



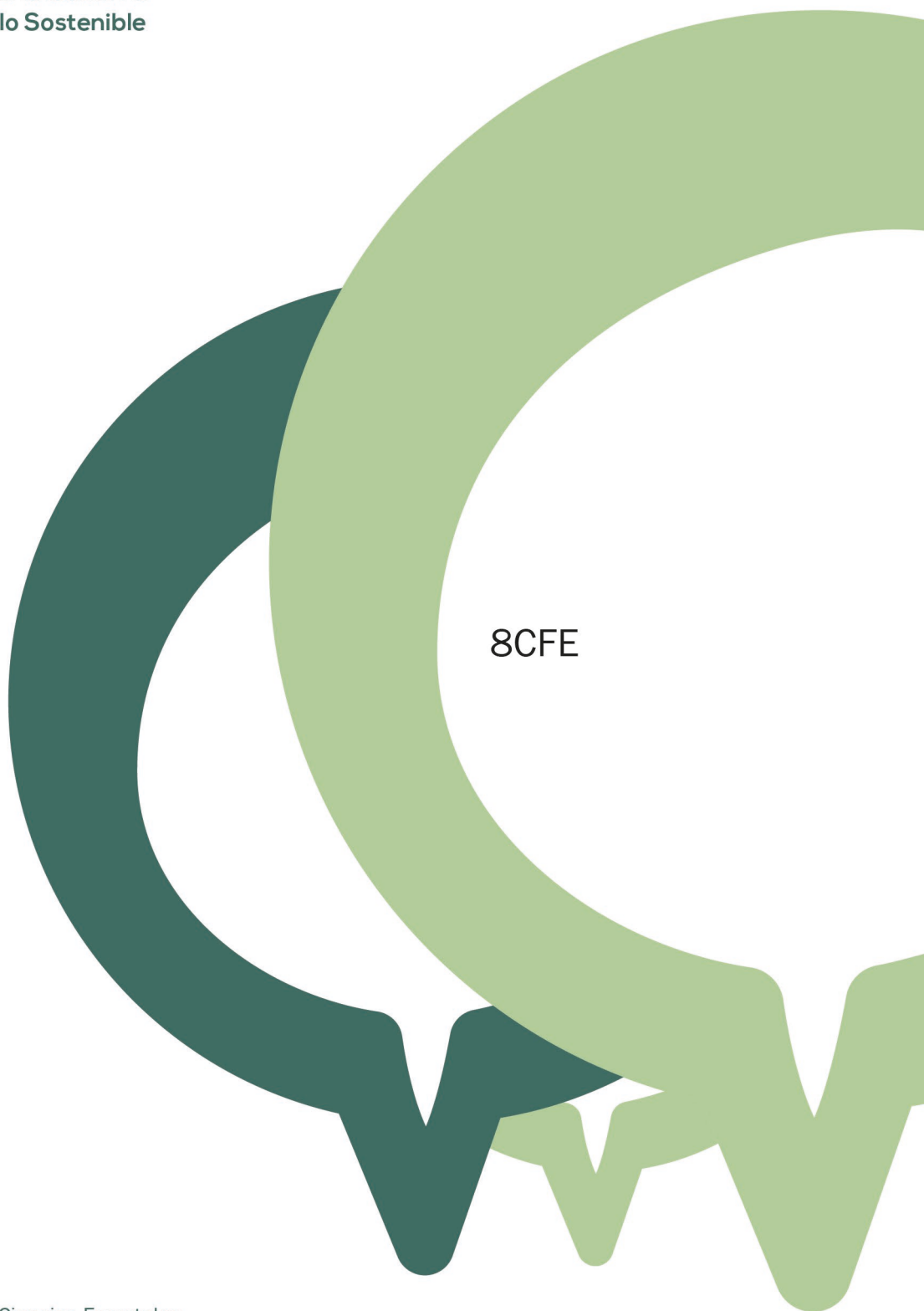
2022
Lleida

27·1
junio · juny
julio · juliol

Cataluña
Catalunya

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



Teledetección de la evolución de daños por hongo foliar en pinares de la C.A. de Cantabria

LÓPEZ TRULLÉN, D.¹ SANCHEZ LABRADOR, J. D.¹ DIEZ GONZALEZ, J. B.¹ DIEZ GUTIERREZ, A. B.² ESPINOSA RUBIO DE LA TORRE, F. J.²

¹ ITD Medioambiente, S.L.

² Gobierno de Cantabria.

Resumen

El objeto del presente trabajo es la determinación del estado sanitario derivado del grado de afección por hongo foliar referente a las masas de pinares de la C. A. de Cantabria a través del empleo del sensor MultiSpectral Instrument (MSI) instalado a bordo de los satélites Sentinel 2 de la Agencia Espacial Europea (ESA). El estudio tiene por tanto un doble objetivo. Primero, determinar la evolución en el tiempo del grado de afección por hongo foliar para cada uno de los pinares de la C. A. de Cantabria a través del empleo de los índices Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) y el Normalized Difference Red Edge Index (NDRE1 y NDRE 2). Por otra parte, comprobar los resultados obtenidos a través del empleo de la información derivada del análisis de dichos índices mediante las observaciones realizadas en campo sobre las masas forestales objeto de análisis. El análisis de los datos derivados de los tres índices analizados se ha efectuado para el periodo 2016-2019, que abarca el intervalo de tiempo en el que la afección más intensa por hongo foliar fue detectada en campo.

Palabras clave

Teledetección, hongo foliar, *Pinus radiata*, seguimiento, sanidad forestal.

1. Introducción

Los datos tomados por satélites de observación de la tierra han permitido desarrollar diferentes herramientas que aportan información útil para la toma de decisiones para los gestores del territorio en distintas disciplinas. En el caso de los sensores pasivos ópticos, el seguimiento de la vegetación se ha efectuado tradicionalmente mediante el uso de los datos captados sobre el espectro visible e infrarrojo cercano.

Con la llegada del programa Copérnicus de la Comisión Europea y el lanzamiento de la misión espacial Sentinel 2 de la Agencia Espacial Europea (ESA) es posible obtener datos recurrentes y de alta resolución espacial sobre nuestro territorio. Actualmente es posible obtener estimaciones del contenido de clorofila de las masas forestales con una resolución espacial y temporal sin precedentes que permite monitorizar procesos ecológicos como el estrés o el decaimiento vegetal ocasionado por diversas causas.

Durante los últimos meses algunas masas forestales, fundamentalmente pinares de *Pinus radiata* se han visto afectados por organismos patógenos que han ocasionado problemas sanitarios graves, ocasionando previsibles daños ecológicos y económicos significativos. Por tanto, además de los sistemas tradicionales implementados para el seguimiento de las masas forestales se hace necesario monitorizar dichas masas mediante un sistema que permita armonizar la metodología de forma objetiva para todo el territorio.

Los datos tomados por el sensor MultiSpectral Instrument (MSI) instalado a bordo de los satélites Sentinel 2 han sido utilizados para el seguimiento y detección del decaimiento de la vegetación en numerosos estudios a nivel europeo e internacional con buenos resultados. Por tanto,

el empleo de esta herramienta para monitorizar y detectar cambios en la vegetación puede ser útil como información a implementar en el sistema de gestión de sanidad forestal de la región.

2. Objetivos

El objeto del presente trabajo es la determinación del estado sanitario derivado del grado de afección por hongo foliar y su evolución en el tiempo referente a las masas de pinares de la C. A. de Cantabria a través del empleo del sensor MultiSpectral Instrument (MSI) instalado a bordo de los satélites Sentinel 2.

El estudio tiene por tanto un doble objetivo. Primero, determinar la evolución en el tiempo del grado de afección por hongo foliar para cada uno de los pinares de la C. A. de Cantabria a través del empleo de los índices Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) y el Normalized Difference Red Edge Index (NDRE1 y NDRE 2). Y, por otra parte, comprobar los resultados obtenidos a través del empleo de la información derivada del análisis de dichos índices mediante las observaciones realizadas en campo sobre las masas forestales objeto de análisis. El análisis de los datos derivados de los tres índices analizados se ha efectuado para el periodo 2016-2020, que abarca el periodo en el que la afección más intensa por hongo foliar fue detectada en campo.

Por otra parte, el desarrollo de este trabajo servirá para evaluar el potencial y la utilidad desde el punto de vista operativo de un sistema para la monitorización, seguimiento y detección temprana de anomalías detectadas sobre las masas forestales de la C. A. de Cantabria mediante el empleo de los datos espectrales procedentes de datos de Sentinel 2.

3. Metodología

La metodología empleada se basa en el análisis de los datos procedentes del sensor de observación de la tierra MSI. Para ello, se han calculado las curvas temporales para distintos parámetros estadísticos correspondientes a los índices espectrales NDVI, NDRE1 y NDRE2, derivados de las bandas espectrales de MSI, en las teselas de pinar. Estas curvas temporales representan la variación de los valores correspondientes a distintos parámetros estadísticos representativos de una tesela de pinar calculados a partir de los índices espectrales analizados.

Las curvas temporales, descritas por una determinada formación vegetal, describen las variaciones que representa el índice empleado. En el caso de los índices espectrales NDVI, NDRE1 y NDRE2 los valores que representan establecen correlaciones significativas con la cantidad de biomasa viva, índice de área foliar y concentración de clorofila. Si bien, los índices NDRE mantienen niveles de sensibilidad mayores para concentraciones altas de clorofila a y b que el NDVI.

Por tanto, la parametrización de las curvas temporales descritas por estos índices permite determinar tanto las variaciones estacionales relacionadas con la fenología de la vegetación como anomalías debidas a sequías u otras perturbaciones climáticas y afecciones de la masa foliar relacionadas con diferentes agentes externos. Es decir, a través del conocimiento derivado de las observaciones históricas referentes a las curvas temporales para un tipo de vegetación, podemos determinar aquellos valores estacionales que se consideran dentro de la normalidad y aquellos que se salen de este rango y que se sitúan en el rango de valores anómalos.

Este análisis continuo en el tiempo permite detectar posibles cambios sufridos en la vegetación representada por la tesela correspondiente, que en el ámbito forestal pueden ser tanto de origen antrópico directo, como los cambios en el uso del suelo para creación de infraestructuras, tratamientos selvícolas, aprovechamientos forestales u otras alteraciones no ocasionadas de forma

directa por la actividad humana como las afecciones sanitarias de las masas forestales, sequías, derribos por viento, etc.

El desarrollo del presente estudio contempla la ejecución de trabajos referentes a distintas disciplinas. Primero, se requiere el procesamiento, gestión y control de calidad de un gran volumen de datos derivados de las observaciones efectuadas por el sensor MSI sobre el territorio de Cantabria para el periodo 2016-2020. Por otra parte, se requiere realizar un control de campo sobre una muestra de pinares seleccionada con el objetivo de determinar el grado de afección por hongo foliar y testar los resultados derivados del análisis de los índices espectrales analizados.

Los datos empleados se corresponden con el producto L1C del sensor MSI disponible a través del programa Copérnicus. Estos datos se corresponden con las reflectancias Top Of Atmosphere (TOA) correspondientes a las bandas del visible, Infrarrojo Cercano (NIR) y Red Edge requeridas para el cálculo de los índices seleccionados (NDVI, NDRE1 y NDRE2).

Con la finalidad de obtener las reflectancias Bottom Of Atmosphere (BOA) los datos requieren ser corregidos y normalizados para poder efectuar un análisis multitemporal. De este modo se han aplicado modelos para la corrección de los datos en referencia a dos fenómenos:

- La interacción de la energía con la atmósfera: La energía electromagnética objeto de detección por el sensor es la energía proveniente del sol que es reflejada por los objetos de la superficie terrestre y captada por el sensor a 786 km de altitud. Por tanto, entre ambos objetos se interpone la atmósfera que interfiere de formas diversas con el flujo radiante. Algunos de los gases (nitrógeno, oxígeno, argón, vapor de agua y dióxido de carbono) y aerosoles de los que se compone la atmósfera son los principales responsables de la interacción con la energía electromagnética. Su efecto es triple: absorben energía en determinadas longitudes de onda del espectro, dispersan determinados flujos y emiten otros.
- El gradiente de iluminación de la superficie de la tierra que depende de la posición relativa de la superficie respecto de la posición solar: La posición relativa del sol respecto de un punto de la superficie de la tierra varía a lo largo del año. Esta variación de la posición solar determina el ángulo de incidencia del flujo radiante sobre la superficie de la tierra, esto es, el determinado por la altura solar y el acimut. Además, hay que tener en cuenta las características topográficas de la superficie a analizar, definidas por la inclinación de la misma, determinada por la pendiente y orientación del terreno en ese punto.

Una vez se han obtenido los índices espectrales (NDVI, NDRE1 y NDRE2) para todas las fechas procesadas se han analizado todos los datos con la finalidad de determinar la existencia de datos no representativos de la vegetación debido a la incidencia de nubosidad, nieve u otras perturbaciones sobre el dato.

La clasificación automática de las escenas de Sentinel 2, que permiten la clasificación de los píxeles afectados por datos no válidos como las nubes han sido analizadas generando como resultado errores significativos por exceso y defecto en los bordes de las nubes. Teniendo en cuenta que se busca la obtención de la máxima cantidad de datos disponibles y la obtención de datos representativos del estado de las masas forestales, estos errores no son asumibles. Por este motivo se ha efectuado una clasificación mediante operador experto para determinar los píxeles afectados por nubosidad sobre las zonas de interés. Esta clasificación se ha efectuado sobre todos los datos procesados.

Como resultado de esta clasificación se han determinado todos aquellos píxeles que son representativos de las masas forestales y cuyo valor correspondiente a los índices analizados no se encuentra afectado por nubosidad, nieve u otras perturbaciones que afectan al valor del dato.

De esta forma, una vez aquellos han sido determinados aquellos píxeles que van a ser descartados para cada uno de los países de Sentinel 2 sobre las zonas de interés, podemos obtener la serie temporal de valores para cada uno de los índices en el período objeto de análisis.

Sin embargo, la señal temporal correspondiente a los índices lleva asociado “ruido aleatorio” procedente de las imprecisiones derivadas de la aplicación de los modelos de corrección atmosférica y otros factores que hacen que las curvas obtenidas presenten variaciones aleatorias que distorsionan el dato.

Con el objeto de filtrar esta señal se emplean filtros de suavizado no lineales que son útiles para filtrar las observaciones extremas que no forman parte del patrón local, pero que tienen la capacidad de responder con rapidez a patrones sólidos.

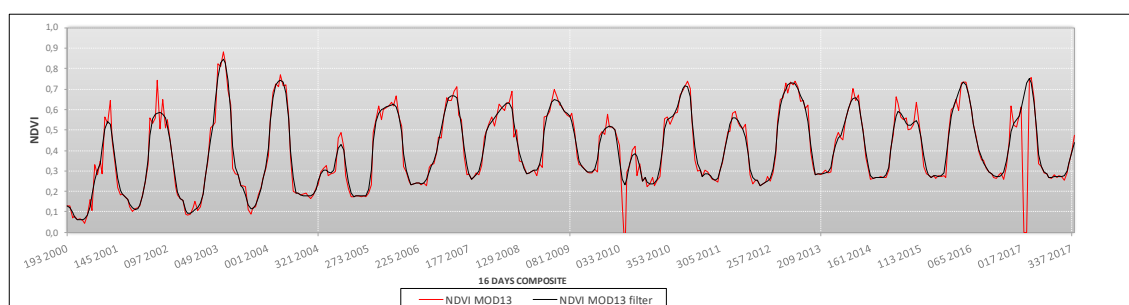


Figura1. Curva temporal de NDVI para un píxel en el que se representa una señal filtrada con 4253H-Twice (negro) y señal sin filtrar (rojo).

La unidad temporal para la generación del dato es la mensual. Esta unidad resulta apropiada para el seguimiento de las masas forestales con el objetivo del proyecto ya que resulta un periodo de tiempo lo suficientemente reducido como para posibilitar la detección temprana de anomalías inducidas por distintos factores sobre las masas forestales.

Por otra parte, el área objeto del estudio comprendido en el territorio de la C. A. de Cantabria, mantiene unos niveles de nubosidad muy altos, lo que reduce la disponibilidad de datos útiles a una escala temporal inferior al mes.

En este sentido, se ha empleado la técnica de “compositing”, es decir, generar una composición mensual a partir de los datos mensuales capturados por Sentinel 2. En este caso el procedimiento utilizado para la generación de los compuestos mensuales es el “Máximo Value Compositing” (MVC). Este método consiste en la selección, tomando como base el píxel, del píxel con el mayor valor, que será el píxel resultado. De esta forma se reduce la influencia de estos factores, que tienen una influencia alta sobre los datos generados en el ámbito de actuación del proyecto.

A partir de la cartografía de pinares de la C. A. de Cantabria facilitada por la Dirección General del Medio Natural (DGMN), se ha codificado cada una de las teselas de pinar mediante el código FID correspondiente a la base de datos (1.388 teselas de pinar). De este modo, se han extraído los siguientes estadísticos para cada una de las teselas de pinar:

- Promedio: correspondiente con el promedio de los valores de todos los píxeles que componen la zona.

- Moda: correspondiente con la moda de los valores de todos los píxeles que componen la zona.
- Percentiles 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90.
- Desviación estándar: correspondiente con la desviación estándar de los valores de todos los píxeles que componen la zona.

De este modo se obtienen los parámetros estadísticos descritos para cada una de las teselas de pinar. Estos estadísticos se tienen para los tres índices analizados (NDVI, NDRE1 y NDRE2) y para cada una de las fechas correspondiente a las capturas de Sentinel 2 del periodo de análisis (2016-2020).

Una vez se han obtenido los valores correspondientes a todos los estadísticos descritos para los 220 pases disponibles para el periodo objeto del estudio se ha generado una base de datos en la que se han incorporado. Así se tienen los valores correspondientes a cada uno de los estadísticos analizados para cada tesela de pinar.

A partir de la base de datos generada se han representado los valores normalizados (en %) con respecto al periodo de análisis. De este modo se obtienen las curvas correspondientes a cada uno de los estadísticos analizados, tesela de pinar e índice espectral (NDVI, NDRE1 y NDRE2) para el periodo de análisis 2016-2019. Las curvas se han dividido en periodos de 1 año, tomando como referencia los periodos entre julio del mes “n” a junio del año “n+1”.

En la figura 2, 3 y 4, se muestran las curvas obtenidas para una tesela de pinar correspondientes al análisis del promedio.

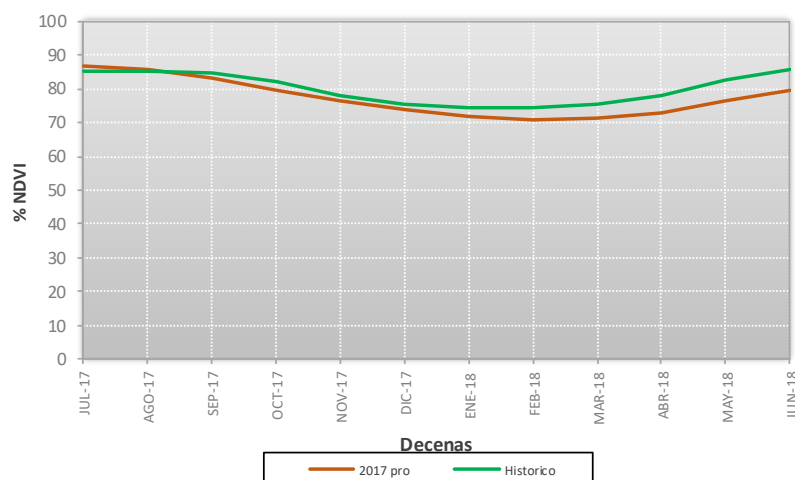


Figura 2. Curva temporal correspondiente al promedio de NDVI para la tesela de pinar con ID = 10 y año 2017.

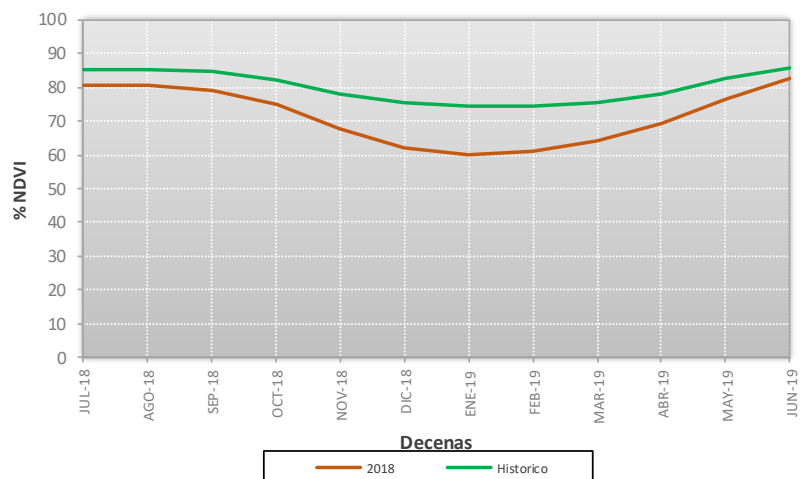


Figura 3. Curva temporal correspondiente al promedio de NDVI para la tesela de pinar con ID = 10 y año 2018.

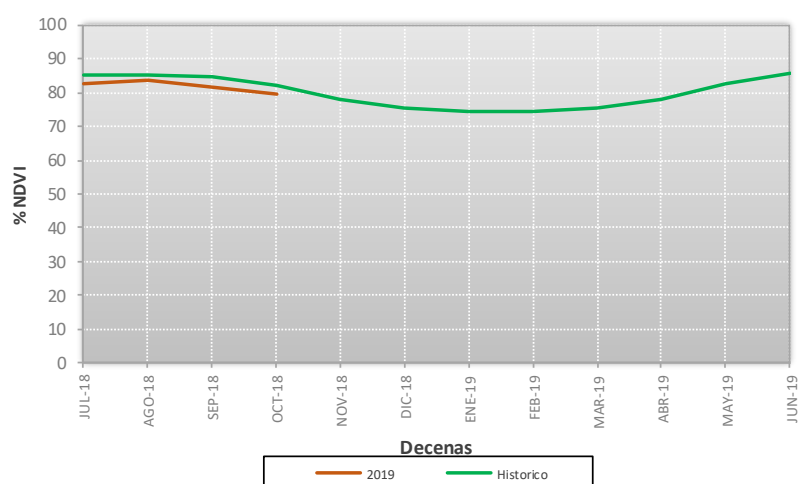


Figura 4. Curva temporal correspondiente al promedio de NDVI para la tesela de pinar con ID = 10 y año 2019.



Figura 5. Masa joven de Pinus radiata con afección alta por hongo foliar.

Para determinar el estado mensual actual de cada una de las teselas de pinar se ha tomado como referencia el año 2016. Es decir, el dato de referencia se corresponderá con el dato mensual del periodo julio de 2016 a junio de 2017. El valor de referencia utilizado es la moda detectada en la tesela de pinar. Se estima que este valor es más representativo del grado de afección de la tesela de pinar que el promedio, por tratarse cada tesela de forma unitaria.

Los niveles de decaimiento medio de las teselas se obtienen de la siguiente forma: Muy bajo, se corresponden con aquellos valores detectados que son menores que el 70 % del valor mínimo absoluto detectado en el año de referencia 2016; Bajo, se corresponden con aquellos valores detectados que son mayores que el 90 % y menores que el 70 % del valor mínimo absoluto detectado en el año de referencia 2016; Normal, se corresponden con aquellos valores superiores que el 90 % del valor mínimo absoluto detectado para el año de referencia 2016 y menores que este valor mínimo. Alto, se corresponde con los valores superiores al valor mínimo absoluto e inferiores al valor máximo absoluto detectados para el año de referencia 2016; Muy alto, se corresponde con aquellos valores superiores al valor máximo absoluto detectado para el año de referencia 2016.

Con el objeto de determinar la correspondencia y el grado de sensibilidad del método empleado a partir de los datos derivados del sensor MSI, se ha diseñado un muestreo de campo. El muestro se ha diseñado tomando una muestra dirigida de 107 teselas, Bajo los siguientes criterios:

- Se han seleccionado 96 teselas en base a los datos relativos al grado de afección facilitados por la DGMN y correspondientes con el trabajo de campo efectuado durante los meses de invierno del 2018 y primavera del 2019 por los Agentes del Medio Natural (AMN). Las teselas seleccionadas se corresponden con aquellas en las cuales el grado de afección determinado ha sido de nivel 3 para el porcentaje de pies con síntomas de la enfermedad y el porcentaje de copa dañada en los pies afectados. Bajo este criterio fueron seleccionados 73 teselas. Las 23 teselas restantes hasta completar las 96 teselas se han seleccionado sobre aquellos pinares en los que el porcentaje de copa dañada fuese 3 y el porcentaje de pies con síntomas de la enfermedad fuese 2.
- Las 11 teselas restantes han sido seleccionadas en base a los datos obtenidos a través de los valores de los índices espectrales analizados. Es decir, a partir de la situación observada en el mes de octubre, se han seleccionado aquellos pinares con la situación más baja detectada en base a la referencia establecida por los datos históricos.

El procedimiento seguido para la determinación del nivel de afectación del pinar ha sido el facilitado por la DGMN y empleado por su personal de campo. Este procedimiento consiste en la toma de datos referentes a dos variables por pinar:

Porcentaje de pies con síntomas de la enfermedad:

0 = 0 - 10: No hay pies afectados o únicamente pies aislados.

1 = 11 - 25: El número de pies afectados comienza a ser visible.

2 = 26 - 60: Una parte significativa de los pinos de la masa presenta síntomas de la enfermedad.

3 = >60: La mayor parte de los pies presenta síntomas de la enfermedad.

Porcentaje de la copa dañada en los pies afectados:

0 = 0 - 10: Únicamente las acículas viejas de la parte inferior de la copa están afectadas.

1 = 11 - 25: La presencia de acículas afectadas se localiza en la mitad inferior de la copa del árbol

2 = 26 - 60: Se observan acículas secas en la mayor parte de la copa, pero las acículas de este año aún se encuentran verdes.

3 = >60: Toda la copa del árbol presenta acículas secas o con síntomas de la enfermedad, incluso las acículas del año.

Debido a las dificultades que supone la aplicación del método descrito, dependiente de factores como la iluminación, posición respecto al pinar, posibilidad de obtener una buena perspectiva de la masa, condiciones subjetivas del operador, etc., en la medida de lo posible, el punto de muestreo se ha localizado en posiciones donde la perspectiva de la masa fuese lo más representativa posible para determinar su grado de afección.

4. Resultados

Se ha efectuado un análisis de los datos obtenidos mediante el muestreo de campo y a través de los sensores de observación de la tierra empleados. El análisis tiene un doble objetivo. Por una parte, determinar la relación existente entre los niveles de afección observados en el trabajo de campo y los niveles detectados a partir de la metodología aplicada para el procesamiento de los datos detectados por el sensor MSI. Y por otra parte analizar a través de los resultados obtenidos mediante la detección del sensor MSI la posible influencia o relación con variables externas (pendiente, orientación y altitud) que previsiblemente tienen relación con variables que pueden afectar de forma directa al desarrollo del hongo (temperatura, humedad e insolación).

En la Tabla 1, se muestra la relación existente entre los pinares afectados con nivel 3 correspondiente al porcentaje de pies afectados, variable observada en campo, y los distintos niveles de decaimiento detectados a partir de los datos del sensor MSI según la metodología aplicada:

Tabla 1. Relación entre los niveles de decaimiento detectados con aplicación de la metodología empleada y los niveles de porcentaje de copa dañada observados en el trabajo de campo. Los niveles de copa dañada se corresponden con: 1, 11 a 25 %, la presencia de acículas afectadas se localiza en la mitad inferior de la copa del árbol; 2, 26 a 60 %, se observan acículas secas en la mayor parte de la copa, pero las acículas de este año aún se encuentran verdes; 3, >= 60, toda la copa del árbol presenta acículas secas o con síntomas de la enfermedad, incluso las acículas del año.

% COPA DAÑADA	NIVELES DE DECAIMIENTO MEDIO DE LA TESELA DE PINAR DETECTADOS				
	MUY BAJO	BAJO	NORMAL	ALTO	MUY ALTO
1	0	0	7	2	0
2	0	3	11	6	0
3	0	20	8	2	0
TOTAL	0	23	26	10	0

En la Figura 2 se muestra la distribución de la Tabla 1, clasificada por clases de afección observadas en campo:

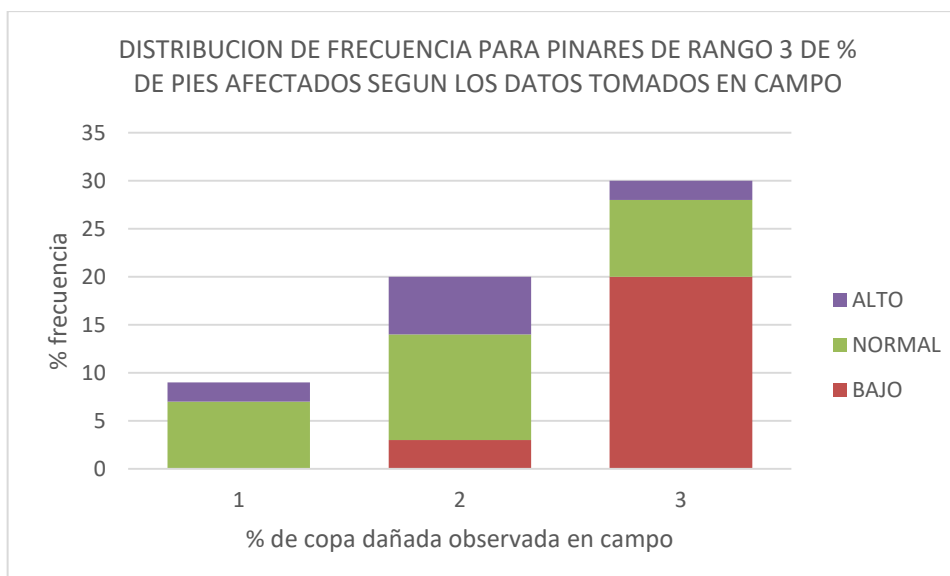


Figura 6. Distribución de frecuencia de los niveles de decaimiento detectados mediante MSI para pinares de rango 3 de porcentaje de pies afectados, respecto a los valores observados en campo para el porcentaje de copa dañada.

Por otra parte, se han analizado las principales variables externas que pueden tener relación con variables que tienen influencia directa en el desarrollo del ciclo biológico del hongo. Este tipo de variables se han empleado por ser posible su estimación de forma precisa y directa. Las variables elegidas son: la altitud del pinar, la orientación promedio del pinar y la pendiente media del pinar.

La influencia indirecta de estas variables sobre otras que ejercen una influencia directa sobre el ciclo biológico del hongo son las siguientes:

- Orientación predominante del pinar: tiene una influencia directa con la insolación recibida por la masa forestal. La insolación recibida por unidad de superficie determina la radiación recibida y por tanto condiciona de forma directa la temperatura tanto del aire próximo a la superficie del terreno como de la propia masa forestal.
- Pendiente del terreno: la pendiente del terreno influye de forma directa sobre la posibilidad de encharcamiento de la superficie del terreno. La humedad del terreno además de influir de forma directa sobre las condiciones microclimáticas del lugar (incluyendo la humedad del aire a nivel de superficie), también lo hace sobre el medio en el que se desarrollan las raíces del arbolado (posible falta de aireación, etc.).
- Altitud promedio del pinar: la altitud condiciona de forma directa otras variables que pueden tener influencia directa con el desarrollo del ciclo biológico del hongo. El gradiente adiabático del aire se estima en $-0,65\text{ }^{\circ}\text{C}$ cada 100 m de altitud, lo que condiciona de forma significativa los valores medios de temperatura para los distintos niveles altitudinales. Por otra parte la altitud, unida a la posición en el valle, puede tener influencia sobre episodios frecuentes de inversión térmica, en donde los valores de temperatura son superiores para ubicaciones con mayores niveles altimétricos y posiciones fuera de fondos de valle.

En las Figuras 3, 4 y 5 se muestra la distribución de los niveles de decaimiento detectados a partir de los datos MSI, sobre una muestra de 1.388 pinares, y para cada una de las variables expuestas.

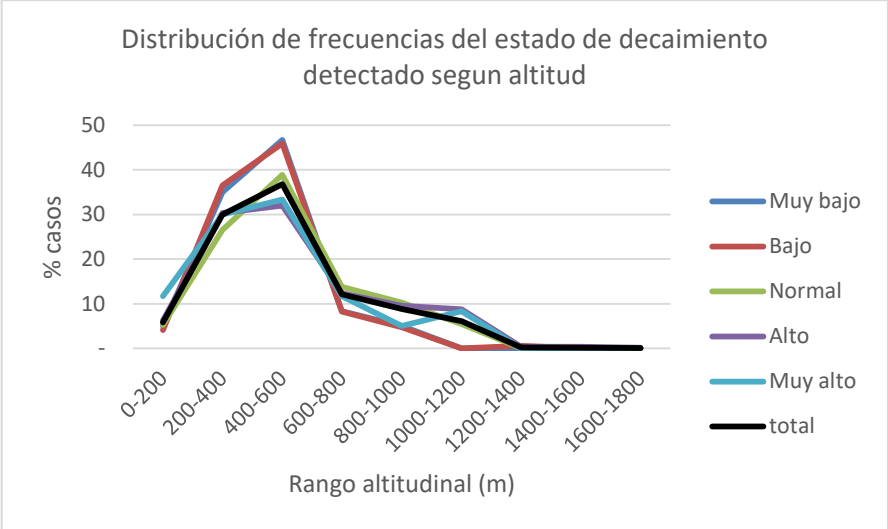


Figura 7. Distribución de frecuencia del estado de decaimiento según la altitud del pinar.

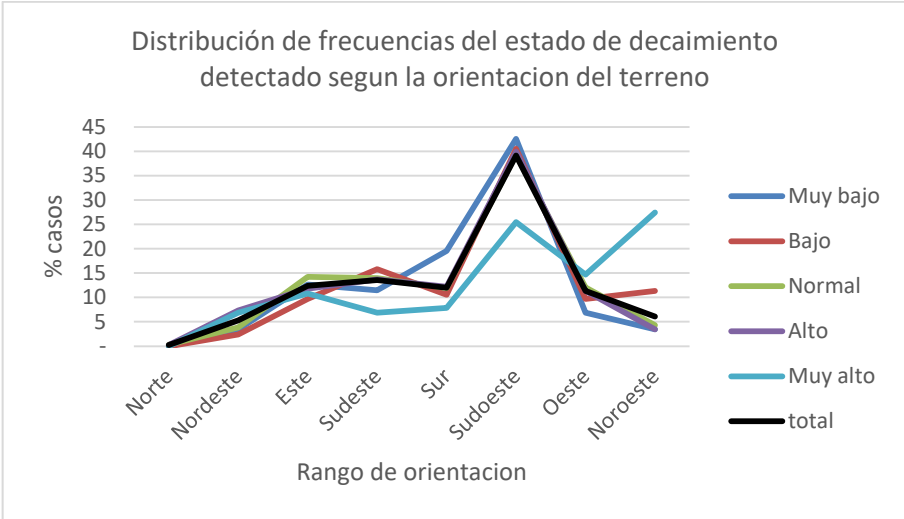


Figura 8. Distribución de frecuencia del estado de decaimiento del pinar según la orientación del terreno sobre el que se localiza el pinar.

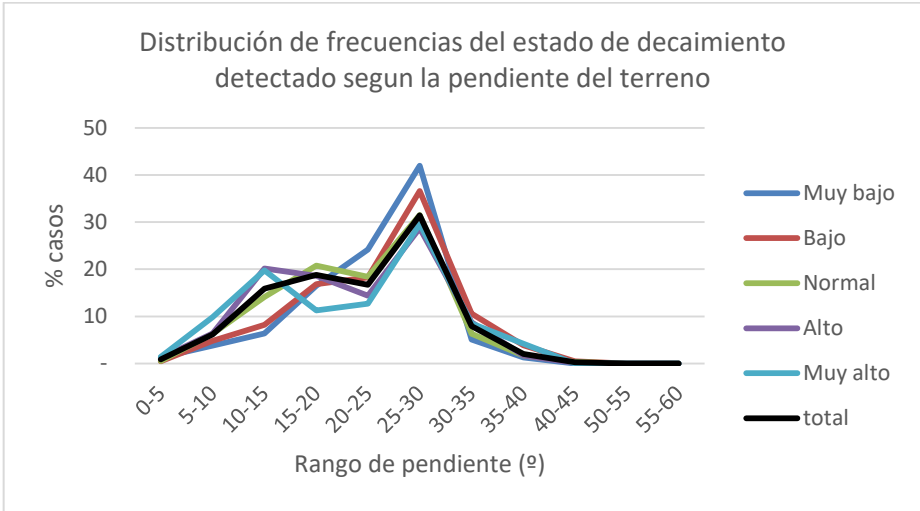


Figura 9. Distribución de frecuencia del estado de decaimiento detectado según la pendiente del terreno del pinar.

5. Discusión

Para analizar los resultados expuestos con anterioridad se deben tener en cuenta una serie de factores que afectan al análisis llevado a cabo.

En este sentido, la metodología empleada para la determinación de los niveles de decaimiento detectados a través de los datos MSI se basan en la “comparación” con un año de referencia. En este estudio se ha tomado como referencia el año 2016. Sin embargo, es posible que los datos de este año se encuentren sesgados por presentar algunos de los pinares determinados niveles de decaimiento, bien causados por el hongo u otras circunstancias. Esto puede hacer que los niveles detectados a través de MSI se muestren “altos” respecto a los niveles observados en campo.

En algunos casos, en fases iniciales del grado de afección de las copas, se observa que los niveles de afectación son más severos en la parte inferior de las copas, con respecto a la parte superior de las mismas. Este hecho puede hacer que la perspectiva de visión del dosel arbóreo para su evaluación sea opuesta en cuanto a los niveles observados en campo (en algunos casos visión exclusiva desde dentro de la masa) y a través de MSI (visión cenital). Este hecho puede ocasionar que en masas con síntomas de afectación por hongo foliar en fases tempranas no sean detectadas hasta el mes siguiente, si la enfermedad se extiende a la parte superior del dosel.

De los resultados obtenidos para todas las variables externas analizadas, los pinares en los que se ha detectado un nivel de decaimiento bajo o muy bajo, muestran valores más acentuados en determinados rangos de la variable analizada. Si bien es cierto, que estos valores son coincidentes con los de mayor distribución de las teselas de pinar.

6. Conclusiones

El empleo de índices los índices espectrales NDVI y NDRE derivados de los datos del sensor MSI se muestran útiles para la detección de anomalías en el dosel arbóreo. Sin embargo, en las fases iniciales de afección por el hongo foliar en los pinares analizados, la posible propagación del hongo desde la parte inferior de las copas hacia la parte superior puede suponer una dificultad para su detección.

Otro factor limitante para la metodología utilizada es la falta de disponibilidad de un periodo histórico de datos amplio. Debido a la relativa reciente disponibilidad de datos de MSI, no se ha podido contar con una serie de datos histórica sólida.

Durante los próximos años, en una previsible adquisición sistemática y continuada de datos por parte de MSI, y en general, del Programa Copernicus se dispondrá de una serie histórica estadísticamente más representativa del comportamiento espectral de las masas forestales. Esto posibilitará la mejora de la fiabilidad para sistemas similares al expuesto en este trabajo.

7. Agradecimientos

Al personal técnico de la Dirección General del Medio Natural y a los Agentes del Medio Natural del Gobierno de Cantabria.

8. Bibliografía

EITEL, JAN U.H. et al. 2011. Broadband, red-edge information from satellites improves early stress detection in a New Mexico conifer woodland. *Remote Sensing of Environment* 115 (2011) 3640-3646.

SIMS, DANIEL A et al.. 2002. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment* 81 (2002) 337- 354.

TUKEY, J. W. 1977. *Exploratory Data Analysis*. Reading, MA: Addison-Wesley.

VELLEMAN, P. F. 1980. Definition and comparison of robust nonlinear data smoothing algorithms. *Journal of the American Statistical Association* 75: 609-61.

VELLEMAN, P. F., and D. C. Hoaglin. 1981. *Applications, Basics, and Computing of Exploratory Data Analysis*. Boston: Duxbury.

VELLEMAN, P. F. 1977. Robust nonlinear data smoothers: Definitions and recommendations. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 74: 434-436.

ZARCO-TEJADA, P.J et al. 2019. Chlorophyll content estimation in an open-canopy conifer forest with Sentinel-2A and hyperspectral imagery in the context of forest decline. *Remote Sensing of Environment* 223 (2019) 320-335.