

SEGUIMIENTO DEL ESTADO DE LA VEGETACIÓN EN FUNCIÓN DE LAS PRECIPITACIONES MEDIANTE EL USO DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN Y MÉTRICAS DE FENOLOGÍA DE SUPERFICIE (LSP) EN EL PARQUE NATURAL DEL CARRASCAL DE LA FONT ROJA

Moutahir, H.^{1,2}, Turrión, D.¹, Casady, G.³, Metani, I.^{1,4}, Bellot, J.^{1,2} & Bonet, A.^{1,2,5}

¹ Departamento de Ecología. Universidad de Alicante. Correo electrónico: hassane_moutahir@yahoo.fr

² Instituto Multidisciplinar para el Estudio del Medio "Ramón Margalef" (IMEM). Universidad de Alicante.

³ Universidad de Whitworth, Spokane. EEUU.

⁴ Instituto Agronómico Mediterráneo de Zaragoza (IAMZ), Zaragoza.

⁵ Estación Científica Font Roja Natura UA. Departamento de Ecología. Universidad de Alicante.

Resumen: En un contexto de cambio climático el presente trabajo trata de abordar la respuesta de la vegetación a las precipitaciones mediante el análisis del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y las métricas de fenología de superficie (LPS, Land Surface Phenology) en el Parque Natural del Carrascal de la Font Roja (FR) para el periodo 2000-2017. Los resultados muestran una tendencia positiva en los valores medios anuales del NDVI en el periodo de estudio con un cambio negativo a partir del 2011 como respuesta al descenso de las precipitaciones en estos últimos años. La longitud media de la estación de crecimiento (LOS) en el Parque Natural es del orden de 174.7 ± 21.4 días mostrando una tendencia negativa significativa al 10% lo que indica un acortamiento de la LOS debido a un atraso en el inicio de la estación (SOS) pero principalmente a un adelantamiento del final de la estación (EOS) como respuesta a una disminución en las precipitaciones de primavera y en particular las de abril-mayo.

Resum: En un context de canvi climàtic el present treball tracta d'abordar la resposta de la vegetació a les precipitacions mitjançant l'anàlisi de l'índex de vegetació de diferència normalitzada (NDVI) i les mètriques de fenologia de superfície (LPS, Land Surface Phenology) al Parc Natural del Carrascal de la Font Roja (FR) pel període 2000-2017. Els resultats mostren una tendència positiva en els valors mitjans anuals del NDVI al període d'estudi amb un canvi negatiu a partir del 2011 com a resposta al descens de les precipitacions en aquests últims anys. La longitud mitjana de l'estació de creixement (LOS) al Parc Natural és de l'orde de 174.7 ± 21.4 dies mostrant una tendència negativa significativa al 10 %, la qual cosa indica un acurtament de la LOS degut a un retard de l'inici de l'estació (SOS) però principalment, per un avançament del final de l'estació (EOS) com a resposta d'una disminució en les precipitacions de primavera i en particular les de l'abril-maig.

Summary. In the context of climate change this work aims to analyze the vegetation response to precipitations using the normalized difference vegetation index (NDVI) and land surface phenology (LSP) metrics in the Font Roja Natural Parc (FR) over the 2000-2017 period. The results show a positive trend on mean annual NDVI values over the study period; however, a negative change is observed since 2011 as response to precipitation decrease during the last years. The mean growing season length (LOS) in the Natural Parc is about 174.7 ± 21.4 days showing a significant negative trend at 10% which indicates a shortening of the LOS due to a delay in the season start (SOS) but particularly due to earlier end of season (EOS) as a consequence of the decrease of spring precipitation and particularly April-May rainfall.

INTRODUCCIÓN

Los primeros signos de decaimiento forestal debidos a episodios anómalos de aumento en los valores medios anuales de temperaturas y sequías severas detectados en la Península Ibérica fueron en el área Mediterránea (Lloret y Siscart, 1995;

Peñuelas et al., 2001; Camarero et al., 2004). La importancia de la trayectoria y el carácter de los bosques mediterráneos radican en que son constituyentes de balances de carbono, de procesos biogeoquímicos e hidrológicos, además de las im-

plicaciones económicas y sociales. Bajo condiciones cambiantes surge la necesidad de describir las relaciones entre el comportamiento fenológico y factores medioambientales como precursores de modelos realísticos de intercambio de carbono y productividad del ecosistema. Para monitorear y cuantificar cambios en un entorno local y global a lo largo de periodos de tiempo largos, se hace necesario el uso de técnicas como la fenología de superficie terrestre (LPS: Land Surface Phenology) que permiten estudiar la variación estacional de superficies terrestres vegetadas a partir de registro temporales, índices de vegetación, por teledetección (de Beurs and Henebry 2004; Friedl et al., 2006; Morisette et al., 2008). Gracias a la resolución espacial de los sensores satélites, LPS permite trabajar con coberturas terrestre mixtas difiriendo de nociones tradicionales de la fenología vegetal que se centran más en la escala de individuo (Friedl et al., 2006). LPS monitorea eventos fenológicos como el crecimiento o la senescencia, facilitando el estudio a gran escala de la repuesta fenológica de los ecosistemas a factores climáticos (Zhang et al., 2003, Heumann et

al., 2007, Tucker et al., 2001). Las métricas de LSP se derivan de las series temporales de los índices de vegetación que son medidas del “verdor” de la superficie terrestre, una propiedad combinada de área y cantidad de clorofila en hojas así como cobertura y arquitectura del dosel. Los índices de vegetación se han desarrollado para aumentar la señal de medidas de teledetección usando ratios de diferentes bandas espectrales, comúnmente desde el visible al cercano infrarrojo del espectro electromagnético (Viña et al., 2011). Uno de los más conocidos es el NDVI. “Normalised Difference Vegetation Index” ($NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$) (Rouse et al., 1974) donde el rojo y el cercano infrarrojo son las bandas reflectantes en sus respectivas bandas electromagnéticas.

El objetivo principal de este estudio es analizar la evolución del estado de la vegetación natural en el Parque Natural del Carrascal de la Font Roja en los últimos años, concretamente desde el año 2000 a través de los índices de vegetación (NDVI) y las métricas de fenología de la superficie (métricas LSP) en relación con las precipitaciones.

MATERIALES Y MÉTODOS. ZONA DE ESTUDIO

El Parque Natural del Carrascal de la Font Roja (38°39'N, 0°32'W) fue declarado parque natural en 1987 por la Generalidad Valenciana (Fig.1). Se encuentra en la Comarca de l'Alcoià, al norte de la provincia de Alicante. Este Parque Natural es uno de los espacios naturales mejor conservados del territorio valenciano. El espacio natural protegido abarca unas 2.298 hectáreas. El rango de altitud va desde 600 a 1356 m.s.n.m. Presenta suelos calizos con arcillas impermeables. El clima es mediterráneo con influencia continental. La temperatura media anual es de 14,5 °C y la precipitación anual media es de 530 mm. El Parque Natural incluye diferentes ecosistemas, desde bosques caducifolios (con *Quercus faginea* Lam. ssp. *faginea*, *Fraxinus ornus* L., *Acer opalus* ssp. *granatense* Boiss.),

encinares (*Quercus ilex* L.), matorrales y pinares (Constán Nava et al., 2009).

Datos climáticos

Los datos climáticos provienen de la estación meteorológica más cercana al Parque Natural del Carrascal de la Font Roja (FR). Se utilizaron series mensuales de precipitación del periodo 2000-2017 de la estación meteorológica de Alcoi (38°42'N, 0°28'W) de la red de la agencia estatal de meteorología (AEMET). Los datos en el periodo 2000-2012 provienen de una base de datos preparada en un trabajo anterior (Moutahir et al., 2014). Para el periodo 2013-2017 las series han sido completadas a partir de los datos de la estación de la Penella d'Ànima de la red de estaciones

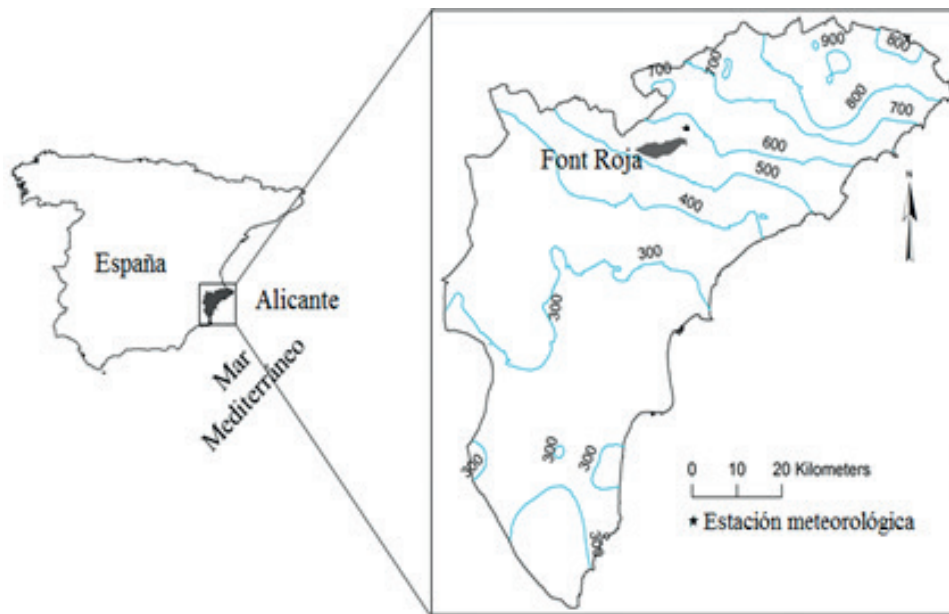


Figura 1. Ubicación del Parque Natural del Carrascal de la Font Roja. Las líneas azules representan las isoyetas de precipitación.

de la asociación valenciana de meteorología (Ava-met).

Datos de NDVI

Para la detección de las métricas de fenología se utilizaron datos del índice de vegetación NDVI del satélite MODIS de la colección 6 (MOD13Q1; Didan., 2015) del periodo 2000-2017 que provienen del centro de archivos gestionados por la NASA (Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC) managed by the NASA Earth Science Data and Information System (ESDIS) project). Se utilizó una serie de 401 imágenes MODIS-NDVI entre 2000 y 2017 que corresponden a 23 imágenes anuales de 250 m de resolución compuestas por los mejores píxeles en un intervalo de 16 días (MODIS-NDVI 16-day composites).

Detección de las métricas de LSP (LSP metrics)

Para analizar la dinámica del NDVI y de LSP dentro del Parque Natural se ha creado una rejilla una rejilla de 250m de lado a partir de una imagen de MODIS que luego ha sido recortada con el límite del parque (Fig.2). Se eliminaron los píxeles del borde para evitar el efecto borde y los píxeles que representan un porcentaje de cultivos u otro uso

del suelo que no sea vegetación natural. La rejilla obtenida ha sido convertida en una nube de 356 puntos que se utilizaron luego para extraer los valores del NDVI.

Las series de NDVI han sido procesadas mediante el paquete de R llamado "GreenBrown" para la detección de las métricas de LSP en tres pasos como está descrito en Forkel et al., (2015). El primer paso es el relleno de los huecos en las series, el segundo es el suavizado e interpolación y el tercero es la detección de los eventos fenológicos. Las tres métricas LSP que se analizan en este trabajo son: el inicio de la estación de crecimiento (SOS: Start of growing season), el final de la estación (EOS: End of season) y la longitud de la estación (LOS: length of season). La estación de crecimiento en este contexto significa la época de actividad fotosintética de la vegetación o la época de cambio del verdor en la copa de la vegetación captado desde el satélite. La estación de crecimiento en este contexto se refiere a la estación verde (Green season). El método usado para determinar los momentos de inicio y final de la estación es el método propuesto por White et al., (1997) que se basa en una transformación de la

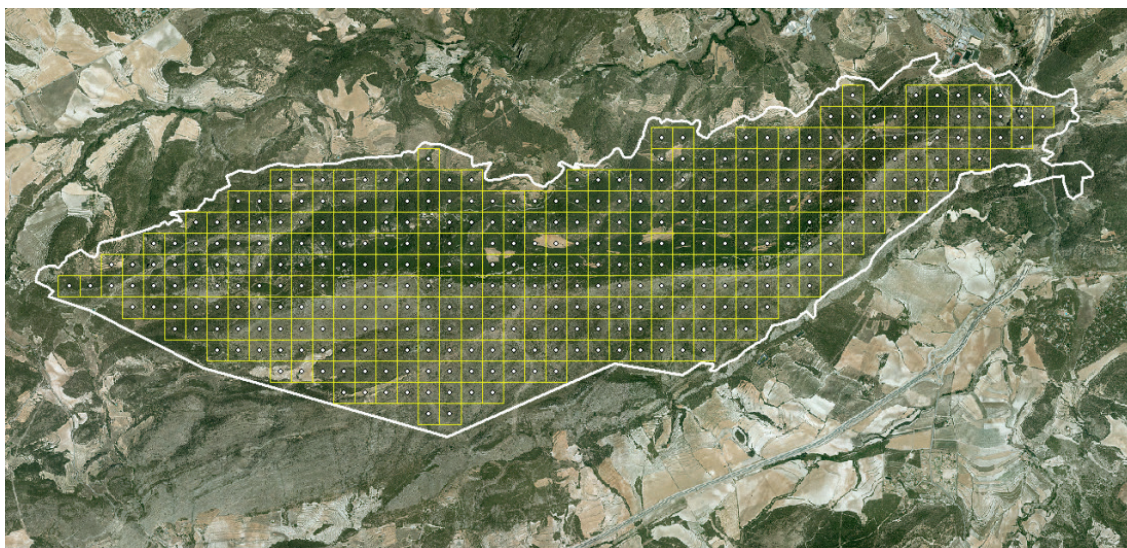


Figura 2. Representación de la rejilla obtenida a partir de los píxeles MODIS de la zona de estudio y la nube de puntos utilizados para extraer los valores del NDVI.

serie de NDVI en una serie de ratios de NDVI ($NDVI_{ratio} = (NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min})$) cuyos valores varían entre 0 y 1. El SOS y el EOS son los

momentos cuando el $NDVI_{ratio}$ supera o baja del valor 0.5 respectivamente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dinámica temporal del NDVI en el Parque Natural

Los valores promedios anuales del NDVI en el Parque Natural muestran una gran variabilidad interanual a lo largo del periodo 2000-2017 dependiendo de las condiciones climáticas (Fig. 3). Los picos del NDVI responden a las precipitaciones totales anuales dependiendo en mayor medida de las lluvias de otoño del año anterior así como de las lluvias de primavera del año en curso. Es debido al hecho de que el ciclo anual del NDVI en esta región comienza su incremento con las lluvias del inicio del otoño alcanzando su máximo en los meses de invierno y comienza a bajar hasta sus valores mínimos al final de la primavera del año siguiente como ya se había indicado en un trabajo anterior a escala de toda la provincia de Alicante (Moutahir, 2016). El desarrollo del ciclo del NDVI

entre dos años hace que el valor promedio anual dependa de las lluvias de otoño del año anterior y las lluvias de primavera del año en curso. En la figura 3 se puede observar que en el año 2007 con un total anual de lluvia importante no se observa un pico de NDVI debido a la baja cantidad de lluvias de otoño del año anterior.

La tendencia general del NDVI en el periodo 2000-2017 es positiva, sin embargo a partir de 2011 se observa una tendencia negativa que ha sido acentuada por la sequía de 2014 provocando casos de mortalidad en bosques y matorrales de la zona (Maturano et al., 2017; Ruiz-Yanetti, 2017). El cambio en la tendencia es debido a una sucesión de años que presentan precipitaciones por debajo de la media de la zona.

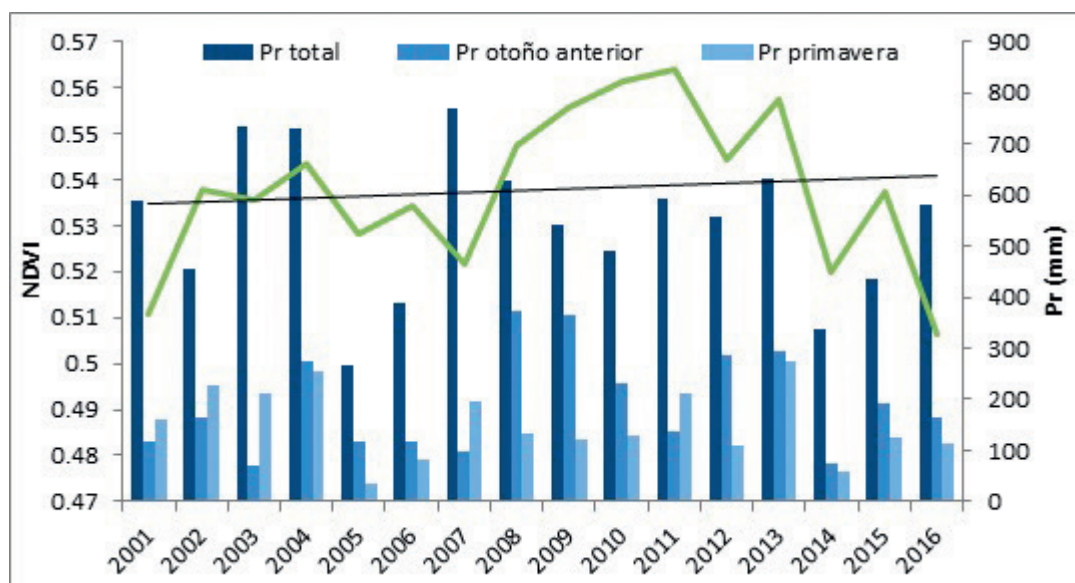


Figura 3. Dinámica interanual del NDVI, del total de precipitación, de las precipitaciones de otoño del año anterior y de las de primavera del año en curso. La línea negra muestra la tendencia del NDVI sobre el periodo 2000-2017.

Evolución de la longitud de la estación de crecimiento (LOS) en el Parque de la Font Roja

La longitud media de la estación de crecimiento (LOS) en el parque FR es del orden de 174.7 ± 21.4 días (tabla 1). Esta estación empieza a finales de septiembre (el día 271.7 ± 11.8) y acaba a finales de marzo del año siguiente (el día 81.5 ± 23.3). Estas fechas coinciden parcialmente con las observadas por Moutahir (2016) a escala de toda la provincia de Alicante. Las diferencias son debidas a la escala de observación y la ubicación geográfica, ya que los datos de la provincia de Alicante incluyen las zonas semiáridas del sur de la provincia.

La longitud de la estación (LOS) muestra una variabilidad interanual con una clara tendencia

negativa (significativa al 10%) en el periodo 2000-2017 que indica un acortamiento de la estación de crecimiento debido principalmente a un adelantamiento del final (EOS) de la estación y en segundo lugar a un atraso en el inicio de la estación (SOS) (Tabla 1, Fig. 4). La ocurrencia del SOS depende de las precipitaciones de otoño mientras que la fecha del EOS depende de las precipitaciones de primavera. El acortamiento de la estación de crecimiento como lo muestra la tendencia negativa de la LOS es debido a la tendencia negativa observada en las precipitaciones de primavera y principalmente las precipitaciones de abril-mayo (Fig. 5). Resultados parecidos han sido observados a escala de toda la provincia por Moutahir (2016).

Tabla1: Valores promedios de las métricas LSP en el Parque Natural FR y sus tendencias en el periodo 2000-2017

	SOS	EOS	LOS
Promedio (días)	271.7 ± 11.8	81.5 ± 23.3	174.7 ± 21.4
Tendencia (días/ años)	+0.4	-1.4	-1.9*

*Significativa al 10%

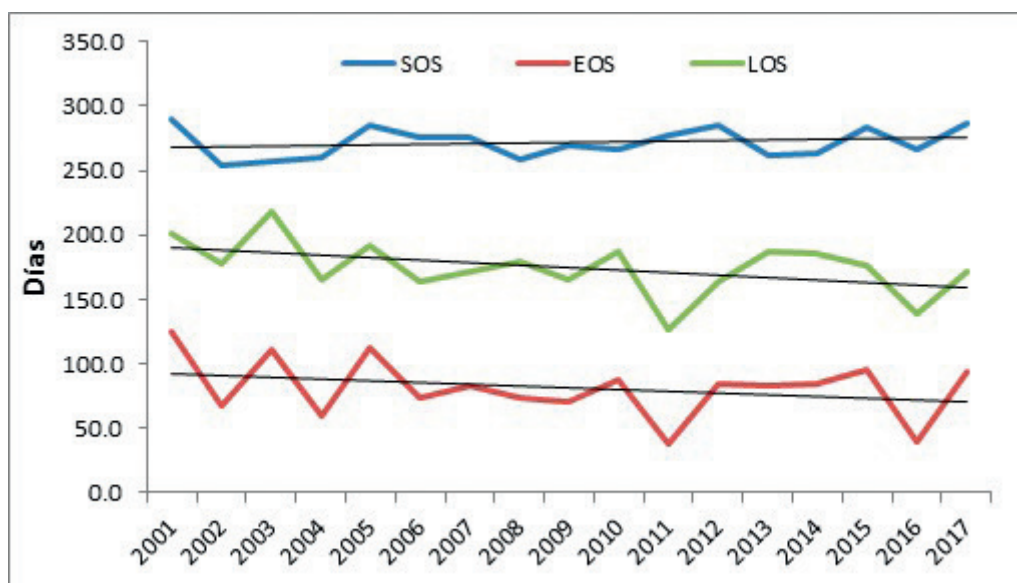


Figura 4. Tendencias en las métricas LSP en el periodo 2000-2017. Valores promedios de todo el Parque.

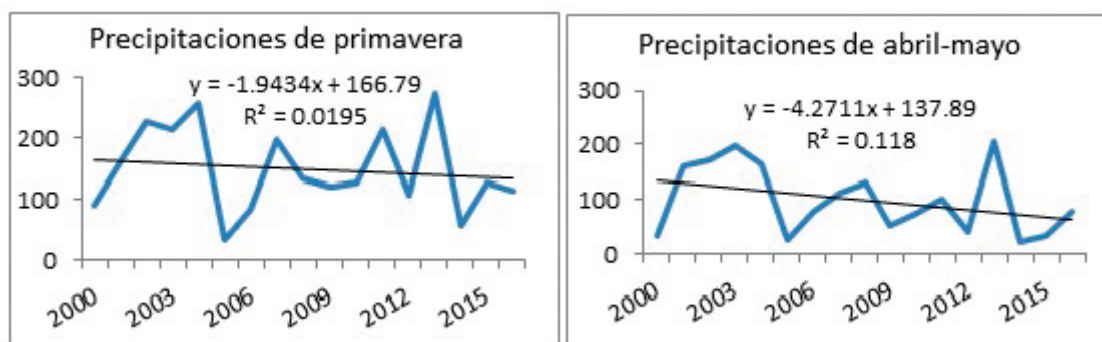


Figura 5. Tendencias de las precipitaciones de primavera (Izquierda) y de abril-mayo (derecha) en el periodo 2000-2017.

La detección de los eventos de fenología de superficie (LSP) a partir de datos de satélite es un proceso subjetivo (White et al., 1997) y depende mucho de las técnicas de procesamiento de los datos. En este trabajo se utilizó el método de ratios de NDVI usando un umbral de 0.5 (White et al., 1997); sin embargo, existen otros métodos como el usado por el programa TIMESAT (Jonsson and Eklundh 2004) que se basa en el uso de umbrales como porcentaje de la amplitud del pico de NDVI. Esta diversidad en las técnicas usadas hace que las fechas de los eventos de LSP puedan cambiar. Del mismo modo la diferencia que muestra la LSP respecto a la fenología tradicional hace que varios autores utilicen el termino estación verde (Green season) en lugar de estación de crecimiento o la nomenclatura de los eventos fenológicos

tradicionales. Eso justifica la diferencia que hay entre el inicio de la estación de crecimiento según la fenología tradicional que empieza en primavera y la estación verde detectada por la LSP que empieza a finales de otoño dependiendo del grado de verdor de la vegetación captado por los satélites en la zona de estudio.

En este trabajo solo se utilizaron datos de precipitaciones para la explicación de los cambios observados en la LSP porque en un trabajo anterior a escala de toda la provincia de Alicante se observó que el factor limitante en esta zona es el agua (Moutahir, 2016). No obstante el efecto de la temperatura quedó demostrado a través de la evapotranspiración potencial ya que el ratio Pr/ETP mostró mejores correlaciones con las métricas de LSP.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo indican que los índices de vegetación y el estudio de la fenología de la superficie (LSP) pueden ser una herramienta útil en el seguimiento del estado de la vegetación en función del clima. En el Parque Natural del Carrascal de la Font Roja se observa una tendencia negativa en la longitud de la estación de crecimiento indicando el acortamiento de la misma debido a una tendencia negativa en las precipitaciones anuales y particularmente en las lluvias de primavera. Sin embargo, estos resultados tienen que ser evaluados tomando en cuenta,

por un lado, el hecho de que los valores analizados corresponden a valores medios de todo el Parque Natural en su conjunto, lo que no refleja la diversidad de tipos de vegetación y por otro lado las limitaciones que presentan las técnicas usadas. Por último, se recomienda el uso de otras variables climáticas y topográficas en futuros trabajos tomando en cuenta la posibilidad de realizar proyecciones ya que los escenarios del cambio climático indican la misma tendencia negativa observada en las precipitaciones para la zona mediterránea.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado dentro del marco del proyecto ALTERACLIM (CGL2015-69773-C2-1) financiado por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad.

BIBLIOGRAFIA

- Camarero, J. J.; Lloret, F.; Corcuera, L.; Peñuelas, J.; Gil-Pelegrín, E.;** (2004). Cambio global y decaimiento del bosque. En: Valladares, F. (Ed.), *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, pp. 397–423.
- Constán Nava, S., Pastor Llorca, E., & Bonet Jornet, A.** (2009). Gestión de la especie invasora *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle en áreas Protegidas. Estudio de caso en el PN del Carrascal de la Font Roja (Alicante). In *Congresos Forestales*.
- De Beurs, K.M., and G.M. Henebry.** (2004). Land surface phenology, climatic variation, and institutional change: Analyzing agricultural land cover change in Kazakhstan. *Remote Sensing of Environment* 89:497-509; doi:10.1016/j.rse.2003.11.006.
- Didan, K** (2015). MOD13Q1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V006. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. <https://doi.org/10.5067/modis/mod13q1.006>
- Forkel, M., Migliavacca, M., Thonicke, K., Reichstein, M., Schaphoff, S., Weber, U., Carvalhais, N.,** (2015). Codominant water control on global interannual variability and trends in land surface phenology and greenness. *Glob Change Biol* 21, 3414–3435. doi:10.1111/gcb.12950
- Friedl MA, Henebry G, Reed B et al.** (2006) Land surface phenology: a community white paper requested by NASA. ftp://ftp.iluci.org/Land_ESDR/Phenology_Friedl_whitepaper.pdf
- Heumann, B. W., Seaquist, J. W., Eklundh, L., & Jönsson, P.** (2007). AVHRR derived phenological change in the Sahel and Soudan, Africa, 1982–2005. *Remote Sensing of Environment*, 108(4), 385-392.
- Jonsson, P., and L. Eklundh.** (2004). TIMESAT - a program for analyzing time-series of satellite sensor data. *Computers & Geosciences* 30:833-845.

- Lloret, F. Y Siscart, D.;** (1995). Los efectos demográficos de la sequía en poblaciones de encina. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales 2 77-81.
- Maturano A., Ruiz-Yanetti S., Manrique-Alba A., Moutahir H., Vilagrosa A. and Bellot J.,** (2017). May the vegetation structure explain the differences in forest mortality induced by extreme drought observed in four similar Mediterranean pine forests and shrublands?. Book of abstracts XIV MEDECOS & XIII AEET meeting. Human driven scenarios for evolutionary and ecological changes, At Seville, Spain, January 31 to February 4, 2017
- Morisette, J.T., A.D. Richardson, A.K. Knapp, J.I. Fisher, E. Graham, J. Abatzoglou, B.E. Wilson, D.D. Breshers, G.M. Henebry, J.M. Hanes, and L. Liang.** (2008). Unlocking the rhythm of the seasons in the face of global change: Challenges and opportunities for phenological research in the 21st Century. *Frontiers in Ecology and the Environment*.
- Moutahir, H., De Luis, M., Serrano-Notivoli, R., Touhami, I., & Bellot, J.** (2014). Análisis de los eventos climáticos extremos en la provincia de Alicante, sureste de España. *Cambio Climático y Cambio Global. Serie A*, (9), 457-466.
- Moutahir, H.** (2016). Likely effects of climate change on water resources and vegetation growth period in the province of Alicante, southeastern Spain. Tesis doctoral, Universidad de Alicante, 206 p.
- Peñuelas, J.; Lloret, F.; Montoya, R.** (2001). Severe drought effects on Mediterranean woody flora. *Forest Science* 47: 214–218.
- Rouse, J.W., Hass, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., (1974). Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS.** In *Proceedings Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*, Washington, DC, USA, , pp. 3010-3017.
- Tucker, C. J., Slayback, D. A., Pinzon, J. E., Los, S. O., Myneni, R. B., & Taylor, M. G.** (2001). Higher northern latitude normalized difference vegetation index and growing season trends from 1982 to 1999. *International journal of biometeorology*, 45(4), 184-190.
- Viña, A., Gitelson, A. A., Nguy-Robertson, A. L., & Peng, Y.** (2011). Comparison of different vegetation indices for the remote assessment of green leaf area index of crops. *Remote Sensing of Environment*, 115(12), 3468-3478.
- White M.A., P.E. Thornton and S.W. Running** (1997): A continental phenology model for monitoring vegetation responses to interannual climatic variability. - *Global Biogeochemical Cycles* 11, 217-234.
- Ruiz-Yanetti S.,** (2016). Respuesta a la sequía de especies y comunidades de ambientes contrastados: comparación de balances hídricos. Tesis doctoral, Universidad de Alicante, 194p.
- Zhang, X. Y., Friedl, M. A., Schaaf, C. B., Strahler, A. H., Hodges, J. C., Gao, F., Reed, B. C. & Huete, A.** (2003). Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote sensing of environment*, 84(3), 471-475.