



8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

La **Ciencia forestal** y su contribución a
los **Objetivos de Desarrollo Sostenible**



8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales

Cataluña | Catalunya - 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022

ISBN 978-84-941695-6-4

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Organiza



Desarrollo de herramientas de detección temprana de defoliación por procesionaria del pino mediante teledetección y aprendizaje computacional

GÓMEZ, C.^{1,2}, CAIZA MORALES, L.¹, SANGÜESA-BARREDA, G.¹, OLANO J.M¹. y DOMINGO, D.^{3,1}

¹ EiFAB-iuFOR Campus Universitario Duques de Soria, Universidad de Valladolid, 42004 Soria

² Dep. of Geography and Environment, School of Geoscience, University of Aberdeen, Aberdeen AB24 3UE, Scotland, UK

³ GEOFOREST-IUCA, Departamento de Geografía, Universidad de Zaragoza, Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza

Resumen

Las defoliaciones por procesionaria del pino constituyen un factor de reducción en la producción de bienes y servicios suministrados por los pinares mediterráneos. Los programas de seguimiento de procesionaria implementados por las administraciones regionales españolas proporcionan datos periódicos de infestación a escala de rodal, basados en inspección visual. Para mejorar la objetividad, el detalle espacial y la temporalidad de las evaluaciones, es necesario desarrollar herramientas automáticas de detección y diagnóstico temprano que permitan establecer medidas de control para reducir el impacto de la procesionaria.

Esta comunicación presenta algunos esfuerzos en curso para mejorar el conocimiento de los patrones de distribución de la procesionaria del pino en condiciones ambientales cambiantes—integrando bases de datos existentes de sanidad forestal y datos de teledetección—con el fin de desarrollar una herramienta de detección temprana basada en aprendizaje computacional.

Durante las últimas tres décadas $> 2 \times 10^6$ ha de pinar se han visto afectadas por procesionaria con nivel de infestación alto en España. Se ha observado que las temperaturas máximas, el gradiente altitudinal por especie, la infestación acumulada y la heterogeneidad estructural proporcionan información relevante sobre la vulnerabilidad ante infestación. Además, nuestros análisis indican la capacidad de las series temporales densas de datos Sentinel-2 para identificar anomalías fenológicas asociadas a defoliaciones por procesionaria. Todo ello contribuye a incrementar el conocimiento del impacto de la procesionaria del pino en bosques españoles, así como a la mejora de los sistemas de prevención de daños forestales.

Palabras clave

Espectrofenología, plagas, *Thaumetopoea pityocampa*, vulnerabilidad.

1. Introducción

Las poblaciones endémicas de procesionaria del pino (*Thaumetopoea pityocampa* Dennis & Schiff) juegan un papel importante en los bosques de coníferas a través de la polinización y el reciclado de nutrientes, integrándose en las cadenas tróficas. Sin embargo, los brotes ocasionales de procesionaria pueden desencadenar daños importantes en los bosques de coníferas—reduciendo el crecimiento de los árboles afectados e incluso llegando a provocar su muerte— lo que puede afectar al estado sanitario global y a la provisión de servicios ecosistémicos.

El desarrollo y declive de las poblaciones de procesionaria del pino están regulados por condiciones ambientales (Bale et al. 2002) como el régimen de temperaturas, la precipitación y la radiación solar incidente, y por sus interacciones con otras especies (Bernays 1992). La estructura forestal, especialmente la densidad y la edad de las masas, son también factores importantes para el

desarrollo de las poblaciones de procesionaria (Régolini et al., 2014), que de forma natural siguen ciclos de 5-9 años, aumentando el número de individuos en condiciones de bondad ambiental hasta llegar a un máximo y colapsar por explotación del hospedante o por influencia de eventos meteorológicos extremos. Favorecida por las condiciones climáticas y la acción del hombre mediante plantación de especies sensibles como el pino laricio (Montero 1999), la procesionaria del pino ha extendido su distribución hasta llegar a ser considerada la plaga defoliadora de coníferas más importante del área mediterránea (Montoya and Hernández 1998; Devkota and Schmidt, 1990; Masutti and Battisti, 1990). En España, más de 500.000 ha son defoliadas anualmente (Montoya Moreno et al. 2020) por las larvas de procesionaria en el periodo invernal, alimentándose durante el crepúsculo y la noche en condiciones normales. De entre los pinos con distribución natural en España, las especies más afectadas son *Pinus nigra* y *P. sylvestris*, seguidas de *P. halepensis*, *P. pinaster*, y *P. pinea*. La expansión en la distribución de la procesionaria del pino está relacionada con las condiciones de temperatura que favorecen su progresión en altitud y la colonización de especies termófilas, asociada a la falta de predadores en las áreas colonizadas y la abundancia de hospedantes (Battisti et al. 2005; Roques et al. 2014).

Los servicios de sanidad forestal de las comunidades autónomas (CCAA) españolas llevan a cabo programas de seguimiento con el fin de controlar los niveles poblacionales de la procesionaria del pino. La detección y cuantificación de esta plaga se hace de forma visual, localizando bolsones en las copas de los árboles y valorando su abundancia y el nivel de defoliación en una escala con seis niveles de intensidad (0 – 5). Varias CCAA han establecido una red de rodales permanentes donde los agentes ambientales realizan valoraciones anuales, con registro y almacenamiento de datos en geodatabases. La integración de datos de seguimiento en campo con datos espacialmente completos de teledetección puede proporcionar información espacio-temporal a varias escalas espaciales y temporales. Además, el desarrollo de herramientas automáticas de seguimiento y alerta temprana puede contribuir a una gestión más eficiente de las plagas y los recursos dedicados a su control.

2. Objetivos

El objetivo de esta comunicación es presentar algunos esfuerzos en curso para mejorar el conocimiento de los patrones de distribución de la procesionaria del pino en condiciones ambientales cambiantes, integrando bases de datos de sanidad forestal y datos de teledetección mediante aprendizaje computacional, con el fin último de desarrollar una herramienta de detección temprana. Concretamente, se desarrollan tres objetivos específicos: i) analizar la distribución de la procesionaria del pino en las últimas décadas utilizando las bases de datos de los servicios de sanidad forestal; ii) estudiar los factores potenciales que determinan la vulnerabilidad de las masas forestales ante una infestación por procesionaria; iii) evaluar la espectrofenología de rodales de pino en función del grado de infestación por procesionaria mediante datos ópticos de teledetección.

3. Metodología

3.1. Análisis de las bases de datos de los programas de seguimiento

Para conocer los patrones de distribución de la procesionaria del pino en las últimas décadas se compilaron, armonizaron y analizaron las bases de datos de los programas de seguimiento de los servicios de sanidad forestal de las CCAA que disponen de ellos (Tabla 1). En total se analizaron datos sobre una superficie de más de 4×10^6 ha. Estas geodatabases se cruzaron mediante técnicas SIG con datos de distribución de especies derivados del mapa forestal español (MFE, Vallejo Bombín 2005). Los rodales de seguimiento se caracterizaron con las variables topográficas altitud y orientación, derivadas de un modelo de elevación con resolución 25 m.

Tabla 1. Programas de seguimiento de la procesionaria del pino de los servicios de sanidad forestal de las CCAA.

Región	Periodo de seguimiento	Superficie de seguimiento (ha)
Andalucía	1992-2020	777.654
Zaragoza	2001-2020	136.064
Teruel	1972-2011	12.841
Baleares	2013-2020	55.195
Cantabria	2007-2020	17.225
Castilla La Mancha	2008-2020	1.296.212
Cataluña	2007-2020	571.423
Extremadura	2009-2020	145.402
Madrid	1990-2020	64.490
Navarra	1994-2020	11.096
Comunidad Valenciana	1996-2020	490.526

3.2. Identificación de factores de vulnerabilidad

Para determinar los factores climáticos, ambientales y estructurales que predisponen una mayor vulnerabilidad de los pinares a la infestación por procesionaria, se realizó un estudio exploratorio en la Serranía de Cuenca con datos de 2017, año con registros de elevada infestación. En esta zona de estudio los pinares están dominados por *P. nigra* (con algo más de la mitad de la superficie), *P. halepensis* y *P. pinaster*. El régimen climático se caracterizó mediante las temperaturas mínimas y máximas mensuales y las precipitaciones anuales acumuladas, información derivada de la base de datos climática CHELSA (Karger et al. 2018) con resolución espacial de 1 km. Entre las condiciones ambientales del área de estudio, la radiación solar mensual, la altitud y la orientación se derivaron de un modelo digital de elevaciones propio creado a partir de datos de la segunda cobertura del LiDAR-PNOA (2017) mediante técnicas SIG. La estructura forestal se caracterizó mediante la altura media, la cobertura arbórea total y la cobertura incluyendo el estrato arbustivo y arbóreo, así como varios índices de diversidad estructural (LiDAR Height Diversity Index, LiDAR Height Evenness Index (Listopad et al., 2015) y Rumple (Kane et al., 2010)), a través de métricas derivadas de los datos LiDAR-PNOA (2017). Todas las variables ambientales y estructurales se evaluaron con resolución espacial de 10 m. El nivel de propensión se consideró mediante la variable *infestación acumulada total*, suma de los niveles de infestación en el periodo completo de seguimiento de Castilla-La Mancha en la zona (2009-2017). A partir de las variables climáticas, ambientales y estructurales se realizó un análisis gráfico en relación a los distintos niveles de infestación por procesionaria observados en campo.

3.3. Espectrofenología

Mediante series temporales densas de datos ópticos del programa Sentinel-2 se exploró y caracterizó el comportamiento espectrofenológico de rodales categorizados por su nivel de propensión a la infestación por procesionaria del pino. El nivel de propensión se consideró mediante la variable *infestación acumulada*, suma de los niveles de infestación en el periodo 2017-2020, categorizado en cuatro niveles (cero, bajo, medio, alto). Se utilizaron datos corregidos atmosférica y geométricamente del periodo enero de 2018 - marzo de 2021 (> 200 imágenes) sobre los pinares de la provincia de Cuenca (tesela Sentinel-2 30TWK), para analizar la espectrofenología de tres anualidades. Concretamente, se analizaron los parámetros *inicio de estación* (SOS por sus siglas en inglés), *fin de estación* (EOS), *duración* y *momento de pico máximo* (Figura 1) utilizando el software TIMESAT implementado en Matlab (Elkhund and Jönsson 2004). Para identificar los patrones

espectrofenológicos, las anomalías, y el desempeño de varios índices de vegetación, se generaron series de NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), EVI (Enhanced Vegetation Index), NBR (Normalized Burn Ratio), NDII (Normalized Difference Infrared Index) y de la banda del infrarrojo de onda corta (NIR). Finalmente, se identificó si existían diferencias significativas de los parámetros espectrofenológicos entre niveles de infestación mediante comparación estadística, para lo cual se utilizó el test Kruskal Wallis.

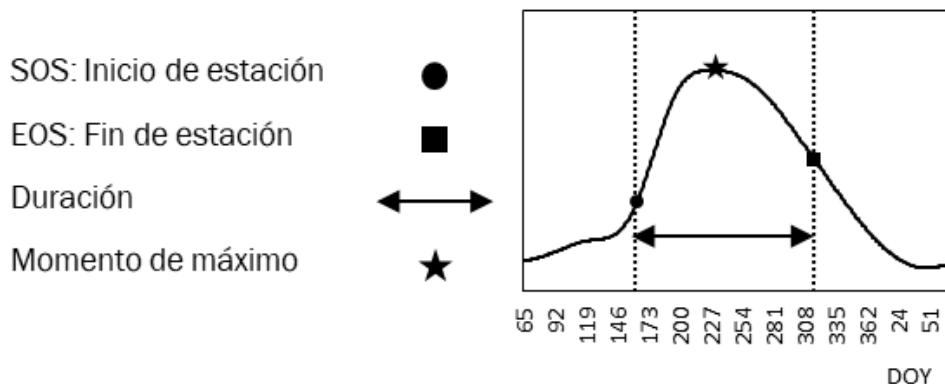


Figura 1. Esquema de definición de parámetros espectrofenológico.

4. Resultados

4.1. Evolución temporal de infestación por procesionaria a partir de geodatabases

La superficie evaluada por los programas de seguimiento de las CCAA ha variado a lo largo del tiempo, incrementando desde 21.427 ha en 1990 hasta un máximo de 2.944.484 ha en 2020. La CCAA con mayor superficie bajo vigilancia permanente es Castilla-La Mancha, seguida de Andalucía y Comunidad Valenciana; estas dos últimas, junto con Madrid y Aragón, atesoran en torno a tres décadas de datos de observación en campo. La superficie de seguimiento por CCAA se muestra en la Figura 2a. La proporción de superficie afectada en cada nivel de infestación (0 - 5), relativa a la superficie total muestreada, se muestra en la Figura 2b. Más del 70% de la superficie muestreada se ha mantenido a lo largo del periodo de seguimiento considerado (1990-2020) en niveles de infestación bajos (0 - 2). Además, se observa la aparición de brotes de infestación cíclicos, con máximos de superficie afectada por nivel de infestación alto (3 - 5) en los años 1991, 1997, 2007 y 2016 y una persistencia notable en el periodo 2015-2018.

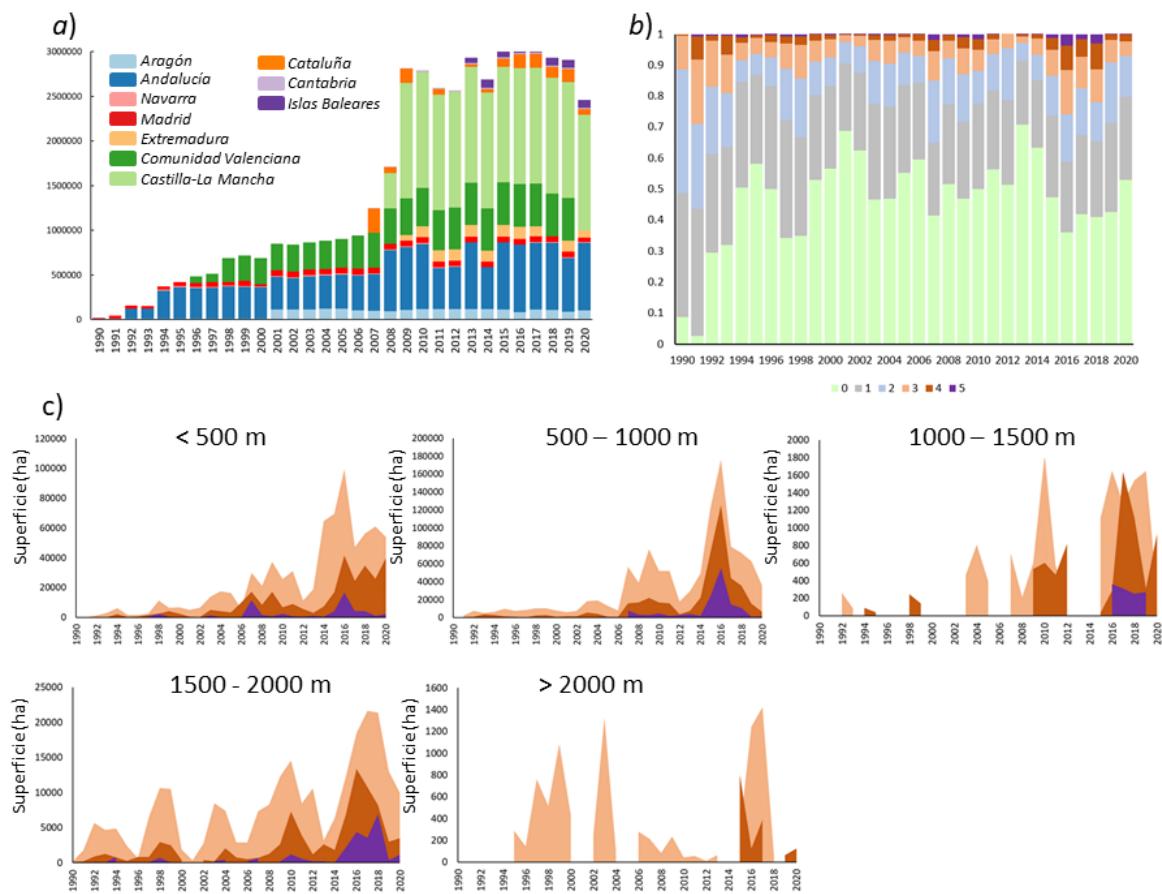


Figura 2. Tres décadas de evolución en la superficie de seguimiento de la procesionaria del pino en pinares españoles. a) Superficie de seguimiento por CCAA; (b) proporción de superficie vigilada por niveles de infestación; c) evolución de niveles altos de infestación por rango de altitud.

Por rangos de altitud, se observa que por encima de 2000 m el nivel de infestación raramente supera el nivel 3 hasta 2015, cuando por primera vez se manifestó de forma extensa (~800 ha) el nivel 4 en pinares de Sierra Nevada. En el rango 1500-2000 m es donde más claramente se aprecian los brotes cíclicos de niveles de infestación alto (3-5), con periodos de 6-8 años. En los dos rangos de altitud por debajo de 1000 m el patrón temporal es similar, destacando el pico de 2016. En el rango de altitud 1000-1500m alternan períodos de 3 - 5 años con persistencia de niveles de infestación alta con otros períodos sin infestación de nivel alto. Estos patrones de distribución altitudinal observados a escala generalizada merecen un análisis espacial y temporal más detallado, teniendo en cuenta la especie afectada.

4.2. Análisis de vulnerabilidad

El análisis de los factores climáticos, ambientales y estructurales que predisponen a una mayor vulnerabilidad de infestación por procesionaria en los pinares de la Serranía de Cuenca ha demostrado que existe una relación positiva de la vulnerabilidad con la altitud—a mayor altitud mayor vulnerabilidad—posiblemente relacionada con la localización de las especies dentro o fuera de su rango de aptitud (Figura 3). También se identificó la relación positiva con la *infestación acumulada total* indicando que existen rodales que son afectados de forma continua o cíclica a lo largo del tiempo. Se observa también relación negativa de la vulnerabilidad con la temperatura media máxima

en el mes de julio y con la diversidad estructural, o sea que los rodales con mayor heterogeneidad de estratos son potencialmente menos vulnerables a la afección. Es destacable que en rodales que presentan temperaturas próximas al umbral de los 32 grados, considerado letal para la procesionaria del pino (Romanyk y Cadahia, 1981), no se detectó infestación en los rodales de seguimiento durante el periodo 2008-2020.

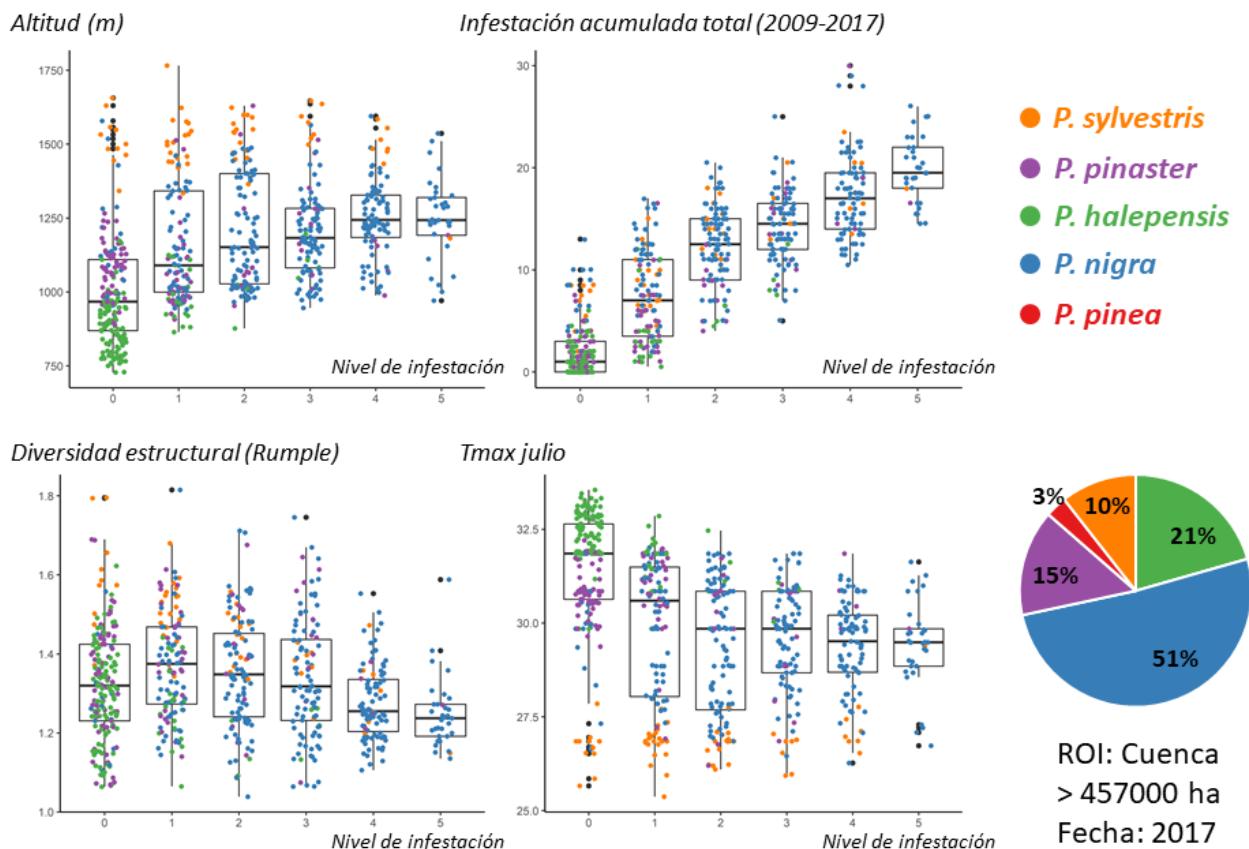


Figura 3. Selección de variables ambientales, climáticas y estructurales y sus relaciones con los niveles de infestación por procesionaria en la Serranía de Cuenca en 2017.

4.3. Espectrofenología de rodales afectados por procesionaria

El índice EVI mostró las curvas medias con patrones más diferenciados por grupo de *infestación acumulada*, con una divergencia clara entre infestación cero (rodales no afectados) y el resto (rodales afectados por procesionaria). Sin embargo, al analizar los parámetros SOS y EOS, el índice NDVI presentó las mayores diferencias entre niveles de infestación, con un claro gradiente de valores (Figura 4a, b). Los rodales con mayor nivel de *infestación acumulada* son los que inician antes su temporada espectrofenológica y la terminan más tarde, posiblemente en respuesta a la defoliación previa. Los índices NBR y NDII no mostraron diferencias claras entre grupos de *infestación acumulada* al analizar los parámetros SOS y EOS.

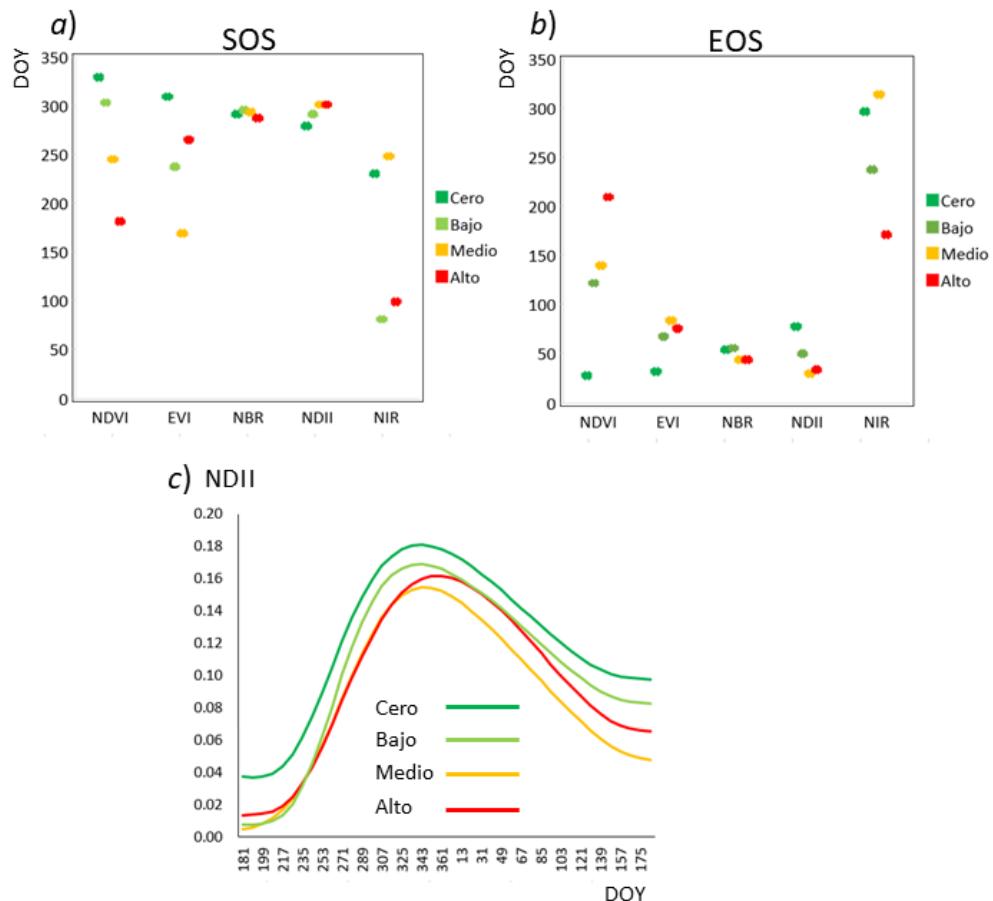


Figura 4. Representación de la Espectrofenología Sentinel-2 en rodales con distinto nivel de infestación por procesionaria del pino. A) SOS de diversos índices espectrales; B) EOS de diversos índices espectrales; C) Curvas medias NDII ajustadas con modelo logístico para el año 2018 de los grupos de infestación acumulada.

La Figura 4c representa las curvas NDII medias para el año 2018 por categoría de *infestación acumulada*. Se observa un patrón claro de gradación en las curvas por niveles de infestación acumulada, con valores de NDII menores para niveles de mayor infestación. Además, también se observa un desplazamiento del inicio y fin de estación. A pesar de ello, el índice presenta un comportamiento anómalo para el nivel de infestación alto. Esta anomalía es posiblemente debida a factores adicionales no considerados en este análisis, como la especie y la altitud. El índice EVI también mostró curvas medias con patrones diferenciados entre infestación cero (rodales no afectados) y el resto (rodales afectados por procesionaria). Otros índices no mostraron curvas medias con estacionalidad clara o distintiva entre grupos de infestación por procesionaria, posiblemente al estar afectadas por otros factores no considerados en este estudio.

5. Discusión

El desarrollo de herramientas de detección temprana de plagas y enfermedades forestales requiere conocer la biología del patógeno y del huésped (Rullán et al., 2013), además de las condiciones que predisponen a las masas forestales a ser vulnerables. En el caso de la procesionaria del pino, tanto la biología de especies de pino como los factores de vulnerabilidad han sido previamente estudiados en algunas zonas de España a pequeña escala, proporcionando un conocimiento importante de las

interacciones de la procesionaria con el medio. En este trabajo se utilizaron técnicas de SIG y teledetección para sistematizar un análisis robusto, repetible y extensible a los más de seis millones de hectáreas de pinar que existen actualmente en España y que proporcione resultados contrastables. Este análisis ha permitido comprobar en una zona concreta (la Serranía de Cuenca) que la altitud y la temperatura media máxima de julio son factores que predisponen a la afección por procesionaria. Los valores umbral de los factores influyentes pueden variar entre regiones, y por ello es necesario extender la metodología de análisis a otras regiones dominadas por diferentes especies de pino y donde las condiciones estructurales y ambientales sean diferentes. Para sistematizar dicho análisis y obtener conclusiones relevantes se requiere la aplicación en unidades espaciales con sentido biológico, como por ejemplo las biorregiones (Rivas-Martínez et al. 1987).

Los patrones espacio temporales de afección por la plaga endémica de procesionaria facilitan la caracterización de sus brotes, la evolución y ciclicidad en condiciones cambiantes, que pueden ayudar a predecir su comportamiento futuro. Los datos de seguimiento en campo adquiridos durante décadas por las CCAA, tratados de forma armonizada y comparable, constituyen una fuente única de información espacio temporal para el análisis de los patrones de ocurrencia. Estos datos adquiridos anualmente se atribuyen a rodales de tamaño irregular, limitando el detalle espacial de los patrones de afección y las condiciones de propensión. Algunas técnicas de teledetección utilizando datos de media resolución espacial (i.e. 10-30 m) permiten identificar defoliaciones y discernir entre grados de intensidad (Eklundh et al. 2009). Además, los archivos históricos de datos, entre los cuales destaca el de Landsat por su continuidad y coherencia durante más de cuatro décadas (Wulder et al. 2019) permiten modelizar y cartografiar eventos y procesos de cambio de forma retrospectiva (Gómez et al. 2011). Una serie anual de mapas de afección por procesionaria con datos de teledetección, puede contribuir a mejorar el conocimiento detallado de los patrones de ocurrencia de la procesionaria del pino.

La espectrofenología o respuesta espectral de la vegetación a lo largo del año es indicadora de las condiciones ambientales y del estado de desarrollo y vigor de las especies vegetales. Conociendo los patrones espectrofenológicos locales típicos se pueden identificar anomalías y tendencias, que, si no corresponden con eventos meteorológicos o clima cambiante, pueden ser atribuidos a cambios estructurales o fisiológicos de la vegetación. De forma local se estudió en la Serranía de Cuenca el comportamiento espectral de los pinares afectados y no afectados por procesionaria, obteniendo algunas conclusiones relevantes y dejando otros puntos de incertidumbre que deben ser estudiados en mayor profundidad. El análisis de varios índices de vegetación reveló el comportamiento más claro y diferenciado entre grupos de afección del NDVI, con un claro gradiente en los parámetros de SOS y EOS. No fue tan claro el desempeño de otros índices como EVI, NBR o NDII, seguramente indicadores de otros factores no considerados en este trabajo.

Para mejorar el conocimiento de la procesionaria del pino y sus patrones de afección en pinares españoles, nuestros esfuerzos a corto plazo incluirán el estudio de la capacidad de los datos ópticos de Sentinel-2 y Landsat en la identificación de niveles de defoliación. Se aplicarán métodos de clasificación supervisada de datos multitemporales mediante aprendizaje computacional. Gracias a un conjunto de muestras de campo dendrocronológicas adquiridas recientemente, y que registran crecimientos y anomalías de toda la vida de los árboles, las clasificaciones se extenderán temporalmente para obtener cartografía histórica y patrones de cambio, previsiblemente mejorando el nivel de detalle espacio-temporal proporcionado por los rodales de seguimiento de los servicios de sanidad forestal. El conocimiento de los factores de vulnerabilidad climática, ambiental y de

composición estructural y diversidad arbórea, así como el comportamiento espectrofenológico facilitará el desarrollo de herramientas de detección temprana de la infestación por procesionaria del pino mediante aprendizaje computacional alimentado por datos de observación satelital, muestras dendrocronológicas, cartografía de vulnerabilidad y datos climáticos a tiempo cuasi-real.

6. Conclusiones

El trabajo de seguimiento de los servicios de sanidad forestal de las CCAA llevado a cabo durante las últimas décadas constituye una fuente de información y contraste valiosa para conocer el comportamiento y evolución de las poblaciones de procesionaria del pino. La integración de estas bases de datos de campo con datos de observación remota permite inferir conocimiento de procesos ambientales y ecológicos a diversas escalas espacio-temporales, como por ejemplo la expansión de la procesionaria del pino y su adaptación a las condiciones climáticas cambiantes.

7. Agradecimientos

Agradecemos a las Administraciones españolas que mantienen los programas de seguimiento de la procesionaria del pino y que nos suministraron las bases de datos (Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible de la Junta de Andalucía; Servicio de Planificación y Gestión Forestal. Departamento de Agricultura, Ganadería y Medio Ambiente de Aragón; Conselleria d'Agricultura, Medi Ambient i Territori, Direcció General de Medi Natural, Educació Ambiental i Canvi Climàtic de Islas Baleares; Sección de Sanidad y Mejora Forestal, Dirección General de Biodiversidad, Medio Ambiente y Cambio Climático de Cantabria; Servicio Forestal, Dirección General de Medio Natural y Biodiversidad, Consejería de Desarrollo Sostenible de Castilla-La Mancha; Servicio de Defensa del Medio Natural, Consejería de Fomento y Medio Ambiente, Dirección General de Patrimonio Natural y Política Forestal de Castilla y León; Servei de Gestió Forestal, Direcció General d'Ecosistemes Forestals i Gestió del Medi, Dept. d'Agricultura, Ramaderia, Pesca i Alimentació de Cataluña; Servicio de Ordenación y Gestión Forestal, Dirección General de Política Forestal, Consejería de Agricultura, Desarrollo Rural, Población y Territorio de Extremadura; Sección de Defensa Fitosanitaria, Subdirección General de Recursos Naturales, Dirección General de Recursos Naturales y Sostenibilidad, Consejería de Medio Ambiente, Ordenación del Territorio y Sostenibilidad de Madrid; Unidad de Salud de los Bosques, Dirección General de Medio Natural de Murcia; Sanidad Forestal, Área de Gestión Forestal y Proyectos de Navarra; DDF de Álava y Gipuzkoa de País Vasco; Servicio de Ordenación y Gestión Forestal de la Comunidad Valenciana). Este trabajo ha contado para su realización con la financiación de los proyectos OUTBREAK (VA171P20) de la Junta de Castilla y León, y PROWARM (PID2020-118444GA-I00) del Ministerio de Economía y Competitividad, así como con financiación NextGenerationEU de la Unión Europea.

8. Bibliografía

- BERNAYS, EA 1992. Interaction of insects and plants. *Science Progress* 76, 247-271
- BALE. 2002 Herbivory in global climate change research: direct effects of rising temperature on insect herbivores. *Global Change Biology* 8, 1-16
- BATTISTI, A., STASTNY, M., NETHERER, S., ROBINET, C., SCHOPF, A., ROQUES, A., & LARSSON, S. 2005. Expansion of geographic range in the pine processionary moth caused by increased winter temperatures. *Ecological Applications*, 15, 2084–2096.

- DEVKOTA, B., SCHMIDT, G.H., 1990. Larval development of *Thaumetopoea pityocampa* (Den. and Schiff.) (Lepidoptera: Thaumetopoeidae) from Greece as influenced by different host plants under laboratory conditions. *Journal of Applied Entomology* 109, 321–330
- EKLUNDH, L., JÖNSSON, P. 2004. TIMESAT—a program for analyzing time-series of satellite sensor data. *Computers & Geosciences* 30(8), 833-845
- EKLUNDH, L., JOHANSSON, T., SOLBERG, S. 2009. Mapping insect defoliation in Scots pine with MODIS time-series data. *Remote Sensing of Environment*, 113, 1566–1573.
- GÓMEZ, C., WHITE, J.C., WULDER, M.A. 2011. Characterizing the state and processes of change in a dynamic forest environment using hierarchical spatio-temporal segmentation. *Remote Sensing of Environment* 115(7), 1665–1679.
- KANE, V. R., BAKKER, J. D., MCGAUGHEY, R. J., Lutz, J. A., GERSONDE, R. F., & FRANKLIN, J. F. (2010). Examining conifer canopy structural complexity across forest ages and elevations with LiDAR data. *Canadian Journal of Forest Research*, 40(4), 774–787. <https://doi.org/10.1139/X10-064>
- KARGER, D.N., CONRAD, O., BÖHNER, J., KAWOHL, T., KREFT, H., SORIA-AUZA, R.W., ZIMMERMANN, N.E, LINDER, H.P., KESSLER, M. 2018. Data from: Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *Dryad Digital Repository*. <http://dx.doi.org/doi:10.5061/dryad.kd1d4>
- LISTOPAD, C. M. C. S., MASTERS, R. E., DRAKE, J., WEISHAMPEL, J., & BRANQUINHO, C. 2015. Structural diversity indices based on airborne LiDAR as ecological indicators for managing highly dynamic landscapes. *Ecological Indicators*, 57, 268–279. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.04.017>
- MASUTTI, L., BATTISTI, A., 1990. *Thaumetopoea pityocampa* (Den. and Schiff.) in Italy. Bionomics and perspectives of integrated control. *J. Appl. Entomol.* 110, 229–234
- MONTERO, G. 1999. Breve descripción del proceso repoblador en España (1940-1995). CIFOR-INIA, Madrid
- MONTOYA R., HERNÁNDEZ R. 1998 La procesionaria del pino. In: *Plagas de Insectos en las Masas Forestales Españolas*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid, pp. 67–84.
- MONTOYA MORENO, R., HERNÁNDEZ ALONSO, R., PÉREZ FORTEA, V. Y MARTÍN BERNAL, E., 2020. Procesionaria del Pino, Gobierno de Aragón: Servicio de Estudios, Coordinación y Defensa Contra Incendios Forestales.
- ROQUES, A., et al. 2014. Climate warming and past and present distribution of the processionary moths (*Thaumetopoea* spp.) in Europe, Asia Minor and North Africa, in Editor: Roques A. *Processionary moths and climate change: an update*. Springer, 427 pp.
- RÉGOLINI, M., CASTAGNEYROL, B., DULAURENT-MERCADAL, A. M., PIOU, D., SAMALENS, J. C., & JACTEL, H. (2014). Effect of host tree density and apprenacy on the probability of attack by the pine processionary moth. *Forest Ecology and Management*, 334, 185–192. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.08.038>

RIVAS MARTÍNEZ, S. 1987. Memoria del mapa de series de vegetación de España 1: 400.000. ICONA. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid. 268 pp. ISBN 84-85496-25-6

ROMANYK, N. & CADAHIA, D. 1981. Plagas de insectos en las masas forestales españolas. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. 272 pp. Madrid.

RULLAN-SILVA, C.D., OLTHOFF, A.E., DELGADO DE LA MATA, J.A., PAJARES ALONSO, J.A. 2013. Remote monitoring of forest insect defoliation. A review. *Forest Systems*, 22(3), 377–391.

TAMBURINI, G., MARINI, L., HELLRIGL, K., SALVADORI, C., & BATTISTI, A. (2013). Effects of climate and density-dependent factors on population dynamics of the pine processionary moth in the Southern Alps. *Climatic Change*, 121(4), 701–712. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0966-2>

VALLEJO-BOMBÍN R., 2005. El mapa forestal de España escala 1:50.000 (MFE50) como base del tercer inventario forestal nacional. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales* 19, 205–210. [https://doi.org/https://doi.org/10.31167/csef.v0i19.9507](https://doi.org/10.31167/csef.v0i19.9507)

WULDER M., LOVELAND, T.R., ROY D.P., CRAWFORD, D.J. ET AL. 2019. Current status of Landsat program, science, and applications. *Remote Sensing of Environment*, 225, 127–147.