCI.

5.- Bibliografía

- Asseng, S., A. Bar-Tal, J.W. Bowden, B.A. Keating, A. Van Herwaarden, J.A. Palta, N.I. Huth, y M.E. Probert, 2002. Simulation of grain protein content with APSIM-Nwheat. *Eur. J. Agron.* 16, 25-42.
- Cammarano, D., S. Ceccarelli, S. Grando, I. Romagosa, A. Benbelkacem, T. Akar, A. Al-Yassin, N. Pecchioni, E. Francia, y D. Ronga, 2019. The impact of climate change on barley yield in the Mediterranean basin. *European Journal of Agronomy.* 106, 1-11.
- Caprio, J.M., 1966. A statistical procedure to determine recent climate change of extreme daily meteorological data as applied at two locations in Northwestern North America. *Agricultural Meteorology.* 3, 55-72.
- Ceballos, A., K., Scipal, W. Wagner y J. Martínez-Fernández, 2005. Validation of ERS scatterometer-derived soil moisture data in the central part of the Duero basin, Spain. *Hydrological Processes.* 19, 1549-1566.
- Champagne, C., J. White, A. Berg, S. Belair, y M. Carrera, 2019. Impact of soil moisture data characteristics on the sensitivity to crop yields under drought and excess moisture conditions. *Remote Sensing.* 11, 372.
- Dorigo, W.A., A. Gruber, R.A.M. de Jeu, W. Wagner, T. Stacke, A. Loew, C. Albergel, L. Brocca, D. Chung, R.M. Parinussa, y R. Kidd, 2015. Evaluation of the ESA CCI soil moisture product using ground-based observations. *Remote Sensing of Environment.* 162, 380-395.
- Dorigo, W., W. Wagner, C. Albergel, F. Albrecht, G. Balsamo, L. Brocca, D. Chung, M. Ertl, M. Forkel, A. Gruber, E. Haas, P.D. Hamer, M. Hirschi, J. Ikonen, R.A.M. de Jeu, R. Kidd, W. Lahoz, Y.Y. Liu, D. Miralles, T. Mistelbauer, N. Nicolai-Shaw, R.M. Parinussa, C. Pratola, C. Reimer, R. van der Schalie, S. Seneviratne, T. Smolander, y P. Lecomte, 2017. ESA CCI Soil Moisture for improved Earth system understanding: State-of-the-art and future directions. *Remote Sensing of Environment.* 203, 185-215.
- FAO, 2016. Save and grow in practice maize, rice, wheat. A guide to sustainable cereal production. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. 111 pp.
- Fares, A., y A.K. Alva, 2000. Evaluation of capacitance probes for optimal irrigation of citrus through soil moisture monitoring in an entisol profile. *Irrigation Science.* 19, 57-64.
- Fischer, R.A., y Y.M. Stockman 1980. Kernel number per spike in wheat (*Triticum aestivum* L.): responses to preanthesis shading. *Aust. J. Plant Physiol.* 7, 169-180.
- Freebairn, D.M., A. Ghahramani, J.B. Robinson, y D.J. McClymont, 2018. A tool for monitoring soil water using modelling, on-farm data, and mobile technology. *Environmental Modelling & Software.* 104, 55-63.
- García Navas, F., 2017. El sector agrario en Castilla y León 2017. Banco de Caja España de Inversiones, Salamanca y Soria S.A. Málaga. 153 pp.
- González-Zamora, A., N. Sánchez, J. Martínez-Fernández, y W. Wagner, 2016. Root-zone plant available water estimation using the SMOS-derived Soil Water Index. *Advances in Water Resources.* 96, 339-353.
- González-Zamora, A., N. Sánchez, M. Pablos, y J. Martínez-Fernández, 2019. CCI soil moisture assessment with SMOS soil moisture and in situ data under different environmental conditions and spatial scales in Spain. *Remote Sensing of Environment.* 225, 469-482.
- Han, C., B. Zhang, H. Chen, Z. Wei, y Y. Liu, 2019. Spatially distributed crop model based on remote sensing. *Agricultural Water Management.* 218, 165-173
- Herzog, H., 1986. Source and sink during the reproductive period of wheat: Development and its regulation with special reference to cytokinins. Berlin, Paul Parey Press.
- Iglesias, A., y S. Quiroga, 2007. Measuring the risk of climate variability to cereal production at five sites in Spain. *Climate Research.* 34, 47-57.
- Kemp, D.R., y E.E. Whingwiri, 1980. Effect of tiller removal and shading on spikelet development and yield components of the ear and flag leaf. *Aust. J. Plant Physiol.* 7, 501-510.
- Liang, H., K. Hu, W.D. Batchelor, Z. Qi, y B. Li, 2016. An integrated soil-crop system model for water and nitrogen management in North China. *Scientific Reports.* 6, 25755.
- Linderholm, H.W., 2006. Growing season changes in the last century. *Agric. Forest. Meteo.* 137, 1-14.
- MAPA, 2019. Anuario de Estadística. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid. <https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/publicaciones/anuario-de-estadistica/>
- Martre, P., P.D. Jamieson, M.A. Semenov, R.F. Zyskowski, J.R. Porter, y E. Triboui, 2006. Modelling protein content and composition in relation to crop nitrogen dynamics for wheat. *Eur. J. Agron.* 25, 138-154.
- McKersie, B.D., 1981. Strength in adversity: winter hardiness in cereals. *Highlights of Agricultural Research in Ontario.* 4, 12-15.
- McMaster, G.S., y W.W. Wilhelm, 2003. Phenological responses of wheat and barley to water and temperature: improving simulation models. *J. Agric. Sci.* 141, 129-147.
- McMaster, G.S., W.W. Wilhelm, y A.B. Frank, 2005. Developmental sequences for simulating crop phenology for water-limiting conditions. *Aust. J. Agric. Res.* 56, 1277-1288.
- McMaster, G.S., J.A. Morgan, y W.O. Willis 1987. Effects of shading on winter wheat yield, spike characteristics, and carbohydrate allocation. *Crop Sci.* 27, 967-973.
- Oteros, J., H. García-Mozo, R. Botey, A. Mestre, y C. Galán, 2015. Variations in cereal crop phenology in Spain over the last twenty-six years (1986–2012). *Climatic Change.* 130, 545-558.
- Pablos, M., A. González-Zamora, J. Martínez-Fernández, y N. Sánchez, 2018. Assessment of root zone soil moisture estimations from SMAP, SMOS and MODIS observations. *Remote Sensing.* 10, 981.
- Páscoa, P., C. M. Gouveia, A. Russo y R. M. Trigo, 2017. The role of drought on wheat yield interannual variability in the Iberian Peninsula from 1929 to 2012. *International Journal of Biometeorology.* 61, 439-451.
- Porter, J.R., 1993. AFRCWHEAT2: A model of the growth and development of wheat incorporating responses to water and nitrogen. *Eur. J. Agron.* 2, 69-82.
- Potopová, V., P. Stepánek, M. Mozný, L. Türkott, y J. Soukup, 2015. Performance of the standardised precipitation evapotranspiration index at various lags for agricultural drought risk assessment in the Czech Republic. *Agricultural and Forest Meteorology.* 202, 26-38.
- Reichle, R.H., G. de Lannoy, Q. Liu, J.V. Ardizzone, A. Colliander, A. Conaty, W. Crow, T. Jackson, L.A. Jones, J.S. Kimball, R.D. Koster, S.P. Mahanama, E.B. Smith, A. Berg, S. Bircher, D. Bosch, T. Caldwell, M. Cosh, A. González-Zamora, C.D.H. Collins, K.H. Jensen, S. Livingston, E. Lopez-Baeza, J. Martínez-Fernández, H. McNairn, M. Moghaddam, A. Pacheco, T. Pellarin, J. Prueger, T. Rowlandson, M. Seyfried, P. Starks, Z. Su, M. Thibeault, R.v.d. Velde, J. Walker, X. Wu, y Y. Zeng, 2017. Assessment of the SMAP Level-4 Surface and Root-Zone Soil Moisture Product Using In Situ Measurements. *Journal of Hydrometeorology.* 18, 2621-2645.
- Ritchie, J.T., 1991. Wheat phasic development. In: *Modeling Plant and Soil Systems* (J. Hanks and J.T. Ritchie, eds). Madison, ASA-CSSA-SSSA.
- Rodríguez-Puebla, C., M. Ayuso, M. Frías, y L. García-Casado, 2007. Effects of climate variation on winter cereal production in Spain. *Climate Research.* 34, 223-232.
- Sun, L., S.W. Mitchell, y A. Davidson, 2011. Multiple drought indices for agricultural drought risk assessment on the Canadian prairies. *Int. J. Climatol.* 32, 1628-1639.
- Thompson, R.B., M. Gallardo, L.C. Valdez, y M.D. Fernández, 2007. Determination of lower limits for irrigation management using in situ assessments of apparent crop water uptake made with volumetric soil water content sensors. *Agricultural Water Management.* 92, 13-28.
- Wagner, W., G. Lemoine y H. Rott, 1999. A method for estimating soil moisture from ERS scatterometer and soil data. *Remote Sensing of Environment.* 70, 191-207.
- White, J., A.A. Berg, C. Champagne, J. Warland, y Y. Zhang, 2019. Canola yield sensitivity to climate indicators and passive microwave-derived soil moisture estimates in Saskatchewan, Canada. *Agricultural and Forest Meteorology.* 268, 354-362.
- Wiegand, C.L., y J.A. Cuéllar, 1981. Duration of grain filling and kernel weight of wheat as affected by temperature. *Crop Sci.* 21, 95-101.
- World Meteorological Organization, 2010. Guide to Agricultural Meteorological Practices. *WMO-No. 134.*
- Wu, H., K.G. Hubbard, y D.A. Willhite, 2004. An agricultural drought risk-assessment model for corn and soybeans. *International Journal of Climatology.* 24, 723-741.