

TESIS DOCTORAL

# Integración de imágenes de sensores remotos en el desarrollo de indicadores medioambientales en cuencas mediterráneas. Aplicación al seguimiento de su estado hídrico y productividad

**Autor:** Pedro J. Gómez-Giráldez

**Directores:** Dra. María Pat. González Dugo y Dra. Cristina Aguilar Porro

**Lugar:** Universidad de Córdoba

**Fecha:** 13/03/2020

**Calificación:** Sobresaliente *Cum Laude*

*Disponible:* <https://helvia.uco.es/handle/10396/20164>

El clima de las cuencas mediterráneas se caracteriza por la escasez de precipitaciones durante el verano lo que, unido a las altas temperaturas en esta estación, produce un importante estrés hídrico en el suelo y la vegetación. Estas condiciones intensifican el impacto de las sequías y posteriores eventos de torrencialidad y provoca que las zonas de clima mediterráneo sean especialmente vulnerables al cambio climático. Este clima favorece una vegetación característica: con escasa densidad arbórea (en zonas de poca altitud predominan las quercíneas, mientras que en zonas más altas comienzan a aparecer coníferas) pero con un sotobosque muy poblado formado por una gran diversidad de matorral, tanto en especies como en estructura, y por pastizales. Esta diversidad da lugar a un gran número de endemismos y especies protegidas. El seguimiento y la gestión adecuada de estos ecosistemas, de

gran importancia ambiental y económica, requiere disponer de herramientas operativas que permitan tomar decisiones con datos fiables y con una alta frecuencia, dada la gran variabilidad del clima.

El objetivo principal de esta tesis es evaluar el potencial de la información proporcionada por los sensores remotos para desarrollar indicadores medioambientales que permitan cuantificar y realizar un seguimiento objetivo y regular de la vegetación de las cuencas mediterráneas, prestando especial atención a su productividad y al estado hídrico del sistema. Se plantea el desarrollo de tres indicadores estrechamente ligados entre sí: (1) un indicador del estado hídrico del suelo a partir del estado de la cubierta vegetal (Gómez-Giráldez et al., 2014); (2) un indicador de la productividad de los pastos naturales, principal sustento alimenticio de la

\* Corresponding author: [pjgomezgiralddez@gmail.com](mailto:pjgomezgiralddez@gmail.com)

ganadería extensiva, a partir de su estado y de las condiciones climáticas del período evaluado (Gómez-Giráldez et al., 2019); y (3) un indicador que relacione el estado hídrico del sistema y el estado fenológico en el que se encuentra el estrato herbáceo (Gómez-Giráldez et al., 2020).

## 1. Indicador del estado hídrico del suelo a partir del estado de la cubierta vegetal

El interés por este indicador surge de la dificultad del seguimiento de la climatología/hidrología en los climas mediterráneos. Por ello, se ha planteado evaluar el uso del estado de la vegetación natural en condiciones semiáridas, determinado mediante sensores remotos, como indicador del estado hídrico del suelo, y analizar su relación con las características hidrológicas antecedentes a escala de cuenca, empleando para ello un modelo hidrológico distribuido.

La zona de estudio fue la cuenca del río Guadalfeo (Granada) que posee un fuerte gradiente altitudinal pasando de 0 a 3480 m s.n.m. en menos de 50 km. El modelo hidrológico utilizado fue el modelo WiMMed, un modelo físico y distribuido diseñado especialmente para áreas montañosas y semiáridas que había sido calibrado previamente para la zona de estudio. Con este modelo se generaron diversos mapas acumulados o agregados al final del año hidrológico desde 2000 a 2012. Para la estimación del estado de las cubiertas vegetales se empleó el *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI; Tucker, 1979) empleando datos de los satélites Landsat 5 y 7 al final de la estación seca. Se muestrearon las 3 cubiertas más extensas en la zona de estudio: coníferas, matorral y mezcla de encinar y matorral, y se muestrearon 1500 puntos aleatorios en cada una. Se estudiaron dos tipos de tendencias:

- La tendencia temporal del promedio anual en la que se seleccionaron las variables más determinantes en un estudio previo (Gómez-Giráldez et al., 2012). Se aplicaron matrices de correlación de Pearson entre estas variables y el NDVI para conocer la relación general entre variables y con el contenido de agua en el suelo (estimado como adimensional SWCd: infiltración, menos percolación, menos evaporación de suelo dividido entre

la profundidad de suelo por la porosidad) y posteriormente un análisis de componentes principales (ACP) para ver qué variables explicaban más variabilidad en la población muestreada. Por último, se hicieron regresiones entre los valores del índice y de las variables seleccionadas.

- La tendencia local anual, realizada para conocer la cubierta más representativa del contenido de agua en el suelo. Se aplicaron ajustes del tipo  $y=ax+b$  con “y” como SWCd y “x” como las variables seleccionadas en el análisis anterior; y luego ajustes del tipo  $y=ax_1+bx_2+c$  con “y” SWCd, “x1” variables seleccionadas en el análisis anterior y “x2” el NDVI, para relacionarlo directamente con la cobertura.

La heterogeneidad en el comportamiento hidrológico durante el período de estudio se reflejó en las diferencias en los valores de NDVI, más o menos constantes en coníferas (0,5-0,6) y más variables para las cubiertas de matorral. Las correlaciones entre las variables para las diferentes cubiertas y el ACP a escala espacial mostraron que, para las cubiertas de coníferas el SCWd se relacionó con las variables involucradas en el balance de agua líquida del suelo. En el caso del matorral, también se relacionó con el NDVI y las variables implicadas en la dinámica de la nieve. En la zona de encinar-matorral se produjo un comportamiento intermedio. Los mejores ajustes temporales se encontraron con ajustes exponenciales entre los valores espaciales anuales promedio de SWCd y NDVI en la cubierta de matorral con coeficientes  $r^2$  superiores a 0,7 y valor de RMSE de 0,051 (Ecuación 1). En esta cubierta también se encontraron las mayores correlaciones en el análisis intra-anual, alcanzando coeficientes  $r^2$  superiores a 0,85 en los mejores años.

$$SWCd=0,0024e^{11,75NDVI}; RMSE=0,051; SSE=0,02(1)$$

## 2. Indicador de la productividad de los pastos naturales de dehesa

Además de su importancia como foco de biodiversidad, los pastos de dehesa son el principal alimento de la ganadería extensiva propia de estos sistemas. La estimación de su producción es útil

para el seguimiento del estado de la vegetación y puede informar sobre la idoneidad/insuficiencia de su gestión. La mayor parte de los modelos de producción a partir de sensores remotos se centran en ecosistemas completos, prestando escasa atención al comportamiento diferente de los componentes específicos del dosel. Por ello, en este caso se planteó desarrollar y evaluar el funcionamiento de un modelo de estimación de biomasa adaptado a los pastos de la dehesa y que tenga en consideración la existencia y el efecto del arbolado y explorar el potencial de este indicador para realizar un seguimiento regular del ecosistema a escala regional y local. En el primer caso para apoyar la toma de decisiones por parte de los responsables del diseño y aplicación de políticas agrarias y, en el segundo, para mejorar la información disponible a escala de parcela y finca, y poder minimizar los costes de alimentación de los animales en sistemas extensivos de pastoreo. A escala local se busca además apoyar la evaluación de diferentes prácticas de manejo en parcela, con el fin último de evitar la sobreexplotación de este recurso y asegurar la conservación del sistema.

La zona de estudio fue la zona de dehesa de Andalucía. El modelo usado es una adaptación del modelo clásico de eficiencias de Monteith (1972), que calcula la producción primaria neta (NPP) como el sumatorio en el tiempo del producto de la fracción de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) absorbida por la planta y la eficiencia en el uso de esa radiación o eficiencia en el uso de la luz ( $\epsilon$ ). Este modelo se aplicó a escala diaria durante los años hidrológicos 2013/2014 y 2014/2015 a escala regional y 2015/2016 y 2016/2017 a escala local.

Para la estimación del FPAR se usaron series de NDVI diarias, para lo que se interpolaron linealmente (empleando para ello el producto MODIS (MOD09Q1) a escala regional, e imágenes de Sentinel-2 a escala local). Previamente, el valor mínimo anual de NDVI en cada píxel, que se asume correspondiente a la presencia de vegetación arbórea, se resta del valor diario de NDVI. Este mínimo se toma de los valores obtenidos durante el verano, cuando los pastos anuales están secos y la única actividad fotosintética corresponde al arbolado. Con los valores de NDVI obtenidos, se estimó una relación lineal FPAR-NDVI para el pasto de dehesa.

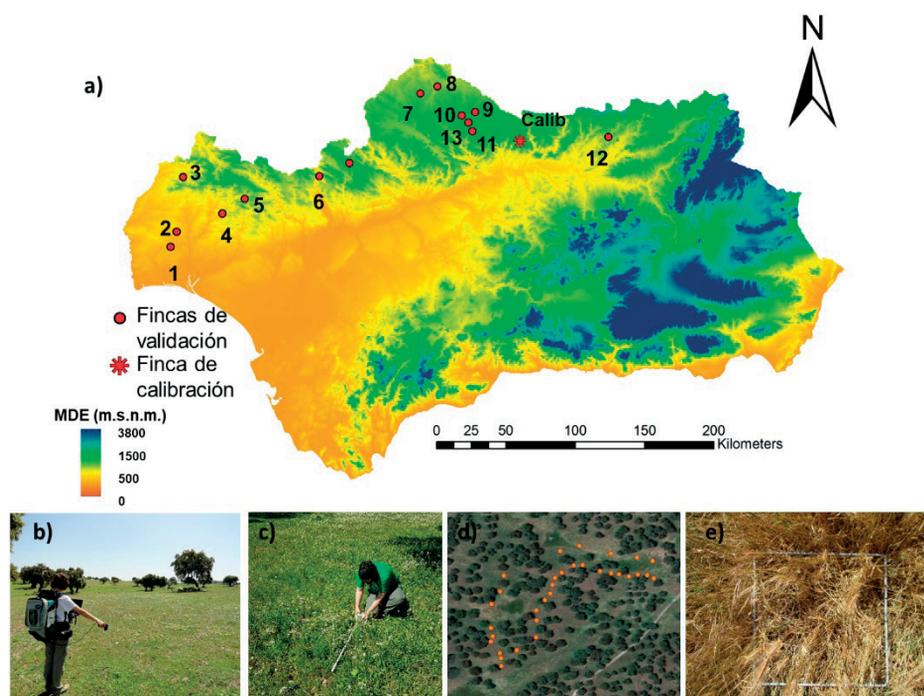
La radiación PAR se obtuvo a partir de la radiación solar (Rad) con un factor de reducción de 0,48 (Szeicz, 1974).

Para la estimación de  $\epsilon$ , se adoptó un valor máximo empírico para pasto de 1,12 g/MJ. Este máximo fue minorado diariamente usando umbrales del déficit de presión de vapor (DPV) y de la temperatura mínima ( $T_{min}$ ) específicos para praderas (Running et al., 2004).

A escala regional, los resultados obtenidos se validaron usando medidas en 13 fincas de dehesa (Figura 1). A escala local, se aplicó sobre un conjunto de parcelas (16 en total distribuidas en 7 de estas fincas) en las que en 2016 se realizaron prácticas de mejora de pastos que incluyeron en unos casos la siembra y fertilización (5 parcelas) y en otros únicamente la fertilización (4 parcelas). Además, se seleccionaron como control 7 parcelas sin actuación, asumiendo que la variación entre ellas permite comparar la variación en otras áreas y evitar en gran medida el efecto de las condiciones climáticas particulares del año.

Los resultados mostraron precisiones admisibles para los objetivos del proyecto a ambas escalas espaciales. El error promedio en el NPP acumulado, obtenido a escala regional durante los dos años hidrológicos analizados, fue del 13%, similar al obtenido por otros autores en cubiertas agrícolas muchos más homogéneas. A escala de parcela, el error en la estimación fue del 16%, también se consideró aceptable para el uso propuesto, dado que las mejoras realizadas en el pasto y evaluadas por este procedimiento pueden aumentar la producción hasta el 70%.

Además, en el estudio de este indicador se exploraron diferentes enfoques para la parametrización del efecto del estrés hídrico en la producción primaria bruta (GPP) en dehesa (Gómez-Giráldez et al., 2018), como punto de partida para profundizar en este indicador vinculado a la producción del pasto. A escala diaria, el uso combinado de un índice de estrés hídrico además de los umbrales meteorológicos proporcionó las mejores estimaciones de GPP, especialmente en la estación seca (con valores de  $r^2$  alrededor de 0,8 y RMSE de 0,4). Sin embargo, este método presentó un sesgo que, en los valores acumulados, resultó en una subestimación significativa de las estimaciones estacionales.



**Figura 1.** (a) Modelo digital de elevaciones de Andalucía y distribución de las fincas de validación usadas (1–13) y la finca de calibración y validación (Calib); (b) Medida de radiometría espectral sobre pasto usando un espectrorradiómetro (ASD FieldSpec); (c) Medición de PAR en campo para validación; (d) Fotografía aérea con un ejemplo de camino seguido para el muestreo de pasto en la *comparative yield method* en la finca de calibración; (e) Ejemplo de corta de pasto para la validación. Elaboración a partir de Gómez-Giráldez et al. (2019).

### 3. Indicador de relación del estado hídrico del sistema y el estado fenológico en el que se encuentra el estrato herbáceo

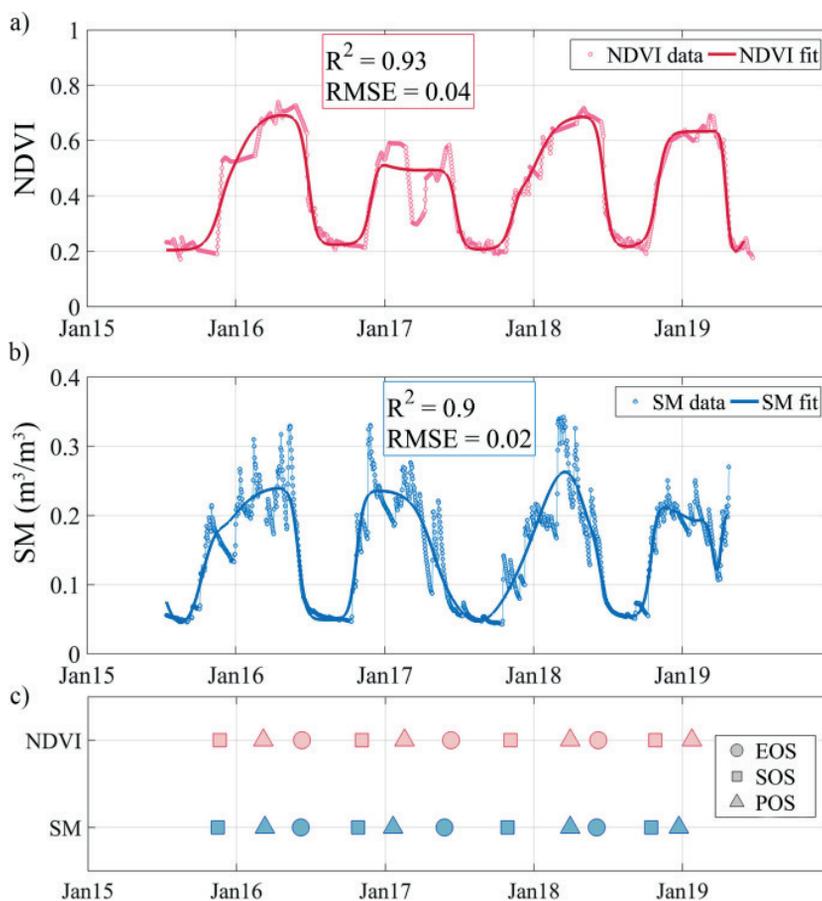
El seguimiento de la fenología de ecosistemas mediterráneos puede aportar información muy relevante al estudio de los impactos del calentamiento global. Para ello se han empleado imágenes de satélite y datos meteorológicos, explorando el potencial de Sentinel-2 para el seguimiento de la fenología de los pastos comparada con la determinada mediante fotografía terrestre.

Se evaluó la relación de los pastos y su ciclo de vida con las principales variables abióticas que controlan el sistema, así como el uso de una variedad de índices de vegetación derivados de diferentes combinaciones de bandas, tanto de banda ancha como de banda estrecha, para estudiar el comportamiento fenológico. Finalmente, se estudió la relación entre los IVs de satélite y las

variables abióticas, para valorar su capacidad para el seguimiento de la fenología.

El área de estudio en este caso fue la zona experimental de Santa Clotilde situada en el Parque Natural de la Sierra de Cardeña y Montoro (Córdoba). Para la estimación de la fenología del pasto mediante la cámara digital se empleó el índice *Green Chromatic Coordinate* (GCC, Gillespie et al., 1987). A la serie de valores de GCC se le aplicó el método del 50% de la amplitud (Zhang et al., 2003) para estimar el inicio del ciclo de crecimiento (SOS), el valor de pico de crecimiento (POS) y el final del ciclo (EOS).

La serie estudiada fue de diciembre de 2017 a mayo de 2019. Se seleccionó un grupo de índices de vegetación de Sentinel-2, con 10 y 20 m de resolución espacial, en este último caso empleando bandas en la zona del *Red Edge*. Las variables abióticas utilizadas para el estudio fueron las comúnmente usadas en modelos de



**Figura 2.** (a) Evolución del NDVI a lo largo del periodo de estudio (datos brutos, ajuste y error); (b) Evolución de SM en el periodo de estudio (datos brutos, ajuste y error); (c) Comparación de las fechas fenológicas EOS, SOS y POS entre NDVI y SM. (Gómez-Giráldez et al., 2020).

crecimiento como los usados en el indicador del punto anterior (DPV, T<sub>min</sub> y Rad), así como otras más usadas en estudios fenológicos (precipitación (R), temperatura máxima (T<sub>max</sub>) y temperatura media (T<sub>med</sub>)) y la humedad del suelo (SM). Las series de imágenes resultantes se analizaron en conjunto con el GCC de la cámara mediante una matriz de correlación de Pearson y aquellas variables consideradas más representativas se analizaron posteriormente usando el ACP para determinar qué variables explicaban el mismo proceso que GCC.

Por último, el índice de vegetación escogido y la variable abiótica más representativa se analizan en conjunto para un periodo extendido de julio 2015 a mayo de 2019.

Los resultados mostraron que los parámetros fenológicos estimados por el NDVI de Sentinel-2

( $r=0,83$ ,  $p<0,001$ ) y SM ( $r=0,75$ ,  $p<0,001$ ) presentaron una mejor relación con los derivados de las observaciones proporcionadas por la cámara digital terrestre que el resto de los índices analizados. Finalmente, la dinámica del NDVI y la humedad de suelo (SM) durante los cuatro periodos de crecimiento analizados mostraron una alta sincronización en este sistema, con cambios de estado fenológico detectados primero por la humedad del suelo, seguido por NDVI, con un retardo de entre 3 y 10 días (Figura 2).

#### 4. Conclusiones

Los resultados presentados en esta tesis han demostrado la utilidad de los sensores remotos para obtener indicadores medioambientales eficaces tanto para cuantificar y apoyar el seguimiento de la vegetación y la hidrología de

las zonas de estudio, como para asistir en la toma de decisiones sobre la gestión de estas zonas a escala de parcela, finca o cuenca hidrológica. Teniendo en cuenta la variabilidad del clima mediterráneo y de su vegetación, los períodos y áreas de estudio seleccionados para evaluar los distintos indicadores han recogido buena parte de esta heterogeneidad y se pueden considerar representativos de las condiciones más frecuentes en estos sistemas.

## Referencias

- Gillespie, A.R., Kahle, A.B., Walker, R.E. 1987. Color enhancement of highly correlated images. II. Channel ratio and “chromaticity” transformation techniques. *Remote Sensing of Environment*, 22(3), 343-365. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(87\)90088-5](https://doi.org/10.1016/0034-4257(87)90088-5)
- Gómez-Giráldez, P.J., Aguilar, C., Polo, M.J. 2012. NDVI sensitivity to the hydrological regime in semiarid mountainous environments. En: *Proceedings SPIE*. 8531, 85311A. Edimburgo (UK), 24-27 Septiembre. <https://doi.org/10.1117/12.974534>
- Gómez-Giráldez, P.J., Carpintero, E., Ramos, M., Aguilar, C., González-Dugo, M.P. 2018. Effect of the water stress on gross primary production modeling of a Mediterranean oak savanna ecosystem. En: *Proceedings IAHS*, 380, 37-43, Córdoba (España), 8-10 Mayo. <https://doi.org/10.5194/piahs-380-37-2018>
- Gómez-Giráldez, P.J., Aguilar, C., Caño, A.B., García-Moreno, A., González-Dugo, M.P. 2019. Remote sensing estimation of net primary production as monitoring indicator of holm oak savanna management. *Ecological Indicators*, 106, 105526. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105526>
- Gómez-Giráldez, P.J., Aguilar, C., Polo, M.J. 2014. Natural vegetation covers as indicators of the soil water content in a semiarid mountainous watershed. *Ecological Indicators*, 46, 524-535. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.06.024>
- Gómez-Giráldez, P.J., Pérez-Palazón, M.J., Polo, M.J., González-Dugo, M.P. 2020. Monitoring grass phenology and hydrological dynamics of an oak-grass savanna ecosystem using Sentinel-2 and terrestrial photography. *Remote Sensing*, 12, 600. <https://doi.org/10.3390/rs12040600>
- Monteith, J.L. 1972. Solar Radiation and Productivity in Tropical Ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 9, 747-766. <https://doi.org/10.2307/2401901>
- Running, S.W., Nemani, R.R., Heinsch, F.A., Zhao, M., Reeves, M., Hashimoto, H. 2004. A Continuous Satellite-Derived Measure of Global Terrestrial Primary Production. *Bioscience*, 54, 547-560. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2004\)054\[0547:ACSM OG\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2004)054[0547:ACSM OG]2.0.CO;2)
- Szeicz, G. 1974. Solar Radiation for Plant Growth. *Journal of Applied Ecology*, 11, 617-636. <https://doi.org/10.2307/2402214>
- Tucker, C. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8, 127-150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
- Zhang, X.Y., Friedl, M.A., Schaaf, C.B., Strahler, A.H., Hodges, J.C.F., Gao, F., Reed, B.C., Huete, A. 2003. Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 84, 471-475. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00135-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00135-9)