



2025 | **16-20**
GIJÓN | JUNIO

9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

9CFE-1420

Actas del Noveno Congreso Forestal Español
Edita: **Sociedad Española de Ciencias Forestales. 2025.**
ISBN: **978-84-941695-7-1**

Organiza



Avances en la optimización y visualización cartográfica de los modelos predictivos de la defoliación. Aplicación con dos agentes de alto impacto en España.

MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ, J. (1), ALBERDI, I. (1), CAÑELLAS, I. (1), MONTES, F. (1), MORENO-FERNÁNDEZ, D. (1), SUÁREZ, S. (1), ADAME, P. (1)

(1) Instituto de Ciencias Forestales (ICIFOR-INIA), CSIC. Carretera de la Coruña km 7.5. Madrid 28040.

Resumen

Los Inventarios de Daños Forestales son una de las principales fuentes de datos que se pueden utilizar para elaborar mapas de daños forestales a escala nacional. Estos inventarios se realizan en España anualmente en las Redes de Seguimiento, en concreto en las parcelas de la Red Europea de Nivel I (malla de 16x16 km), pero también en las Redes Autonómicas y de Parques Nacionales (malla de 8x8 o de 4x4 km).

En este trabajo se recopila y se pone en valor los trabajos ya realizados para dos agentes bióticos de alto impacto en los que se interpolan los valores de las parcelas a todo el territorio usando modelos geoestadísticos con variables predictoras de carácter forestal, climático y geográfico. Los dos agentes de daño son el gorgojo en eucaliptos (insecto defoliador), y el muérdago (planta parasita).

El objetivo es facilitar la accesibilidad y divulgación de toda esta información, presentando y describiendo un visualizador web que aglutine dicha cartografía, y que en el futuro pueda incorporar más agentes y/o especies. Debido a la dimensión temporal de los datos (2005-2020) se incluyen en la aplicación herramientas que permiten visualizar de forma adecuada su evolución.

Palabras clave

Daño forestal, visualizador cartográfico, modelo geoestadístico, *Gonipterus platensis*, *Viscum album*.

1. Introducción

La defoliación es uno de los principales indicadores de estrés y deterioro en los ecosistemas forestales, con consecuencias significativas tanto ecológicas como económicas. Este fenómeno afecta la vitalidad de los bosques y su biodiversidad, alterando su capacidad de captura de carbono y de ofrecer servicios ecosistémicos (Dobbertin, 2005; Jactel et al., 2009), y reduciendo su productividad, ya que disminuye el crecimiento y la calidad de la madera y de otros productos, con impactos económicos directos especialmente en la industria forestal (Adame et al., 2022 a). La defoliación puede ser originada por una amplia variedad de factores bióticos y abióticos, frecuentemente interrelacionados. Entre los agentes bióticos (Boyd et al., 2013) se encuentran plagas de insectos o patógenos como microorganismos y hongos que causan

enfermedades, así como plantas parásitas. Por otro lado, los factores abióticos incluyen condiciones climáticas extremas, como sequías prolongadas, heladas, tormentas intensas, contaminación atmosférica, entre otros, que pueden debilitar a los árboles y hacerlos más susceptibles a los agentes bióticos (Allen et al., 2010). La interacción entre ambos tipos de factores suele amplificar el daño (Seidl et al., 2017).

La monitorización a largo plazo de este tipo de daños y del estado fitosanitario se realiza en nuestro país a partir de la medición sistemática y anual de parcelas de seguimiento repartidas a lo largo del territorio, empleando métodos y protocolos establecidos por la Red europea de ICP Forests formada por expertos nacionales. Se evalúan así el estado de las copas midiendo parámetros como la defoliación, transparencia y decoloración etc., y se identifica el agente causal, la superficie afectada y la intensidad. En España existen tres tipos de redes de daños; la parcelas de la Red Europea ICP-Forests de Nivel I (localizados a lo largo de una malla de 16x16 km) y las de las Redes Autonómicas y de Parques Nacionales (malla de 8x8 o de 4x4 km). En 2021 se realizó la integración de esta información de forma armonizada en una red (Adame et al., 2022 b) que, englobada, abarca un total de 3437 parcelas y recopila datos desde 1986 hasta la actualidad.

A nivel nacional, el conjunto de los datos anuales de las parcelas ICP-Forest en España conforma el denominado Inventario de Daños Forestales (IDF) gestionado por Área de Inventarios y Estadísticas Forestales (AIEF) del Ministerio para la Transición Ecológica, y que elabora los informes anuales que pueden consultarse en su página web (MITECO, 2025 a). Para ilustrar estos informes de evaluación y seguimiento se representan en mapas los puntos de las parcelas de medición utilizando diferentes simbologías y/o rampas de colores en función del carácter cualitativo, ordinal o cuantitativo de la variable de interés. A nivel europeo el equivalente lo encontramos en los *Informes sobre el Estado de los Bosques en Europa* (MITECO, 2025 b).

En los últimos años se han llevado a cabo estudios publicados en revistas de investigación para optimizar y mejorar este tipo de cartografía de parcelas de inventario o redes utilizando modelos geoestadísticos predictivos, basados por ejemplo en técnicas de krigado como el ordinario o el universal (Hernández et al., 2014; Moreno-Fernández et al., 2016), para así interpolar o extrapolar la información de los puntos al resto del territorio teniendo en cuenta la autocorrelación espacial y, en el caso del krigado universal, variables auxiliares tales como temperatura, precipitación o altitud. Se consideran estos modelos “predictivos” no en el sentido habitual de predecir temporalmente la distribución futura del fenómeno, si no en el sentido de estimar la distribución en las zonas donde no se han realizado mediciones en un momento determinado. Es decir, se estiman espacialmente más allá de los puntos de muestreo. Con ello se consiguen mapas espacialmente continuos, por ejemplo, del grado de infección o de probabilidad de ocurrencia, y que abarcan toda el área de trabajo, en este caso, la totalidad de España. Esto, sin duda, tiene un gran interés para la gestión sostenible y las políticas de conservación y restauración. Además, como se dispone de datos anuales, el procedimiento se puede aplicar para diversos momentos de interés y así estudiar la evolución del fenómeno a lo largo del tiempo.

2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es destacar la relevancia de esta información y facilitar la accesibilidad y divulgación de estos mapas sobre el nivel de afectación y daño producido por agentes bióticos de defoliación con gran impacto en España a lo largo de los últimos 15 años (2005-2020) y que han sido generados para todo el territorio mediante técnicas geoestadísticas, obteniendo así una cobertura cartográfica completa dentro de las zonas forestales, sin dejar vacíos o huecos. Los dos agentes estudiados son el gorgojo (*Gonipterus* Marelli) en eucaliptos y el muérdago (L.) en pinares.

Para ello se presenta y describe un visualizador cartográfico online que incluye también la dimensión temporal y que consideramos puede ser una herramienta de gran interés y ayuda para gestores, científicos y público en general, especialmente a medida que se vayan incorporando otros agentes causantes de defoliación y/o especies afectadas.

3. Metodología

La metodología empleada para generar los modelos y los mapas se describe de forma detallada en los artículos ya publicados para cada agente biótico de daño: el gorgojo (Adame et al., 2022 a) y el muérdago (Suarez et al., 2024). Ambos tienen en común que utilizan como unidades de predicción para interpolar los centroides de los polígonos del Mapa Forestal de España (MFE) de máxima actualidad proporcionado por el MITECO, de los que se seleccionaron únicamente aquellos con presencia de las especies afectadas o de interés. En el proceso de modelización se utilizó Kigreado Universal (UK), que integra la autocorrelación espacio-temporal con una función de la media espacio-temporal que depende de las variables explicativas o variables que se van a utilizar como predictores. En una primera fase el propósito consiste en estimar los parámetros del variograma, que describe la autocorrelación de la variable en función de la distancia y el tiempo que separa las observaciones, y la función de la media, para en la segunda fase aplicar el modelo y generar los mapas de predicción del nivel de afectación o de riesgo (probabilidad). Estas variables son principalmente de carácter forestal y climático. Para el muérdago primero se utilizó Krigeado Ordinario para estimar su área de distribución, y después se aplicó el modelo de UK para predecir el grado de afección en las teselas con presencia de la especie, empleando las siguientes variables auxiliares: especie dominante en la tesela, la precipitación media anual de los 5 años anteriores y la temperatura media. Para el gorgojo se utilizó la presencia de *Eucalyptus globulus* Labill, la estructura forestal dominante (monoespecífica o mixta), la temperatura media de verano de los años anteriores, y la precipitación media de primavera del año actual.

Respecto al visualizador cartográfico éste ha sido generado en la plataforma en la nube de la Empresa ESRI conocida como ArcGIS Online o AGOL (ESRI, 2024). Para ello previamente, en el Sistema de Información Geográfica de escritorio ArcGIS Pro, hubo que reclasificar las capas originales en los 5 niveles de daño previstos (caso del muérdago) o en los 6 de probabilidad de ocurrencia (caso del gorgojo) y simplificar la geometría mediante el comando “dissolver” eliminando así límites interiores de teselas que compartían el mismo valor a representar. Tras ello se elaboraron los mapas básicos para cada combinación de año, tipo de agente y nivel de daño en su caso, y se compartieron publicándolos como servicios REST, esta vez alojados directamente en los servidores de AGOL.

Por defecto los servicios generados en ArcGIS son de tipo REST (arquitectura muy ligera, flexible y de alto rendimiento basada en HTTP) frente a otras opciones o estándares como los OGC (Open Geospatial Consortium). Dentro de estos servicios REST hemos optado en este caso por servicios cacheados, que son los que almacenan en el servidor teselas o mosaicos pre-generados para mejorar el rendimiento al cargar y visualizar los mapas en las aplicaciones web. Se trata de fragmentos pequeños de un mapa, previamente guardados en la caché para cada nivel de zoom. Con estos servicios cuando un usuario solicita el mapa, el servidor envía solo las teselas correspondientes, sin necesidad de procesar nada en tiempo real, que es lo que hacen por el contrario los servicios renderizados o dinámicos, que crean la representación visual para enviarla al cliente (navegador o aplicación) cuando este interactúa por e.j. haciendo zoom, filtros, consultas, cambio de simbología etc. Ese es el caso de los servicios de entidades que envían directamente las geometrías y atributos al cliente bajo demanda en tiempo real, por lo que para capas grandes son más lentos. Sin embargo, los servicios cacheados son apropiados para mapas base de grandes extensiones o datos que no cambian frecuentemente, y donde no es necesario que el cliente edite o modifique la simbología, o consulte los atributos, como es el caso (ESRI, 2024).

Dentro de los servicios REST cacheados hay diferentes posibilidades. Para este trabajo, al tener que publicar directamente en AGOL capas muy extensas de toda España, la opción más eficiente, escalable y ligera, y con muchísimo menor volumen de almacenamiento fueron las teselas vectoriales (*vector tile layers*) que es una tecnología de cacheado más reciente en comparación con las *raster tile layers*. La diferencia radica en que no son imágenes rasterizadas para cada nivel de zoom sino datos geométricos vectoriales comprimidos y atributos que se almacenan en el servidor sin incluir información visual preprocesada como colores y símbolos. Luego el cliente al recibir estos datos “crudos” los renderiza en tiempo real para mostrarlos en pantalla según el estilo definido.

El siguiente paso, a partir de estos servicios de teselas, consistió en la realización en AGOL de los mapas web (webmaps) para cada año y agente utilizando la herramienta “*Map Viewer*” en donde se ajustó la simbología de colores graduados, la visibilidad y nombre de las capas, la extensión inicial y los mapas base de fondo. Estos webmaps son los que se han incluido en la aplicación final que ha sido elaborada con el constructor interactivo “*Experiencie Builder*” de AGOL utilizando sus plantillas, widgets, herramientas y elementos de diseño disponibles (ESRI, 2025). El diseño se ha estructurado utilizando varios widgets de “barra lateral” que permite a los usuarios ver colecciones de información simultáneamente en paneles adyacentes y distribuir widgets de forma anidada.

Como las teselas vectoriales no pueden ser utilizadas con el widget de “línea temporal”, que solo admite servicios dinámicos o no cacheados, hemos optado por usar la combinación de los widget “sección” y “navegación por vistas” para poder así representar adecuadamente la dimensión temporal del fenómeno a lo largo de los cuatro años de referencia (2005, 2010, 2015 y 2020), cada uno incluido en una vista. Todo ello se combina con la sincronización de todos los mapas entre sí, lo que facilita la comparación espacial y temporal del fenómeno que se representa.

4. Resultados

El visualizador cartográfico puede consultarse en el siguiente enlace y código QR (Figura 1):

<https://experience.arcgis.com/experience/b710f24ee3b948aa9619f0f1097bfb6d>

Figura 1. Código QR de acceso al visualizador de defoliación

El visualizador está organizado en páginas separadas, una por cada agente causal, que se accede desde un menú de pestañas localizado en el encabezado y que es común para todas ellas. Una vez en la página de cada agente, se visualiza un contenedor con dos paneles adyacentes expandibles separados por un divisor (Figura 2). En el panel principal de la derecha, más extenso, se muestra el mapa con la distribución de las masas forestales afectadas por la defoliación, y en el panel lateral de la izquierda, más estrecho y que puede contraerse u ocultarse mediante un botón, se muestra el menú de navegación con las pestañas o botones de tiempo. Cuando el usuario selecciona uno de ellos se muestra de forma inmediata la situación en ese año, lo que permite al usuario percibir de forma adecuada, si hace zoom en una determinada localización, como ha sido la evolución. Ese efecto es aún más evidente si se lleva a cabo utilizando las flechas de desplazamiento que se encuentran en los laterales del mapa en cada vista, y que permiten hacerlo de forma consecutiva y ordenada. Es decir, pinchando en “>” se avanza hacia adelante en el tiempo y pinchando en “<” se retrocede.

En cada uno de los mapas se dispone de varias herramientas o widgets para hacer búsqueda por nombres o topónimos, localizar en la posición actual si estamos con un dispositivo con GPS, activar y desactivar capas, cambiar el mapa base por otro (por defecto aparece un mapa topográfico de fondo), hacer mediciones, zoom, ir a la vista predeterminada, navegar por extensiones y expandir a pantalla completa. Los mapas están sincronizados espacialmente para que cuando el usuario se desplace o se acerque o aleje en uno, cambie en todos los demás y se puedan comparar fácilmente.

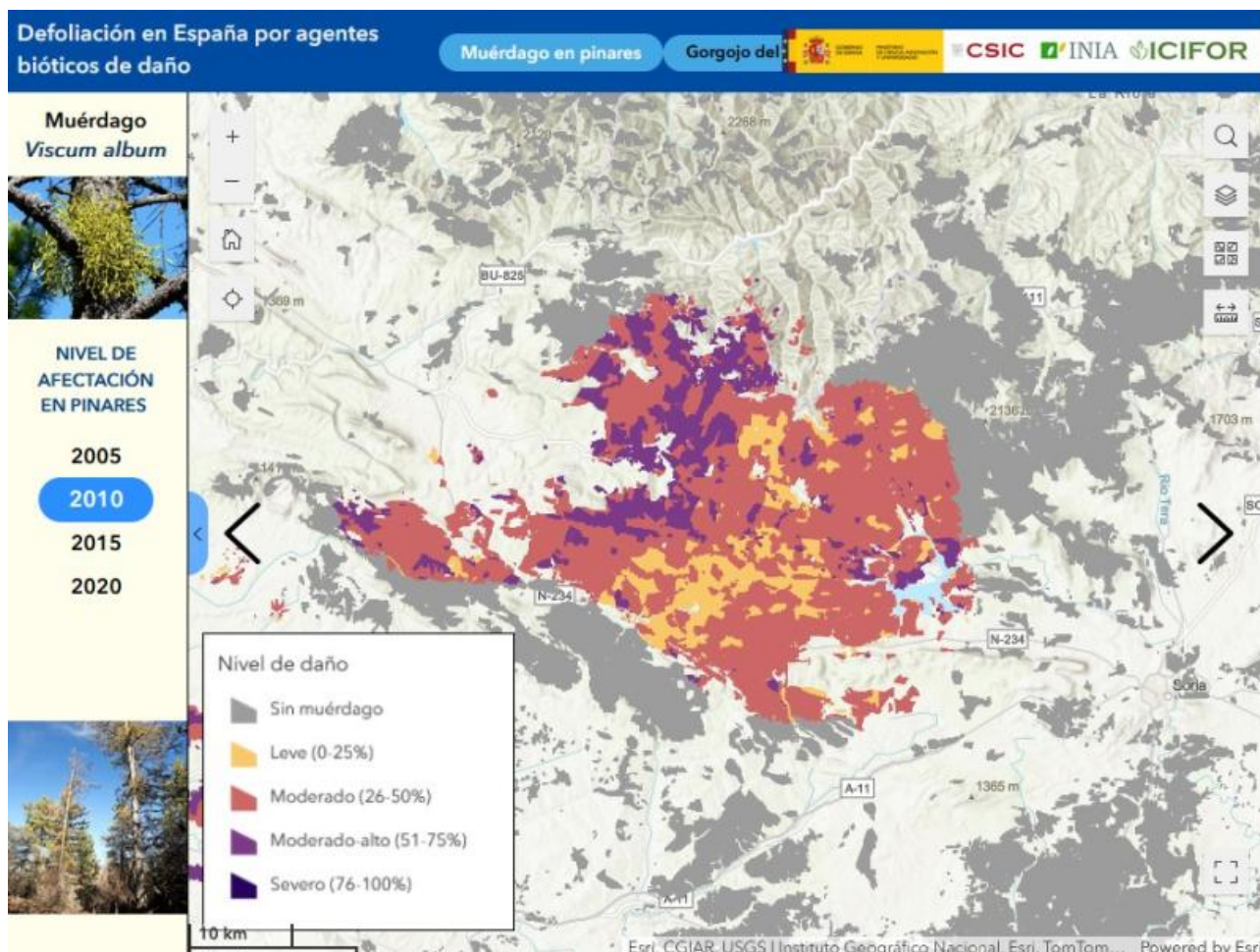


Figura 2. Diseño de la página inicial mostrando el nivel de afectación del muérdago en pinos, con los dos paneles expandibles, el menú de navegación por vistas y las flechas de desplazamiento.

En el caso del gorgojo (Figura 3) la página está organizada en tres paneles desplegable (de color verde) que se pueden expandir o contraer mediante los botones + o – según se prefiera. A la derecha de los paneles hay una barra de desplazamiento vertical. Cada panel desplegable se corresponde con un escenario de daño medio en la copa de los árboles de la tesela del mapa forestal; es decir para un daño superior a 0%, 5% o 15%. A la izquierda de cada panel se encuentra su correspondiente menú de navegación por vistas con los botones de tiempo (años) y las flechas de desplazamiento. La sincronización comparativa entre paneles funciona a nivel espacial pero no a nivel temporal. Es el usuario el que tiene que ir seleccionando los años que quiere consultar en cada escenario.



Figura 3. Diseño de la página de probabilidad de ocurrencia de daños por gorgojo en

eucalipto. Se divide en tres paneles desplegable por escenario con sus menús de navegación por vistas

5. Discusión

En el momento de la redacción de esta comunicación en el visualizador solo se incluyen dos agentes bióticos de daño finalizados (muérdago y gorgojo) pero se espera extender próximamente a otros como la procesionaria del pino (Denis & Schiffermüller, 1775). La intención es que a lo largo de los años se alberguen los agentes de mayor impacto en España y las especies forestales mas afectadas y se vaya incrementando el menú y las páginas de visualización.

Esta aplicación, aunque puede consultarse desde teléfonos móviles, está diseñada actualmente para visualizarse principalmente en pantallas grandes o medianas (ordenadores y tabletas). Más adelante se pretende realizar una versión optimizada para estas pantallas de móvil más pequeñas, y que se cargará de forma automática siempre y cuando la app se consulte desde uno de estos dispositivos.

6. Conclusiones

Las técnicas geoestadísticas utilizadas para obtener cartografía continua y su integración en un visualizador web son herramientas de gran utilidad para los gestores y científicos que permiten monitorizar de forma más adecuada el estado fitosanitario de los ecosistemas forestales y el seguimiento de la propagación y de la dinámica espacio-temporal de los agentes de defoliación y su nivel de impacto. Pueden jugar, por tanto, un importante papel para el desarrollo de programas de gestión para, por ejemplo, decidir dónde enfocar las medidas de prevención del daño y restauración de zonas afectadas, o donde establecer estrategias del control del riesgo, contribuyendo así a paliar las consecuencias económicas y ecológicas de estos fenómenos. Finalmente, cabe resaltar que este tipo de visualizadores al ser aplicaciones interactivas e intuitivas disponibles online para todo el mundo, son un medio eficaz para divulgar y transferir a la sociedad los resultados de investigaciones científicas de gran complejidad.

7. Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado en el contexto del proyecto MITECO2023-AF y a partir de los datos suministrados por el Ministerio de Transición Ecológica, los Parques Nacionales y las CCAA (Junta de Andalucía, Gobierno de Aragón, Govern Illes Balears, Gobierno de Cantabria, Castilla-La Mancha, Junta de Castilla y León, Generalitat de Catalunya, Junta de Extremadura, Xunta de Galicia, Gobierno de La Rioja, Comunidad de Madrid y Comunidad Foral de Navarra).

8. Bibliografía

ADAME, P., ALBERDI, I., CAÑELLAS, I., HERNÁNDEZ, L., AGUIRRE, A., RUANO, A., MORENO-FERNÁNDEZ, D., ISABEL GONZÁLEZ, A., TORRES, M.B., MONTES, F.; 2022 a. Drivers and spread of non-native pests in forests: The case of *Gonipterus platensis* in Spanish Eucalyptus plantations. *For. Ecol. Manage.* 510.

<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120104>

ADAME, P., ALONSO, L., CAÑELLAS, I., HERNANDEZ, L., PASALODOS-TATO, M., ROBLA, E., & ALBERDI, I.; 2022 b. Hacia un seguimiento más completo y armonizado de los daños en los bosques: Aplicación a la defoliación arbórea en España. *Ecosistemas*, 31(3), 2387-2387. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2387>

ALLEN, C.D., et al.; 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *For. Ecol. Manage.*, 259(4), 660-684.

BOYD, I.L., FREER-SMITH, P.H., GILLIGAN, C.A., GODFRAY, H.C.J.; 2013. The consequence of tree pests and diseases for ecosystem services. *Science*, 342(6160), 1235773.

ESRI; 2024. Environmental Systems Research Institute. Inc. Redlands, CA, USA. <https://www.esri.es>.

ESRI; 2025. ArcGIS Experience Builder Resources. <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-experience-builder/resources>

HERNANDEZ, L., CAÑELLAS, I., ALBERDI, I., TORRES, I., MONTES, F., 2014. Assessing changes in species distribution from sequential large-scale forest inventories. *Ann. For. Sci.* 71 (2), 161–171. <https://doi.org/10.1007/s13595-013-0308-6>.

JACTEL, H., et al.; 2009. The influence of forest stand management on biotic and abiotic risks of damage. *Ann. For. Sci.*, 66, 701.

MITECO; 2025 a. Inventario de Daños Forestales en España. Red europea de Seguimiento de Daños en los Bosques (Red de Nivel I). Resultados del muestreo para cada año. Área de Inventarios y Estadísticas Forestales (AIEF). Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Disponibles en: https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/inventarios-nacionales/redes-europeas-seguimiento-bosques/red_nivel_I_resultados.html

MITECO; 2025 b. Informes sobre el Estado de los Bosques en Europa del ICP Forest. Disponibles en: <https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/inventarios-nacionales/redes-europeas-seguimiento-bosques.html#informes-sobre-el-estado-de-los-bosques-en-europa>

MORENO-FERNÁNDEZ, D., HERNÁNDEZ, L., SÁNCHEZ-GONZÁLEZ, M., CAÑELLAS, I., MONTES, F., 2016. Space-time modeling of changes in the abundance and distribution of tree species. *For. Ecol. Manage.* 372, 206–216. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.04.024>.

SEIDL, R., et al; 2017. Forest disturbances under climate change. *Nature Climate Change*, 7(6), 395–402

SUÁREZ, S., MORENO-FERNÁNDEZ, D., CAÑELLAS, I., ALBERDI, I., HERNÁNDEZ, L.,

OLIVEIRA, N., MONTES, F., y ADAME, P., 2024. Climate-Driven Increase in Mistletoe Infestation in Iberian Pine Forests. Preprint disponible en SSRN: <https://ssrn.com/abstract=5063297> o <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5063297>