



universidad  
de león

ESCUELA DE INGENIERÍA AGRARIA Y FORESTAL

## TRABAJO FIN DE MÁSTER

MÁSTER UNIVERSITARIO EN GEOINFORMÁTICA PARA LA GESTIÓN DE LOS  
RECURSOS NATURALES

**ESTUDIO DE PARÁMETROS FENOLOGICOS ESTIMADOS CON DATOS  
SENTINEL 2 EN PINARES DE CASTILLA-LA MANCHA AFECTADOS POR  
PROCESIONARIA**

*STUDY OF PHENOLOGICAL PARAMETERS ESTIMATED WITH SENTINEL 2  
DATA IN PINE FORESTS IN CASTILLA-LA MANCHA AFFECTED BY  
PROCESSIONARY PINE NEEDLE MOTH.*

Lorena Caiza Morales

Tutora: María Flor Álvarez Taboada

Cotutora: Cristina Gómez (Universidad de Valladolid)

Ponferrada, septiembre 2021

Escuela de Ingeniería Agraria y Forestal

## ANEXO 5. HOJA DE CONFORMIDAD TRABAJOS DE CARÁCTER CIENTÍFICO O TÉCNICO

Título: ESTUDIO DE PARÁMETROS FENOLÓGICOS ESTIMADOS CON DATOS SENTINEL 2 EN PINARES DE CASTILLA LA MANCHA AFECTADOS POR PROCESIONARIA

Autor: Lorena Caiza Morales

### ELEMENTOS DE OBLIGADA APARICIÓN

- Resumen.** De 400 palabras como máximo.
- Introducción.** Debe incluir los motivos por los que se realiza el trabajo y los antecedentes o estudios previos sobre el mismo.
- Objetivos.** Se detallarán de forma clara y concisa los objetivos que se pretenden alcanzar.
- Material y Métodos / Metodología.** Descripción de las técnicas, los materiales empleados, y los métodos de análisis de datos, de forma que se garantice la repetibilidad de los mismos.
- Resultados / Análisis / Diagnóstico.** La información obtenida con el estudio se presentará de forma sistemática, preferentemente mediante tablas y figuras que deberán ser en todo caso autoexplicativas, y deberán aparecer debidamente numeradas y referenciadas en un índice propio.
- Discusión.** Los resultados propios del trabajo deberán ser discutidos relacionándolos, en su caso, con otros de estudios precedentes.
- Conclusiones.** Deberán ser claras, concisas, y coherentes con los objetivos propuestos. En el caso planes de ordenación de recursos forestales, propuestas concretas con objetivos, líneas y medidas.
- Planos / Mapas.** Serán obligatorios en cualquier trabajo técnico o científico asociado a áreas, parcelas o territorios determinados.
- Bibliografía.** Listado de las fuentes de información utilizadas debidamente referenciadas y ordenadas.

OBTENIDA LA CONFORMIDAD

DENEGADA LA CONFORMIDAD  
(No se autoriza la presentación)

El tutor/es:

Fdo.:  Fdo.:

## RESUMEN

La procesionaria del pino (*Thaumetopoea pityocampa* Dennis & Schiff) es un lepidóptero que en su fase larvaria (invierno) se alimenta de las acículas de coníferas, en particular de especies del género *Pinus pp*, reduciendo el crecimiento y el vigor del árbol. En este trabajo se pretende contribuir al avance de las técnicas de teledetección para el seguimiento del estado sanitario de los pinares afectados por procesionaria de pino en Castilla-La Mancha. El objetivo principal es caracterizar y comparar la espectrofenología en rodales de pino infestados o no infectados por procesionaria a partir de series de datos Sentinel-2. Se partió con la catalogación de los rodales de campo de la base de datos cartográfica del Plan de Lucha Integrada contra la Procesionaria del Pino en Castilla-La Mancha clasificándolos por su grado de infestación acumulada en cuatro categorías: Cero, Bajo, Medio y Alto.

A partir de las series temporales completas de Sentinel 2 MSI Tile T30WK, se calcularon los índices NDVI, EVI, NBR, NDII y la banda del NIR, se extrajeron la media y la mediana por rodal de las series completas, para tener una serie homogénea por estación, se interpoló el archivo desde el 18 de enero del 2018 hasta el 24 de marzo del 2021 cada 6 días, obteniendo 65 puntos por estación. Luego se calcularon las curvas fenológicas en TIMESAT (Eklundh, 2018) ajustando la serie con la función logística, obteniendo la curva y los parámetros fenológicos; Inicio de la estación (SOS), fin de la estación (EOS), Duración, Día de máximo valor (MOS), Máximo valor (Max) por rodal. Para identificar diferencias significativas entre categorías de infestación se hizo una comparación con Kruskal Walls en R. Obteniendo que el NDVI es el que mayor diferencias significativas encontró entre categorías, adicional a esto se identificó que la categoría Medio es la que más diferencias presenta. También se evidenció que los parámetros fenológicos calculados con la media presentan más diferencias entre categorías de infestación. Para detectar desviaciones en la fenología de los rodales infestados por procesionaria se calculó la curva fenológica media, obteniendo los picos más altos en invierno, adicionalmente se promediaron los parámetros fenológicos (SOS, EOS, MOS y Duración) de las tres estaciones.

Las curvas fenológicas obtenidas con los índices EVI y NDII pusieron en manifiesto la existencia de un comportamiento diferenciado entre las diferentes categorías, haciendo viable el uso de datos Sentinel-2 MSI para discriminar defoliaciones en pino provocadas por procesionaria.

**Palabras Clave:** Sentinel, procesionaria, infestación acumulada, índices de vegetación, teledetección.

## ABSTRACT

The pine processionary (*Thaumetopoea pityocampa* Dennis & Schiff) is a lepidopteran that in its larval stage (winter) feeds on the needles of conifers, particularly species of the genus *Pinus* pp, reducing the growth and vigour of the tree. This work aims to contribute to the advancement of remote detection techniques for monitoring the health status of pine forests affected by the pine processionary moth in Castilla-La Mancha. The main objective is to characterise and compare the spectrophenology in infested and non-infested pine stands from Sentinel-2 data series. We started with the cataloguing of the field stands of the cartographic database of the Plan de Lucha Integrada contra la Procesionaria del Pino en Castilla-La Mancha, classifying them by their degree of accumulated infestation in four categories: Zero, Low, Medium and High.

From the complete Sentinel 2 MSI Tile T30WK time series, the NDVI, EVI, NBR, NDII and NIR band indices were calculated, the mean and median per stand of the complete series were extracted, in order to have a homogeneous series per station, the file was interpolated from January 18, 2018 to March 24, 2021 every 6 days, obtaining 65 points per station. Then the phenological curves were calculated in TIMESAT (Eklundh, 2018) fitting the series with the logistic function, obtaining the curve and phenological parameters; Start of season (SOS), end of season (EOS), Duration, Maximum value day (MOS), Maximum value (Max) per stand. In order to identify significant differences between infestation categories, a comparison was made with Kruskal Walls in R. The NDVI was found to be the one with the greatest significant differences between categories, in addition to this, the Medium category was identified as the one with the greatest differences. It was also found that the phenological parameters calculated with the mean show more differences between infestation categories. In order to detect deviations in the phenology of the stands infested by processionary, the mean phenological curve was calculated, obtaining the highest peaks in winter, and the phenological parameters (SOS, EOS, MOS and Duration) of the three seasons were averaged.

The phenological curves obtained with the EVI and NDII indices showed the existence of a differentiated behaviour between the different categories, making the use of Sentinel-2 MSI data to discriminate pine defoliation caused by processionary pine defoliations feasible.

**Key words:** Sentinel, processionary, cumulative infestation, vegetation indices, remote sensing.

# ÍNDICE

RESUMEN .....	i
ABSTRACT .....	ii
ÍNDICE .....	iii
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. La procesionaria del pino .....	1
1.1.1. Biología de la procesionaria de pino .....	1
1.1.2. Influencia del clima sobre el ciclo biológico del insecto .....	3
1.1.3. Daños .....	4
1.1.4. Bosques mediterráneos frente a la procesionaria .....	4
1.1.5. Seguimiento de los daños en campo .....	4
1.1.6. Pinares de Castilla la Mancha (España) .....	5
1.1.7. Programa de seguimiento de la procesionaria en Castilla-La Mancha .....	6
1.2. Evaluación de daños forestales con herramientas de teledetección .....	6
1.3. Tendencias en la identificación de plagas mediante teledetección .....	7
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>9</b>
2.1. Objetivos Específicos .....	9
<b>3. ÁREA DE ESTUDIO .....</b>	<b>9</b>
<b>4. MATERIAL Y MÉTODOS .....</b>	<b>11</b>
4.1. Materiales .....	11
4.1.1. Imágenes de satélite Sentinel-2 .....	11
4.1.2. Rodales de seguimiento .....	13
4.1.3. Rstudio .....	14
4.1.4. Matlab .....	14
4.1.5. Arc Map .....	14
<b>4.2. Métodos .....</b>	<b>14</b>
4.2.1. Análisis de los rodales de seguimiento .....	14
4.2.2. Pre procesamiento de imágenes .....	17
<b>4.2.1. Mascara de nubes y suelo .....</b>	<b>17</b>
4.2.3. Cálculo de índices de vegetación .....	17
4.2.4. Obtención de parámetros fenológicos mediante TIMESAT .....	18
4.2.4.1. Pre proceso e Interpolación temporal de la serie de datos .....	19
4.2.4.2. Obtención de los parámetros fenológicos por series de tiempo .....	19
4.2.4.3. Curvas Fenológicas medias y sus parámetros fenológicos .....	21

4.2.5.	Comparación de los parámetros fenológicos.....	21
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>22</b>
5.1.	Distribución de los rodales por infestación acumulada.....	22
5.2.	Curvas fenológicas medias por categoría de infestación acumulada .....	25
5.2.1.	Curva fenológica media obtenida con el índice NDVI.....	25
5.2.2.	Curva media obtenida con el índice EVI.....	26
5.2.3.	Curva media obtenida con el índice NBR.....	27
5.2.4.	Curva media obtenida con el índice NDII.....	27
5.2.5.	Curva media obtenida con el NIR .....	28
5.3.	Curvas fenológicas medias por categoría de infestación acumulada (Mediana).....	29
5.3.1.	Curva media obtenida con el índice NDVI (mediana).....	29
5.3.2.	Curva media obtenida con el índice EVI (mediana).....	29
5.3.3.	Curva media obtenida con el índice NBR.....	30
5.3.4.	Curva media obtenida con el índice NDII.....	31
5.3.5.	Curva media obtenida con la banda del NIR .....	31
5.4.	Parámetros fenológicos de las curvas medias (media).....	32
	Inicio de estación (SOS).....	33
	Fin de Estación (EOS).....	34
	DOY de Máximo Valor de la Estación.....	35
	Duración de la estación .....	36
5.5.	Parámetros fenológicos de las curvas medias (media).....	37
	Inicio de la estación (SOS).....	37
	Fin de la estación (EOS).....	38
	DOY máximo de la estación (MOS).....	38
	Duración de la estación .....	39
5.6.	Comparación de los parámetros fenológicos de los rodales por IV.....	40
	Parámetro fenológico SOS.....	41
	Parámetro fenológico EOS.....	42
	Parámetro fenológico Duración de la estación .....	43
	Parámetro fenológico MOS .....	44
	Parámetro fenológico Máximo valor de la estación.....	45
6.	DISCUSIONES.....	45
7.	CONCLUSIONES.....	46
8.	REFERENCIAS.....	48
	ANEXOS .....	52

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Selección de trabajos destinados a la detección de plagas con sensores remotos.....	8
Tabla 2. Bandas espectrales en el sensor MSI en el satélite Sentienel-2 .....	12
Tabla 3. Niveles de defoliación .....	14
Tabla 4. Rangos de infestación total en los rodales de campo .....	15
Tabla 5. Número de rodales por especie y categoría de infestación acumulada .....	16
Tabla 6. Rango altitudinal de los rodales por categoría de infestación acumulada y especie	24
Tabla 7. Número de rodales por especie y categoría de infestación acumulada según su orientación.....	24
Tabla 8. Comparación entre IV y categorías por rodal parámetro SOS .....	41
Tabla 9. Comparación entre IV y categorías por rodal parámetro EOS .....	42
Tabla 10. Comparación entre IV y categorías por rodal parámetro Duración .....	43
Tabla 11. Comparación entre IV y categorías por rodal parámetro EOS.....	44
Tabla 12. Comparación entre IV y categorías por rodal parámetro EOS.....	45

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo de vida de la procesionaria.....	1
Figura 2. Estadios de la procesionaria de pino .....	3
Figura 3. Distribución de pinos por especie.....	10
Figura 4. Flujo grama de trabajo .....	11
Figura 5. Número de imágenes utilizadas por año .....	13
Figura 6. Histograma de distribución de rodales por infestación acumulada .....	15
Figura 7. Número de rodales por especies de pino .....	16
Figura 8. Distribución de rodales según su nivel de infestación acumulada .....	23
Figura 9. Curvas fenológicas obtenidas a partir de IV - NDVI .....	25
Figura 10. Curvas medias obtenidas por el IV-EVI .....	26
Figura 11. Curvas medias obtenidas por el IV-EVI .....	26
Figura 12. Curvas medias de NBR por nivel de infestación acumulada .....	27
Figura 13. Curvas medias de NDII por nivel de infestación acumulada .....	28
Figura 14. Curvas medias por nivel de infestación NIR .....	28
Figura 15. Curvas medias por nivel de infestación NDVI Mediana .....	29
Figura 16. Curvas medias por nivel de infestación EVI Mediana .....	30
Figura 17. Curvas medias por nivel de infestación NBR Mediana .....	30
Figura 18. Curvas medias por nivel de infestación NDII Mediana .....	31
Figura 19. Curvas medias por nivel de infestación NDII Mediana .....	32
Figura 20. Inicio de estación por categoría y IV.....	33
Figura 21. Fin de estación por categoría y IV.....	34
Figura 22. DOY de máximo valor de estación por categoría y IV.....	35
Figura 23. de estación por categoría y IV.....	36
Figura 24. Inicio de estación por categoría y IV.....	37
Figura 25. Fin de estación por categoría y IV.....	38
Figura 26. DOY de máximo valor de estación por categoría y IV.....	39
Figura 27. Duración de la estación por categoría y IV .....	40

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. La procesionaria del pino

La procesionaria del pino (*Thaumetopoea pityocampa*, Den & Schiff, 1775) es un lepidóptero defoliador de la familia Thaumetopoeidae que en su fase larvaria se alimenta de las acículas de coníferas, en particular de especies del género *Pinus*, provocando defoliaciones. Para protegerse del frío, las colonias se refugian en bolsones de invierno, siendo más grandes y consistentes cuanto más largo e intenso es el periodo invernal (Junta de Andalucía, 2013). Las orugas se alimentan durante el otoño, el invierno e incluso parte de la primavera en las zonas más frías (Montoya R. y Hernández R, 1998).

### 1.1.1. Biología de la procesionaria de pino

La procesionaria del pino presenta un ciclo anual, invernando en forma de crisálida (ninfosis). El ciclo completo del insecto pasa por cuatro fases: adulto / polilla, huevo, oruga y crisálida.

Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
					+	++	++	+ +			
					...	.....	.....	.....	...		
♂	♂	♂				♂	♂	♂	♂	♂	♂
	●	●	●	●	●	●	●	●			

+ Adulto ... Puesta ♂ Oruga ● Crisálida

**Figura 1. Ciclo de vida de la procesionaria**  
**Fuente: Adaptado de Junta de Andalucía, 2013**

Los adultos emergen a partir del mes de julio, comenzando antes el vuelo en las zonas más frías. El nacimiento de los adultos, su apareamiento y la puesta de los huevos transcurre en un plazo no superior a dos días. La duración del periodo de vuelo puede ser de más de dos meses, tardando la puesta en eclosionar entre 30 y 40 días. Las orugas se alimentan durante el otoño, el invierno e incluso parte de la primavera en las zonas más frías. La formación del bolsón que las protege y aísla del frío, tiene lugar durante los últimos estadios larvarios. En estas fases salen a alimentarse al atardecer y por la noche, permaneciendo en el bolsón durante el día. Cuando



las orugas alcanzan la madurez se preparan para enterrarse y crisalidar, permaneciendo unos días en el bolsón sin alimentarse. Durante la fase de crisálida tiene lugar el fenómeno de diapausa embrionaria, que consiste en un aletargamiento de las crisálidas. La fase larvaria en el caso más favorable puede durar unos 110 días, unos 3 meses y medio.

La fase oruga, causante de la defoliación de pinos, se desarrolla pasando por 5 estadios larvarios, teniendo desde el principio un comportamiento gregario y una característica forma de desplazarse en fila, una detrás de otra como en procesión, de donde les viene su nombre (Vega, *et al.*, 2011). Los cinco estadios se detallan a continuación:

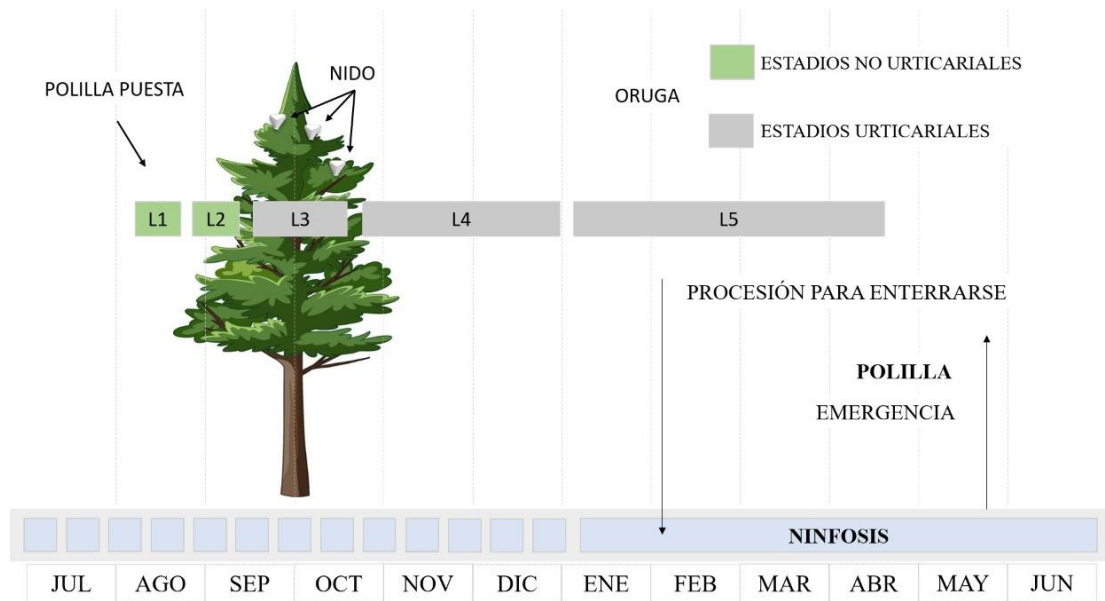
Estadio L1.- La puesta de huevos sucede desde finales del mes de julio en las zonas más frías, hasta mediados del mes de septiembre en las más cálidas. El nacimiento de las larvas ocurre a los 30/40 días tras la puesta.

Estadio L2.- Tras la primera muda a los 8-12 días, las orugas forman pequeños nidos provisionales mediante entrelazados de hilos de seda, normalmente cubiertos por pequeños excrementos.

Estadio L3.- Transcurridos de 12 a 18 días realizan su segunda muda, apareciendo los pelos urticantes, cada vez más numerosos según avanza el crecimiento, y comienzan a construir el característico bolsón de invierno.

Estadio L4.- Pasados unos 30 días las orugas vuelven a mudar, alcanzando la fase larvaria en la que pasa los meses centrales del invierno. Esta es la fase de duración más variable en función de las condiciones climáticas de la zona, prolongándose según el rigor invernal. La alimentación es crepuscular y nocturna, permaneciendo en el interior del bolsón durante las horas centrales del día con el fin de acumular calor.

Estadio L5.- La cuarta muda normalmente tiene lugar tras el periodo invernal. Esta fase larvaria tiene una duración aproximada de 30 días, y es en la que se producen las defoliaciones más intensas.



**Figura 2. Estadios de la procesionaria de pino**

**Fuente: Adaptado de Vega et al.(2011)**

### 1.1.2. Influencia del clima sobre el ciclo biológico del insecto

Al ser la procesionaria un lepidóptero mediterráneo, su distribución geográfica esta esencialmente ligada a la influencia del clima, particularmente a la insolación y a la temperatura que influyen de forma importante en el desarrollo de la oruga (Demolin G,1969b). Según Romanky N, 1966 los diferentes niveles de temperatura que tienen incidencia sobre la vida de la procesionaria son estos:

**Umbral letal superior e inferior:** A temperaturas superiores a 30 °C desaparece el comportamiento gregario y las orugas abandonan las colonias. A partir de 32 °C se produce la muerte de las larvas. Una oruga aislada soporta hasta -7º C. Si las temperaturas descienden por debajo de los -12º C, pueden morir las colonias enteras.

**Umbral de desarrollo:** Entre 10 y 20 °C, las orugas siguen alimentándose y construyendo el bolsón, pero no crecen ni se desarrollan, por lo que la 4ª fase larvaria puede prolongarse hasta 4 o 5 meses. Cuando la temperatura dentro del bolsón supera los 20-25 °C, las orugas se vuelven activas y se desarrollan normalmente.

**Umbral de actividad:** Temperaturas inferiores a los 10 °C en el interior del nido detienen la actividad de la colonia. Cuando las noches son muy frías, las orugas salen a alimentarse durante el día.

### 1.1.3. Daños

El daño causado por las orugas y su desplazamiento en la búsqueda de alimento varía desde la alimentación sobre las partes más tiernas de las acículas y los movimientos entre ramillos de los primeros estadios, hasta la defoliación total y las procesiones entre árboles al final del desarrollo larvario. La procesionaria es el defoliador más importante de los pinares de la Península Ibérica, más de 500000 hectáreas son defoliadas todos los años en España por los ataques de este insecto (Montoya Moreno *et al.*, 2020), aunque no todas las especies presentan igual susceptibilidad: *Pinus nigra* JF y *Pinus halepensis* Mill son las especies más propensas a su ataque, aunque también se alimenta de *Pinus pinaster* Ait y *Pinus sylvestris* L. Al tratarse de un defoliador invernal, la brotación de primavera no se suele ver afectada, por lo que incluso si la defoliación es total y repetida durante varios años consecutivos, no se produce mortandad del arbolado. No obstante, los crecimientos se ven muy mermados, especialmente en repoblados jóvenes, tardando varios años en recuperar un crecimiento normal y siendo más susceptible de sufrir ataques de otros patógenos. (Centro de Sanidad Forestal de Calabazanos, 2020) Pero además, no se trata sólo una cuestión de sanidad forestal, sino también de salud pública, dado que las larvas de procesionaria son urticantes y causan serios problemas sanitarios a la población en riesgo (Vega *et al.*, 2011)

### 1.1.4. Bosques mediterráneos frente a la procesionaria

La procesionaria del pino es la plaga más importante de los pinares mediterráneos, debido a la naturaleza prolongada de su aparición y las grandes áreas afectadas (Ayuntamiento de Aracena, 2015). Casi la mitad de los bosques españoles están constituidos por coníferas, y según el Tercer Inventario Forestal Nacional el 34,5% mayoritaria o parcialmente son pinos, en razón de las condiciones climáticas en la península son susceptibles de ser atacados por procesionaria (Montoya R y Hernández R, 1998). La dimensión del problema ha generado la atención inmediata en la gestión de los bosques puesto que la procesionaria depende de la temperatura para su desarrollo y actualmente hay un ajuste entre clima y las defoliaciones, por ende las poblaciones de procesionaria se están expandiendo en altitud y latitud. (Hódar, *et al.*, 2021)

### 1.1.5. Seguimiento de los daños en campo

Varias han sido las acciones que a lo largo de los años que se han realizado para el control de plagas, es así como la “Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura” (F.A.O.) en su reunión de Roma en 1.968 define la lucha integrada como: “el sistema

de regulación de plagas que, teniendo en cuenta su hábitat y la dinámica poblacional de las especies consideradas, utiliza todas las técnicas y métodos apropiados, compatibilizando al máximo su interacción, con objeto de mantener las plagas en niveles que no originen daños económicos”. En 1986 se crea la Red de Seguimiento a gran escala del estado de los bosques (Nivel I) que mediante puntos de control instalados en los nodos de una malla sistemática de 16 x 16 km dispuesta a lo largo y ancho de toda Europa, permite conocer la variación en el tiempo y en el espacio del estado de vitalidad de los bosques, definida en este caso por dos parámetros básicos como son la pérdida de follaje y los daños en el arbolado, así como su relación con los diferentes factores de estrés, incluida la contaminación atmosférica. (Ministerio para la transformación ecológica y el reto demográfico, 2021). En la década de los 90 se crea la Red de seguimiento intensivo y continuo de los ecosistemas forestales- Nivel II cuyo objetivo es llevar a cabo un seguimiento exhaustivo de los ecosistemas forestales mediante medidas numerosas y complejas, actualmente el número de parcelas de seguimiento intensivo es 14 estas disponen de una serie de dispositivos para mediciones y toma de muestras periódicas de una serie de parámetros, siendo visitadas mensualmente durante todo el año. (Ministerio para la transformación ecológica y el reto demográfico, 2021) La principal desventaja de estos sistemas de monitoreo es la escala espacial ya que no cubren todo el territorio, dejando zonas sin monitorear propensas a plagas u otros factores.

En España, los programas de monitoreo forestal desde la década de 1970 en adelante han evaluado consistentemente el daño por procesionaria a nivel de rodal mediante un índice ordinal (en adelante índice de infestación) (Cayuela, *et al.*, 2014) Realizando evaluaciones rápidas que cuantifican la defoliación y/o mortalidad de los árboles a nivel del rodal a partir de evaluaciones visuales en el campo realizadas por técnicos forestales. La desventaja de estos métodos de monitoreo son el factor económico y lo propenso al error humano al momento de la toma de datos en campo.

#### 1.1.6. Pinares de Castilla la Mancha (España)

Los pinares de Castilla la Mancha ocupan en torno a un millón de hectáreas, distribuidos por las sierras del Sistema Ibérico y Cordillera Subbética, así como por las llanuras de la Submeseta Sur. *P. nigra* y *P. halepensis* son las especies más abundantes—cada una ocupa por encima del 30% en superficie y se localizan en Cuenca, Guadalajara y Albacete—seguidas de *P. pinaster* (22% en superficie). Menos abundantes son *P. sylvestris* (en el extremo nororiental—Sierra de Cuenca y Sistema Central) y *P. pinea* (en las llanuras manchegas del sur de Cuenca y Albacete, así como en la mitad occidental de Ciudad Real).

En la provincia de Cuenca, la zona noreste está dominada por las sierras y cordilleras del Sistema Ibérico, mientras que al suroeste se extiende la gran meseta castellana y manchega. Cuenca es la primera provincia donde se están implantando sistemas de certificación forestal en montes gestionados por la Administración regional. Se trata de una provincia con una gran tradición forestal. Cuenca alberga la mayor superficie de pinares de Castilla la Mancha, con casi medio millón de ha (MFE50, Vallejo Bombín 2005), de los cuales el 51% en superficie corresponde a *P. nigra*. La superficie forestal está distribuida en 23 montes de utilidad pública con un 73% en superficie ocupado por cinco especies de pino, y tiene una posibilidad maderable anual estimada de 55000 m<sup>3</sup> de madera (InFOREST, 2009). El Inventario Forestal Nacional de España (IFN) estima una cantidad de 252,36 millones de árboles grandes o pies mayores.

### 1.1.7. Programa de seguimiento de la procesionaria en Castilla-La Mancha

El Servicio Forestal de la Consejería de Desarrollo Sostenible de Castilla-La Mancha lleva a cabo desde 2008 un Plan de Lucha Integrada contra la Procesionaria del Pino en Castilla-La Mancha, a través del cual evalúa las poblaciones de procesionaria en más de 6000 rodales de pinar. Las poblaciones de procesionaria se estiman mediante el daño causado a las masas forestales. El Plan de Seguimiento realiza una evaluación anual a finales de invierno o principios de primavera de > 1300000 ha gracias al cual mantiene una base estadística e identifica los rodales más afectados que puedan requerir algún tratamiento. Existe una base de datos cartográfica visualizable online (<https://castillalamancha.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=b8ee20e349ac49778e2dda0d9317a0b1>) que permite observar la distribución e intensidad de las afecciones por procesionaria en toda la Comunidad Autónoma.

Para realizar un seguimiento anual detallado de los daños por procesionaria, es necesario aportar grandes recursos humanos y económicos. Además con las observaciones de campo se tiende a la generalización, perdiendo detalle espacial. Las técnicas de teledetección pueden contribuir al seguimiento del estado sanitario de las masas forestales, aportando indicadores de estado gracias a los datos de alta frecuencia temporal y detalle espacial.

## 1.2. Evaluación de daños forestales con herramientas de teledetección

Tanto por su presencia temporal como por su alcance geográfico y su impacto socioeconómico, es necesario realizar un seguimiento y una gestión de la plaga de forma regular, para garantizar la detección, evaluación y mitigación de los riesgos potenciales para los bosques y la salud pública (Jactel *et al.*, 2015). En este contexto es importante el desarrollo de nuevas tecnologías para la detección de daños por defoliadores que optimicen costos económicos y

temporales. Los sensores remotos ofrecen alternativas eficaces para evaluar los daños de plagas a grandes escalas espaciales y temporales (Pérez *et al.*, 2019).

Los cambios en las masas forestales provocan cambios en la reflectividad por lo que las observaciones de teledetección por satélite tienen un potencial considerable para caracterizar los patrones espacio temporales de la fenología de la vegetación desde la escala local hasta la global, lo que permite un seguimiento eficaz e imparcial de la fenología de la vegetación de manera constante y económica (Zeng *et al.*, 2020)

### 1.3. Tendencias en la identificación de plagas mediante teledetección

Las tecnologías de teledetección son una herramienta importante para detectar perturbaciones forestales causadas por plagas de insectos a través de la variación de rasgos espectrales. Una amplia gama de datos de teledetección (Tabla 1) ha demostrado capacidad para hacer seguimiento de los patrones espacio-temporales de defoliación por insectos herbívoros, incluyendo series temporales de datos multiespectrales espaciales que permiten el análisis del perfil espectro-temporal de cada pixel. Adicionalmente se han utilizado una variedad de métodos para la evaluación de la defoliación basados en datos obtenidos por sensores remotos, incluido el análisis de series de tiempo con resoluciones moderadas o gruesas (Sangüesa, *et al.*, 2014), el análisis de índices de vegetación (IV) / comparación de índices de vegetación (de Beurs y Townsend, 2008 ), el Machine learning (Hawryło, *et al.*, 2018), según (Rullan- Silva *et al.* 2013) entre los métodos más prometedores para el monitoreo de la defoliación de insectos se encuentran el Análisis de mezcla espectral, siendo uno de los más adecuado para la detección debido a su reconocimiento de subpíxeles que mejora los datos multiespectrales.

**Tabla 1. Selección de trabajos destinados a la detección de plagas con sensores remotos**

Agente defoliador	Sensor	Metodología	Referencia
Bark Beetle ( <i>Ips typographus</i> L)	HyMAP	ID3 Árboles de decisión	Lausch, <i>et al.</i> , 2013
Orejuela de pino ( <i>Dendrolimus pini</i> L)	Sentinel - 2	Machine learning	Hawryło, <i>et al.</i> , 2018
Procesionaria ( <i>Thaumetopoea pityocampa</i> )	Landsat 5 y 7	IVs Series temporales Dendrocronología	Sangüesa, <i>et al.</i> , 2014
Polilla Gitana ( <i>Lymantria dispar</i> )	MODIS Landsat	IVs	Rullan-Silva <i>et al.</i> , 2013
Bark Beetle ( <i>Ips typographus</i> L)	Sentinel -2 MODIS	Series de tiempo NDVI	Gomez <i>et al.</i> , 2020

En el estudio de Sangüesa *et al* (2013) se estudian diferentes IVs y se los contrasta con datos climáticos y dendrocronología obteniendo resultados prometedores para un sistema de seguimiento, por otro lado Aragonés *et al.* 2019 logran caracteriza la dinámica temporal de la formación del Pinus mediterráneo especies. Y Hawtylo, *et al.*, 2018 con machine learning logran predeceir la defoliación en pino. Estos trabajos demuestran la capacidad de las técnicas de teledetección para detectar daños en las masas forestales provocados por insectos defoliadores (Rullan-Silva *et al.*,2013). El acceso libre a los datos de observación satelital de la Tierra, proporcionado por algunas agencias espaciales (e.g. NASA, ESA) permite el uso de datos de observación de la Tierra a diferentes escalas y aplicaciones en la gestión forestal. Con esta premisa este trabajo pretende contribuir al avance de las técnicas de teledetección para el seguimiento del estado sanitario de las masas forestales, en concreto mediante la identificación de pinares afectados por procesionaria del pino en pinares de Castilla la Mancha. Para ello se

investigará la espectrofenología en datos Sentinel 2 de los pinares afectados por la plaga durante los últimos años.

## 2. OBJETIVOS

### Objetivo general

- Caracterizar y comparar la espectrofenología en rodales de pino infestados o no infestados por procesionaria a partir de series de datos Sentinel-2.

### 2.1. Objetivos Específicos

- Examinar la capacidad de varios índices de vegetación para describir las características fenológicas.
- Detectar desviaciones en la fenología de los rodales infestados por procesionaria.

## 3. ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio se localiza en la provincia de Cuenca y queda definida por la extensión del tile T30WK de Sentinel 2, y engloba 4283 km<sup>2</sup> de pinares (Figura 3B). Las coordenadas de los puntos extremos de la zona de estudio son 4500000 N 609000 E, 4400000 N 502500E ETRS 89 UTM huso 30. Se ha seleccionado esta zona para testar la metodología de detección y seguimiento de procesionaria en pinar por sus características topográficas, climáticas y diversidad de especies. Y para contribuir y explotar los datos cartógrafos generados por el Plan de Lucha Integrada contra la Procesionaria del Pino en Castilla-La Mancha (Figura 3A)



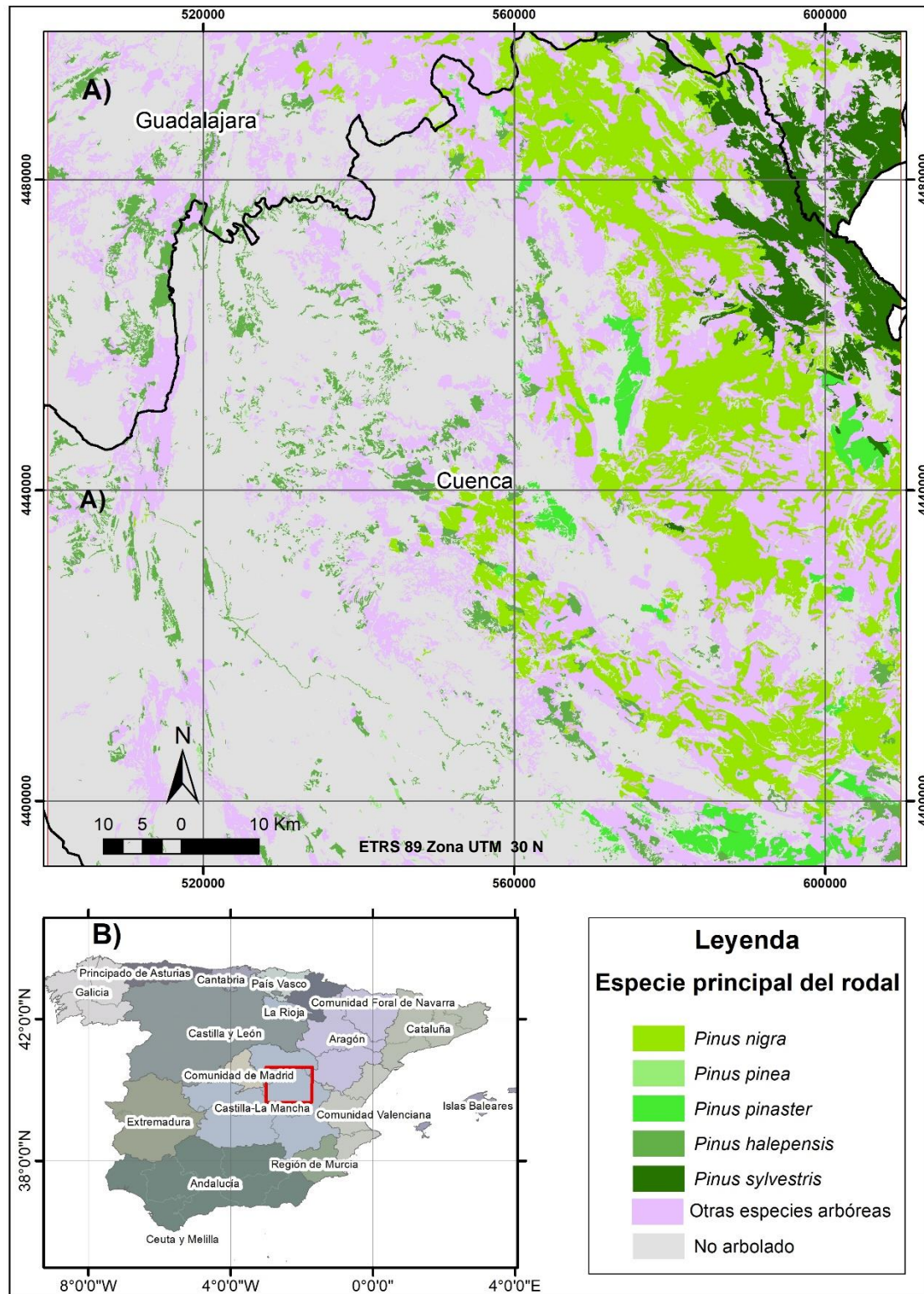
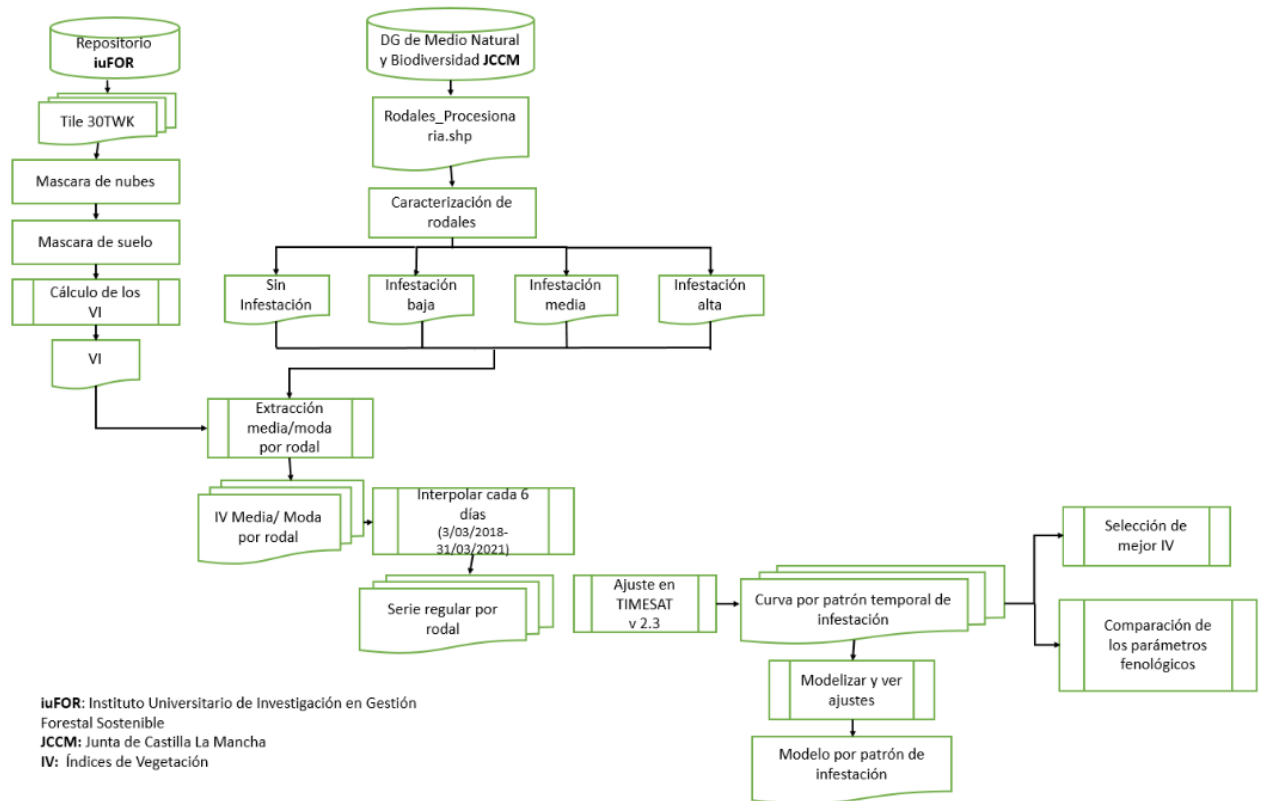


Figura 3. Distribución de pinos por especie

## 4. MATERIAL Y MÉTODOS

La metodología seguida en este trabajo se basa en el análisis de las series espectro temporales de datos obtenidos por el satélite Sentinel - 2 sobre rodales afectados y no afectados por procesionaria durante los años 2018-2021. En la Figura 4 se esquematizan los métodos aplicados en este estudio y se describen con detalle en este capítulo. Cabe recalcar que todos los procesos se realizaron en el Laboratorio del Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal Sostenible como parte del proyecto OUTBREAK (dendrocronología para reconstruir y predecir la expansión en impacto de la procesionaria del pino frente al cambio global) con sede en la Escuela de Ingeniería de la Industria Forestal, Agronómica y Bioenergía (EiFAB) del Campus Duques de Soria.



**Figura 4. Flujo grama de trabajo**

### 4.1. Materiales

A continuación se describe la información, datos de partida y herramientas informáticas empleadas para su procesamiento.

#### 4.1.1. Imágenes de satélite Sentinel-2

La misión Sentinel-2 del programa europeo de observación de la Tierra Copernicus consiste en una constelación de dos satélites idénticos en la misma órbita. Sentinel-2A fue

lanzado el 23 junio de 2015 y Sentinel-2B el 6 de marzo de 2017. Su objetivo es hacer seguimiento de la variabilidad en las condiciones de la superficie terrestre. Tiene una franja de barrido de 290 km, es decir, cada imagen cubre una extensión de aproximadamente 10000 km<sup>2</sup>, y su resolución temporal es de 5 días. Cada satélite lleva un innovador generador de imágenes multispectrales de alta resolución con 13 bandas espectrales (ver tabla 2) (ESA, 2021).

**Tabla 2. Bandas espectrales en el sensor MSI en el satélite Sentinel-2**

	Longitud de onda (um)	Resolución (m)
Banda 1- aerosol	0,43-0,45	60
Banda 2- blue	0,45-0,52	10
Banda 3- Green	0,54-0,57	10
Banda 4- Red	0,65-0,68	10
Banda 5- Red edge 1	0,69-0,71	20
Banda 6- Red edge 2	0,73-0,74	20
Banda 7- Red edge 3	0,77-0,79	20
Banda 8- Near Infrared (NIR)1	0,78-0,90	10
Banda 8A- Near Infrared (NIR)2	0,85-0,87	20
Banda 9- Water vapour	0,93-0,95	60
Banda 10- Cirrus	1,36-1,39	60
Banda 11- SWIR 1	1,56-1,65	20
Banda 12- SWIR 2	2,10-2,28	20

La Agencia Espacial Europea (ESA) pone a disposición de los usuarios dos tipos de productos (Nivel 1C y Nivel 2A) según su nivel de procesamiento. Las imágenes de nivel 1C se encuentran orto rectificadas y dan niveles de reflectancia por encima de la atmósfera (**TOA**, Top Of Atmosphere), mientras que las imágenes de nivel 2A se encuentran ortorectificadas con niveles de reflectancia por debajo de la atmósfera (**BOA**, Bottom Of Atmosphere), o sea, corregidos los efectos atmosféricos.

Para este estudio se utilizó la serie temporal del tile 30TWK, con un rango de fechas desde enero 2018 hasta marzo 2021 dando un total de 201 imágenes disponibles Sentinel MSI (MultiSpectral Instrument) con un nivel de procesamiento 2A, recolectados en el repositorio de iuFOR conectado con el repositorio de ESA. En la figura 5 el número de imágenes disponibles según el mes, se observa que para los años 2018 y 2019 existe un mayor número de imágenes,

esto se debe a que para esas fechas se activó el servicio de emergencia de la ESA, para monitorear emergencias, lo cual justifica el mayor número de productos para estos años en comparación con los otros años.

## IMAGENES SENTINEL 2 UTILIZADAS

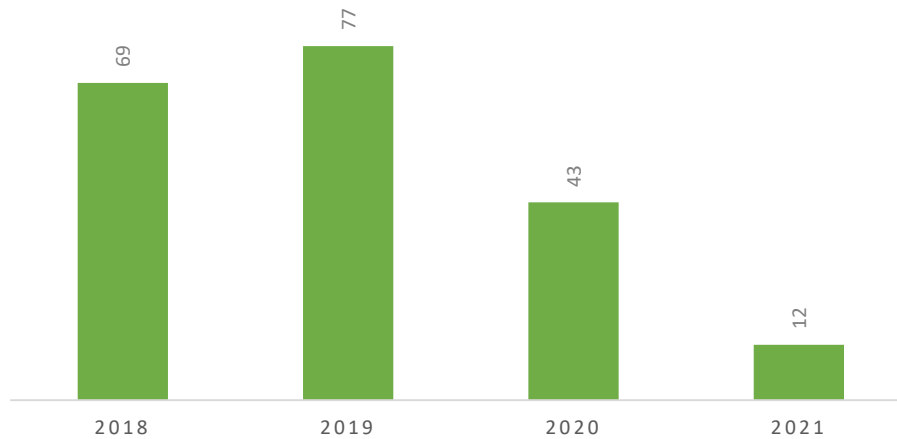


Figura 5. Número de imágenes utilizadas por año

### 4.1.2. Rodales de seguimiento

Los rodales empleados para este estudio se obtuvieron de las bases cartográficas generadas por el Plan de Lucha Integrada contra la Procesionaria del Pino en Castilla-La Mancha. Este archivo vectorial contiene los daños ocasionados por procesionaria en los últimos 10 años. Se seleccionaron los rodales ubicados en la zona de estudio dando un total de 5150 rodales con diferentes características topográficas y niveles de defoliación.

El Servicio Forestal de Castilla La Mancha, con el fin de conocer el estado de las poblaciones de orugas de procesionaria utiliza una escala de niveles de infestación que se describen en la siguiente tabla, y que coinciden con la tradicional escala visual propuesta por Montoya y Hernández (1998):

Tabla 3. Niveles de defoliación

Nivel de infestación	Descripción
0	Ninguna oruga o algunas colonias muy diseminadas
1	Algunas colonias en bordes de masa, claros y pies aislados.
2	Bastantes colonias en bordes de la masa, claros y algunas por el centro de la masa
3	Defoliaciones parciales en bordes y pies aislados, y parciales en el resto de la masa
4	Defoliaciones muy fuertes en bordes y pies aislados, y parciales en el resto de la masa
5	Defoliaciones muy fuertes en toda la masa

#### 4.1.3. Rstudio

Con la finalidad de optimizar procesos se utilizó la versión de R 4.0.2 en Rstudio.

#### 4.1.4. Matlab

Es una plataforma de programación y cálculo numérico (MathWorks, 2021). Se utilizó la versión R2021a con la licencia para estudiantes de la Universidad de León.

#### 4.1.5. Arc Map

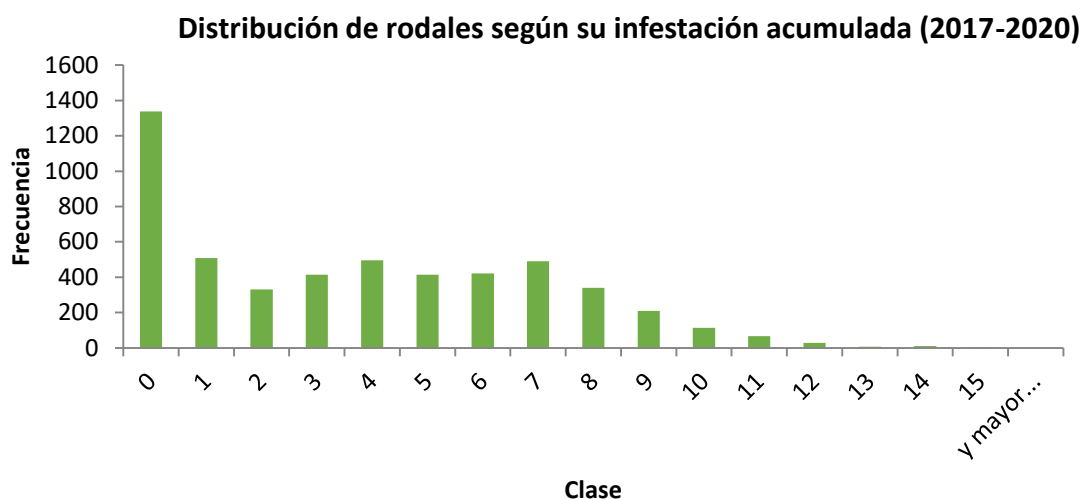
Se utilizó el software de ESRI ArcMap con la licencia estudiantil de la Universidad de Valladolid en su versión 10.7.1 para el tratamiento de los datos vectoriales.

### 4.2. Métodos

#### 4.2.1. Análisis de los rodales de seguimiento

Para el presente trabajo se definió la *infestación acumulada* durante el periodo 2017-2020, como la suma de los niveles de infestación anuales, obteniendo un rango de valores entre 0 y 15.

En la figura 6 se observa el histograma de los rodales según su nivel de *infestación acumulada*.



**Figura 6. Histograma de distribución de rodales por infestación acumulada**

Los valores de infestación acumulada se reclasificaron en 4 rangos, identificando los niveles de afección, y se contabilizó el número de rodales por clase (Tabla 3). Los rodales incluidos en el primer rango no tuvieron infestación en ninguna de las temporadas consideradas. Los del rango superior (9-15) estuvieron afectados con niveles de defoliación altos (Tabla 2) al menos en una de las temporadas 2017-2020. Los rangos intermedios fueron afectados con niveles de defoliación media en una o varias de las temporadas 2017-2020.

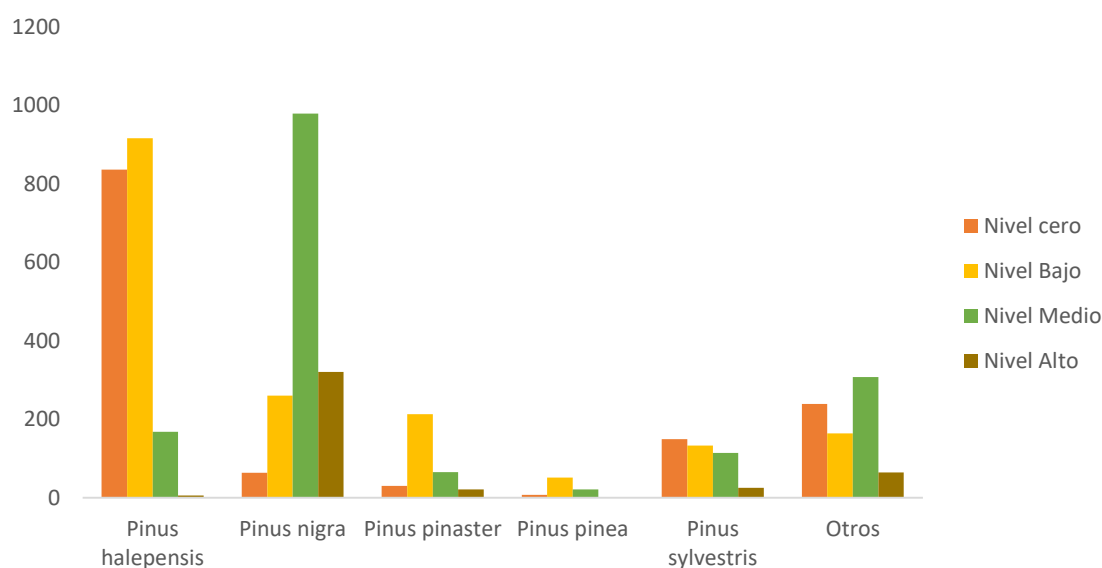
**Tabla 4. Rangos de infestación total en los rodales de campo**

Rango	Infestación acumulada 2017-2020	Total de rodales
0	Sin Infestación	1324
1-4	Infestación baja	1737
5-8	Infestación media	1654
9-15	Infestación alta	435

También, se identificó la especie principal de pino de cada rodal según el nivel de *infestación acumulada* (Tabla 5, Figura 7).

**Tabla 5. Número de rodales por especie y categoría de infestación acumulada**

Especie principal	Nivel Cero	Nivel Bajo	Nivel Medio	Nivel Alto
<i>Pinus halepensis</i>	836	916	168	5
<i>Pinus nigra</i>	63	260	979	320
<i>Pinus pinaster</i>	30	213	65	21
<i>Pinus pinea</i>	7	51	21	0
<i>Pinus sylvestris</i>	149	133	114	25
Otros	239	164	307	64.


**Figura 7. Número de rodales por especies de pino**

Entre los rodales en la categoría Cero de infestación acumulada—las tres temporadas en nivel 0, o sea, sin ninguna oruga o con algunas colonias muy diseminadas—la mayoría de ellos están dominados por *Pinus halepensis* o *Pinus sylvestris* (63% y 18% en número, respectivamente). La categoría de infestación acumulada Bajo también está dominada por rodales de *Pinus halepensis* (53% en número), seguida de *Pinus nigra* (15%) y *Pinus pinaster* (12%). Las categorías Medio y Alto, con niveles de infestación persistente en el tiempo están dominados por la especie *Pinus nigra* (59% y 73 % respectivamente en número) seguidos de *Pinus halepensis* y *Pinus sylvestris*. La Categoría Otros corresponde a rodales que no tienen como especie principal *Pinus pp* en este estudio no se profundiza su análisis.

## 4.2.2. Pre procesamiento de imágenes

### 4.2.1. Mascara de nubes y suelo

Con la final de utilizar toda la serie de imágenes para el periodo de estudio se aplicó una máscara de nubes, elaborada un algoritmo en R, la cual seleccionando la banda de calidad de Sentinel y extrae todos los pixeles clasificados como nubes a la serie de imágenes para evitar interferencias de obtener los datos.

Mediante una clasificación supervisada se generó una máscara de suelo y se aplicó a los rodales para evitar la interferencia de pixeles sin vegetación en el estudio.

### 4.2.3. Cálculo de índices de vegetación

En general, los métodos de detección remota se basan en las diferencias y comparaciones entre las longitudes de onda del rojo (R), infrarrojo cercano (NIR) y el infrarrojo de onda corta (SWIR). Las diferentes combinaciones algebraicas de estas bandas conforman los índices de vegetación (VIs), que son indicadores de diferentes aspectos de la vegetación. Algunos IVs están estrechamente relacionados con variables biofísicas como el vigor del follaje. De esta forma, la defoliación y la decoloración no relacionadas con la fenología de la planta, se toman como indicadores de su estrés, posiblemente causado por insectos defoliadores (Rullan-Silva *et al.*, 2013). Para este estudio se considerarán los IVs recogidos en la tabla X y que han demostrado con anterioridad su capacidad para indicar estrés por defoliación de procesionaria en pinares de Aragón (Sangüesa *et al.*, 2014).

El índice de vegetación normalizado (NDVI) es un buen indicador de la salud global de los bosques, puede indicar el contenido de clorofila y defoliación, pero tiene problemas con respecto a la saturación en vegetación densa y no lineal (Tuominen, *et al.*, 2009). NDVI es el VI más utilizado y está definido de acuerdo a la ecuación:

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \quad (1)$$

El Índice de Vegetación Mejorado (EVI) está diseñado para ser utilizado en zonas de vegetación densa, se utiliza la reflectancia azul para compensar los efectos del suelo de fondo y los efectos de la dispersión atmosférica. (Tuominen, *et al.*, 2009) El EVI se define según la ecuación:

$$EVI = 2.5 \left( \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + 6 \rho_{RED} - 7.5 \rho_{BLUE}} \right) \quad (2)$$



Índice infrarrojo diferencial normalizado, que algunos autores han correlacionado satisfactoriamente con el contenido de agua de la vegetación que corresponde a la fórmula (Hunt y Rock 1989):

$$NDII = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{SWIR1}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR1}} \quad (3)^*$$

\*SWIR1 (1.57-1.65)

El NBR Normalized Burn Ratio (NBR) emplea el contraste entre NIR por ser sensible al contenido de agua en la vegetación y el suelo; y el SWIR2 (2.11-2.29), que es sensible a la detección de vegetación sin actividad fotosintética (Key, 2006) Definido por:

$$NBR = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{SWIR2}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR2}} \quad (4)$$

Con estas premisas se calcularon los IV en enumerados anteriormente y se extrajeron la media y mediana de cada rodal según su categoría de infestación con la ayuda de R studio.

#### 4.2.4. Obtención de parámetros fenológicos mediante TIMESAT

TIMESAT es una herramienta basada en el software Matlab® para analizar series de tiempo de datos de sensores satelitales, usado para diferentes aplicaciones como el mapeo y caracterización de fenología (Eklundh, 2018). TIMESAT ayuda a obtener parámetros fenológicos de series espectro-temporales regulares, es decir, con datos en intervalos de tiempo iguales.

Los pasos para el procesamiento son:

1. Lee los inputs definidos para el proceso de la serie de tiempo
2. Lee el archivo de datos de VI creado
3. Bucle sobre la serie temporal.
  - 3.1. Lee la serie de tiempo  $y_1, y_2, y_3, \dots, y_N$
  - 3.2. Ajusta la serie de tiempo a una función smooth
  - 3.3. Escribe los parámetros de ajuste de la función para el archivo

TIMESAT implementa tres métodos basados en ajuste por mínimos cuadrados sobre los VI. El primer método utiliza funciones polinómicas locales en el ajuste, y el método puede clasificarse como un filtro adaptativo de Savitzky-Golay. Los otros dos son métodos de mínimos cuadrados,

en los que los datos se ajustan a funciones de modelo no lineales de diferente complejidad. Los tres métodos de tratamiento utilizan una definición preliminar de la estacionalidad (unimodal o bimodal) junto con los tiempos aproximados de las estaciones de crecimiento (Cleveland, et al., 1990). En el caso de las series temporales ruidosas, el método Savitzky-Golay a veces produce resultados no deseados. En estos casos, los ajustes a las gaussianas asimétricas Gaussianos o funciones logísticas dobles pueden ser la mejor opción (Eklundh, 2018).

#### 4.2.4.1. Pre proceso e Interpolación temporal de la serie de datos

Para obtener los parámetros fenológicos de cada rodal, es necesario obtener una serie regular de valores espectrales de la serie de imágenes Sentinel 2. Utilizando el archivo vectorial de rodales reclasificado previamente según niveles de infestación acumulada, se extrajeron los valores de media y mediana de cada VI por rodal, utilizando un algoritmo en R Studio.

Por otro lado, para tener una serie homogénea por año, se hizo una interpolación con la función spline en Matlab, y se obtuvieron datos para cada 6 días en un intervalo de fechas desde el 18 de enero del 2018 hasta el 24 marzo del 2021. Para completar los requerimientos de ajuste del software TIMESAT v 2.3 se duplican los valores del primer y último año, y finalmente se crea un archivo \*.txt, donde se define el número de datos por serie de tiempo y el número de años. Este archivo se carga en TIMESAT.

#### 4.2.4.2. Obtención de los parámetros fenológicos por series de tiempo

Para obtener los parámetros fenológicos de cada rodal se utilizaron las siguientes herramientas de TIMESAT.

##### *TSM\_settings*

El menú TSM\_settings genera un archivo de configuración \*.set desde el cual contiene los ajustes para el procesamiento de datos en serie, este incluye el número de periodos, número de datos por periodo, la ubicación del archivo ASCII interpolado, el nombre del archivo a generarse y la carpeta de salida.

##### *TSF\_process parallel*

Debido a la cantidad de datos se decidió utilizar el procesamiento paralelo que asigna el trabajo a los diferentes procesadores.

Para ejecutarlo se selecciona el menú TSF\_process parallel en el sistema de Timesat, se selecciona el archivo \*.set. Aparecerá un mensaje en la ventana de comandos de Windows, donde se introduce el número de procesadores, en este caso 4, al final del análisis se generan

varios archivos entre ellos un \*.tpa con el nombre asignado en el archivo de ajustes, generado en el paso anterior.

### *TSM\_printseasons*

Para extraer los parámetros estacionales por categoría de cada rodal, se utilizó el módulo TSM\_printseasons, se carga el archivo \*.tpa, que redirige a Matlab donde se introduce el número de filas a procesar y el nombre del archivo final el cual contiene una serie de parámetros clave de estacionalidad.

Se utiliza una función ajustada puesto que proporciona medidas más estables, en las que se han reducido los efectos del ruido. Una serie temporal que abarca n años dará parámetros de estacionalidad para las n- 1 estaciones más centrales. (Eklundh, 2018) Para el estudio se utilizaron 5 estaciones por lo tanto se tendrán datos para 4 estaciones. La importancia de estos parámetros radica en la posibilidad identificar cambios espaciales o temporales de los pinares con presencia de procesionaria.

A continuación describen todos los parámetros de estacionalidad extraídos definidos por Eklundh y Jönssonb, 2015.

**Beg.-** Tiempo para el inicio de la estación (SOS); tiempo para el cual el borde izquierdo ha aumentado hasta un nivel definido por el usuario (a menudo una determinada fracción de la amplitud estacional) medido desde el nivel mínimo de la izquierda.

**End.-** Tiempo para el final de la estación (EOS); tiempo para el que el borde derecho ha disminuido hasta un nivel definido por el usuario, medido desde el nivel mínimo derecho.

**Length.-** Duración de la estación; tiempo desde el inicio hasta el final de la estación.

**Base.-** Nivel de base, dado como la media de los valores mínimos izquierdo y derecho.

**Mid-x.-** Tiempo de la m

idad de la estación (MOS); calculado como el valor medio de los tiempos para los que, respectivamente, el borde izquierdo ha aumentado hasta el nivel del 80 % y el borde derecho ha disminuido hasta el nivel del 80 %.

**Max.-** Máximo valor de datos para la función ajustada durante la temporada; puede ocurrir en un diferente en comparación con el 5.

**Amp.-** Amplitud estacional; diferencia entre el valor máximo y el nivel de base.

**L-der.-** Tasa de aumento al principio de la temporada; calculada como la relación de la diferencia entre los niveles izquierdos del 20 % y del 80 % y la diferencia temporal correspondiente.

**R-der.-** Tasa de disminución al final de la temporada; calculada como el valor absoluto de la relación de la diferencia entre los niveles derecho del 20 % y del 80 % y la diferencia temporal correspondiente. La tasa de disminución se da así como una cantidad positiva.

**L-integ.-** Gran integral estacional; integral de la función que describe la estación desde el inicio de la estación hasta el final de la misma. Obsérvese que la integral grande no tiene sentido cuando parte de la función ajustada es negativa.

**S-integ.-** integral estacional pequeña; integral de la diferencia entre la función que describe la temporada y el nivel base desde el inicio de la temporada hasta el final de la misma.

Para este estudio se analizaron los parámetros fenológicos (SOS, EOS, MOS, Duración y Max) en las tres estaciones del periodo de estudio (2018-2020) para cada IV considerado, permitiendo hacer un análisis de variación interanual con el fin de analizar diferencias entre categorías de infestación acumulada.

#### 4.2.4.3. Curvas Fenológicas medias y sus parámetros fenológicos

Para evaluar la capacidad de los diversos IV y describir las características fenológicas de los rodales afectados o no afectados por procesionaria, se examinaron tres estaciones (2018-2020), para ello se calculó la media de los valores de IV extraídos de cada rodal por categoría de infestación acumulada y se ajustó en TIMESAT mediante el modelo logístico.

Los parámetros obtenidos por estación se transformaron a DOY (Day of year) y se promediaron el valor de las tres estaciones para tener la media de los parámetros fenológicos (SOS, EOS, MOS y Duración) y se realizó el mismo procedimiento para los IV calculados a partir de la mediana de cada rodal. Se analizan en el apartado de resultados, así también los valores por estaciones se pueden observar en los ANEXO 1 y 2.

#### 4.2.5. Comparación de los parámetros fenológicos

Con el objetivo de comparar la fenología de rodales afectados o no afectados por procesionaria, se trató de identificar si existen diferencias significativas en los parámetros fenológicos entre rodales categorizados por su infestación acumulada calculados a partir de los IVs. Para ello, se realizó una comparación estadística de los parámetros fenológicos mediante el test de Kolmogorov-Smirnov corrección de Lilliefors, para comprobar la normalidad se utilizó el

(`lillie.test` en R), recomendado utilizarlo con más de 50 observaciones (Amat, 2020). Al obtener un  $p$ -valor  $< 0.05$  se rechaza la hipótesis nula de normalidad, por lo tanto los datos no cumplen con la condición de normalidad. Debido a esto se optó por hacer una comparación con el test de Kruskal Wallis que es la alternativa no paramétrica al contraste ANOVA para datos no pareados que cumplen con las siguientes premisas:

- No se satisfacen las hipótesis de Normalidad e Independencia.
- No estén agrupados.

Para ello se planteó las siguientes hipótesis:

**H<sub>0</sub>:** Las medias de los parámetros espectro fenológicos respuesta son similares en todas las categorías de infestación acumulada

**H<sub>a</sub>:** Hay alguna media distinta de los parámetros espectro fenológicos respuesta de las categorías de infestación acumulada

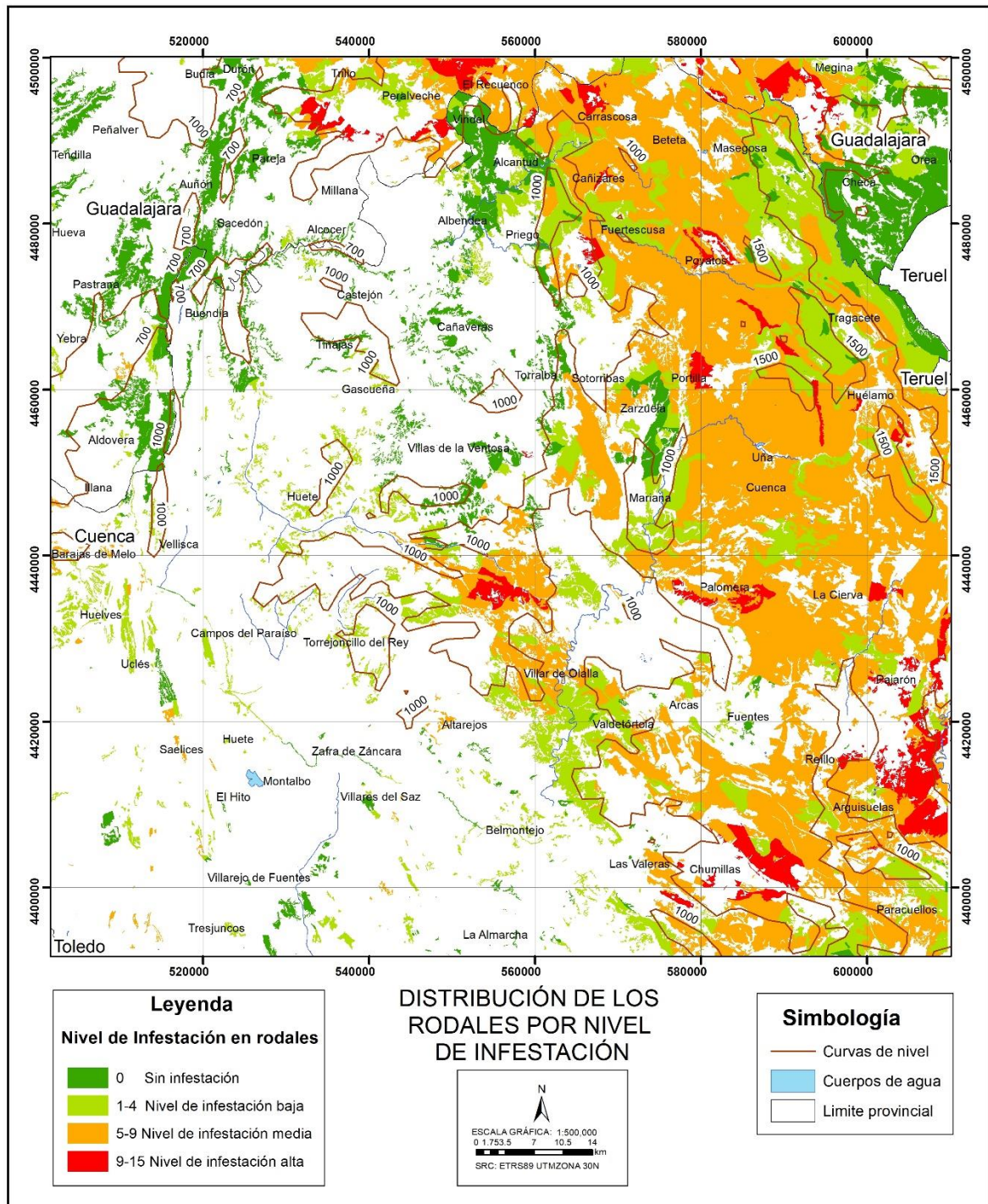
Donde, todos los que tengan  $p < 0.05$  son distintos entre sí.

Como se rechaza la hipótesis nula de Kruskal – Wallis se realizó un contraste dos a dos con el test de `pairwise.wilcox.test()` (el método de ajuste para calcular el  $p$  value fue Bonferroni, donde si el  $p$ -valor  $< 0.05$  el test encuentra significancia en la diferencia de al menos dos grupos.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Distribución de los rodales por infestación acumulada

En la Figura 8 se muestra la distribución de los rodales por infestación acumulada. Destaca la mayor infestación acumulada en rodales de *P. nigra* que se distribuyen en dirección NO-SE a lo largo de la Serranía de Cuenca, todos ellos en las categorías Medio y Alto. Dentro de esta zona se localizan rodales dispersos en categoría Alto, distribuidos de forma aleatoria y que posiblemente está relacionada con la estructura de masa. Los pinares de *P. halepensis* dispersos por la zona occidental están en categoría Bajo o Cero de infestación acumulada. Es importante recordar que estas categorías de infestación se refieren a los años 2017-2020 y por tanto representan niveles de infestación reiterada.



**Figura 8. Distribución de rodales según su nivel de infestación acumulada**

La base de datos del Servicio Forestal de Castilla la Mancha caracteriza la altitud máxima y mínima y orientación de cada rodal de seguimiento. Se obtuvo el rango de altitud de cada categoría de infestación acumulada de los rodales por especie (Tabla 6).

**Tabla 6. Rango altitudinal de los rodales por categoría de infestación acumulada y especie**

	Cero	Bajo	Medio	Alto
<i>Pinus halepensis</i>	638-1164	619-1166	654-1095	948-953
<i>Pinus pinaster</i>	723-1179	782-1359	943-1511	920-1075
<i>Pinus nigra</i>	803-1429	796-1577	850-1576	879-1586
<i>Pinus pinea</i>	788-1011	771-1009	803-984	-
<i>Pinus sylvestris</i>	1379-1698	1203-1764	1172-1646	1354-1547

Se observa que las masas de *P. sylvestris* se localizan a mayor altitud que las otras especies, entre 1200 y 1700 m. Los rodales de esta especie por debajo de 1500 tienen mayor tendencia a la infestación (grupos Medio y Alto). En cuanto a los pinares de *P. nigra*, los rodales con mayor nivel de infestación acumulada suelen estar a mayor altitud que los que tienen infestación acumulada (Medio y Alto están por encima de 1200 m, mientras Cero y Bajo se localizan < 1200 m), indicando su peor adaptación en altitud. *P. pinaster* tiene sus rodales con mayor infestación acumulada en altitudes medias, posiblemente debido a algún otro factor, mientras que *P. halepensis* y *P. pinea* no parecen estar afectados por la altitud.

La orientación topográfica puede condicionar la infestación por procesionaria (ver Tabla 7), ya que como se mencionó anteriormente, la insolación y temperatura influyen en gran medida el desarrollo de las poblaciones en sus distintos estadios. Para tener más características del terreno se extrajo orientación de cada rodal

**Tabla 7. Número de rodales por especie y categoría de infestación acumulada según su orientación**

Especie	Cero				Bajo				Medio				Alto			
	S	U	LL	V	S	U	LL	V	S	U	LL	V	S	U	LL	V
<i>Pinus halepensis</i>	0,13	0,10	0,34	0,44	0,07	0,10	0,30	0,54	0,14	0,08	0,39	0,39	0,20			0,80
<i>Pinus pinaster</i>	0,03	0,03	<b>0,67</b>	0,27	0,03	0,04	0,81	0,12	0,08	0,17	0,49	0,26	0,10	0,05	0,24	0,62
<i>Pinus nigra</i>	<b>0,30</b>	<b>0,29</b>	0,03	0,38	<b>0,15</b>	<b>0,16</b>	0,22	0,47	0,12	0,19	0,30	<b>0,39</b>	0,15	0,10	0,31	0,44
<i>Pinus pinea</i>	-	-	-	-	0,10	0,02	<b>0,84</b>	0,04			<b>0,81</b>	0,19				
<i>Pinus sylvestris</i>	0,23	0,19	0,08	0,50	0,11	<b>0,29</b>	<b>0,31</b>	<b>0,30</b>	0,22	<b>0,32</b>	0,14	<b>0,32</b>	<b>0,32</b>	0,08	0,20	0,40

\*S=Solana U= Umbría LL=Llano V=Varios

Los rodales de *P. sylvestris* en categoría Alto tienden a estar en solana, mientras que los que tienen menor afectación tienden a localizarse en umbría o terreno con orientación no clara. *P. nigra* tiene en las distintas categorías de infestación acumulada una tendencia similar a localizarse en solana o umbría; las categorías de infestación Medio y Alto se localizan preferentemente en llanura. *P. pinea* se localiza en las llanuras conforme a las preferencias de la especie.

## 5.2. Curvas fenológicas medias por categoría de infestación acumulada

### 5.2.1. Curva fenológica media obtenida con el índice NDVI

Las curvas fenológicas medias calculadas a partir del IV NDVI fueron bastante irregulares. Por ello se decidió no presentar curvas medias, en su lugar en la figura 9 se presenta un ejemplo de cada categoría de infestación acumulada. La curva fenológica de la categoría Medio no se ajusta con el modelo logístico, indicando que los rodales categorizados con nivel Medio tienen una infestación muy irregular, con rodales funcionando de diversa forma. Adicionalmente esto los picos máximos para la categoría Cero y Bajo se presentan en invierno, para las tres estaciones, mientras que para la categoría Alto los puntos máximos se adelantan a finales de otoño en las tres estaciones y los valores de NDVI son más bajos.

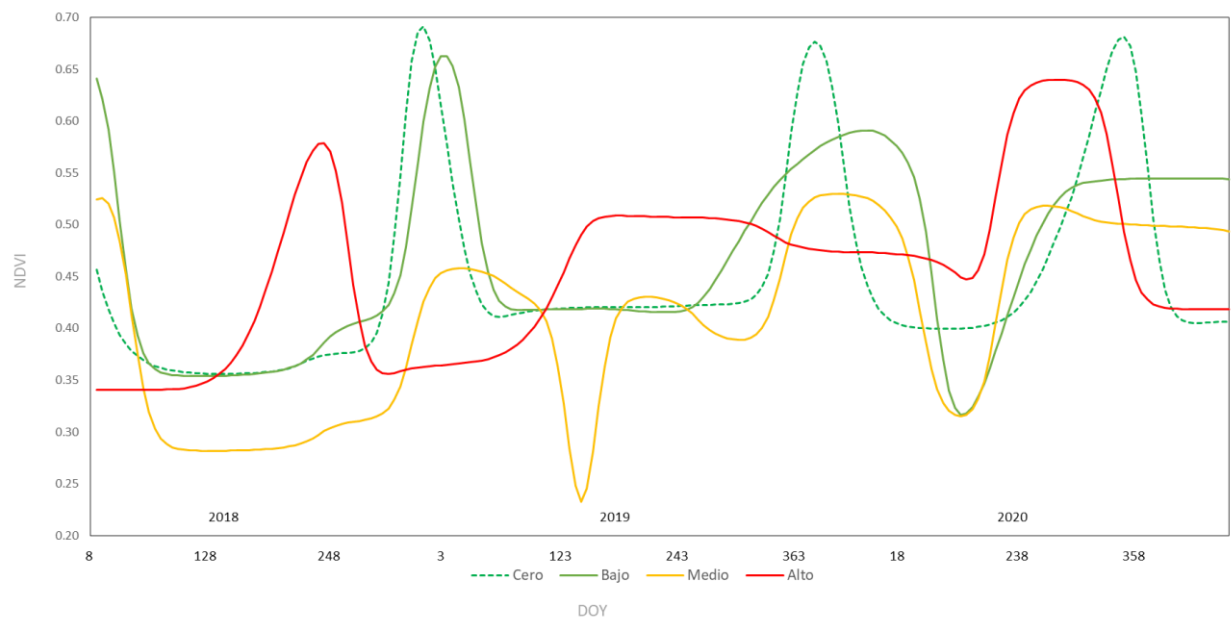
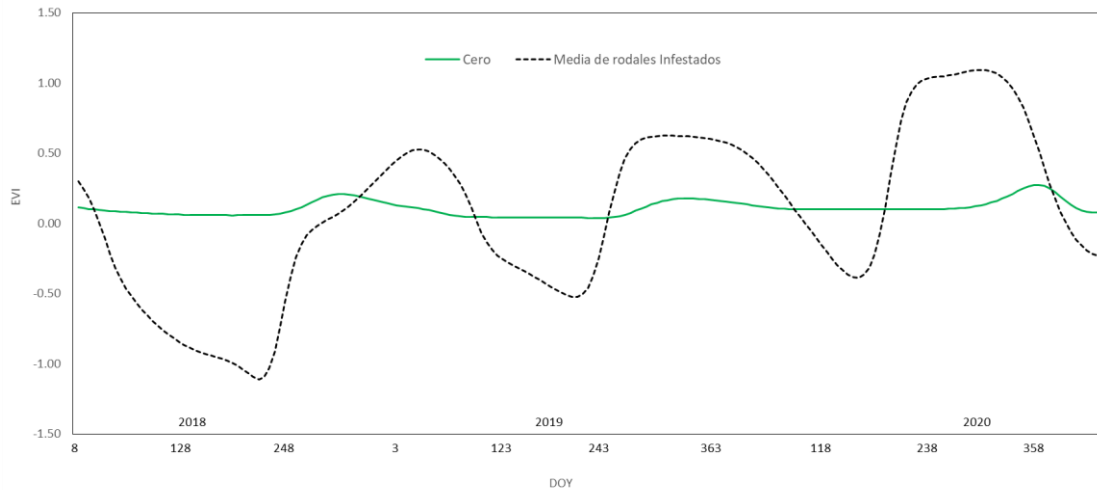


Figura 9. Curvas fenológicas obtenidas a partir de IV - NDVI



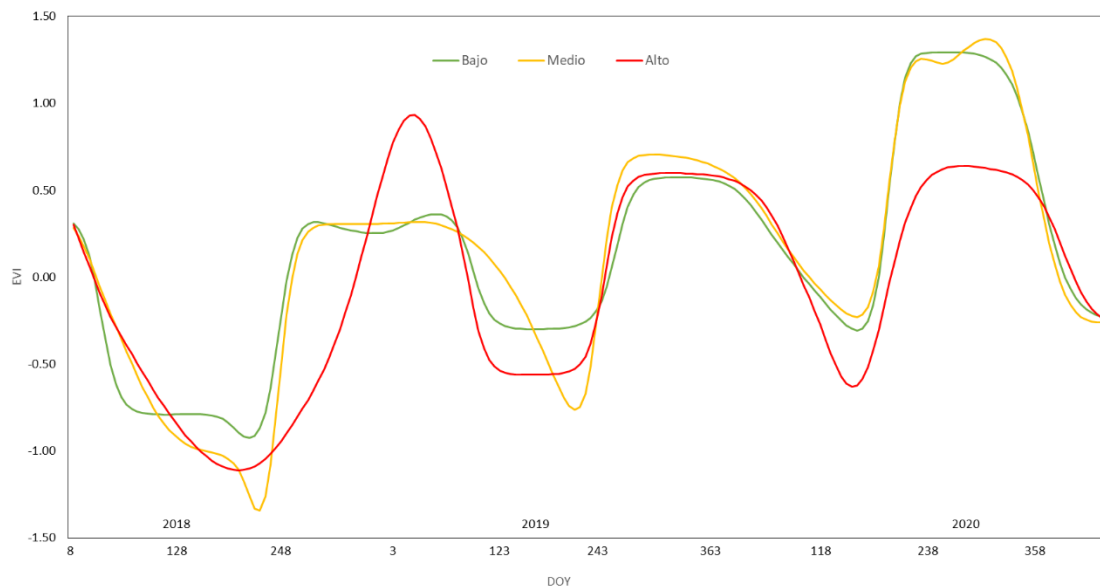
### 5.2.2. Curva media obtenida con el índice EVI

En la figura 10 se puede observar la curva fenológica para la categoría Cero y la curva media obtenida entre las categorías Bajo, Medio y Alto.



**Figura 10. Curvas medias obtenidas por el IV-EVI**

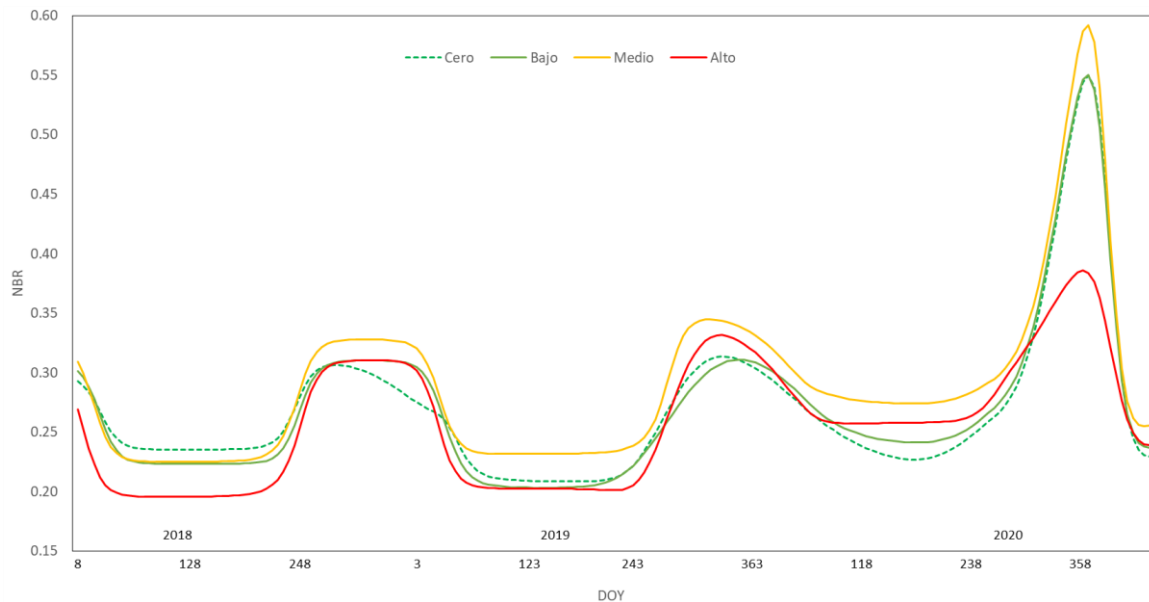
Es destacable que la curva media de EVI de la categoría Cero (ver Figura 10) no toma valores negativos y tiene unos máximos poco marcados a principios del invierno; el resto del año los valores de EVI son bastante constantes. En las demás categorías (Ver Figura 11), por el contrario, se evidencian valores muy bajos a final de verano (DOY~240), sobre todo de otoño e invierno de la tercera estación en la categoría Alto, posiblemente por la presencia de procesionaria en los rodales.



**Figura 11. Curvas medias obtenidas por el IV-EVI**

### 5.2.3. Curva media obtenida con el índice NBR

Como se puede observar en la figura 12, las curvas fenológicas obtenidas a partir del IV-NBR, para las categorías Cero, Bajo y Medio presentan el mismo comportamiento, con valores altos en invierno (DOY 358)

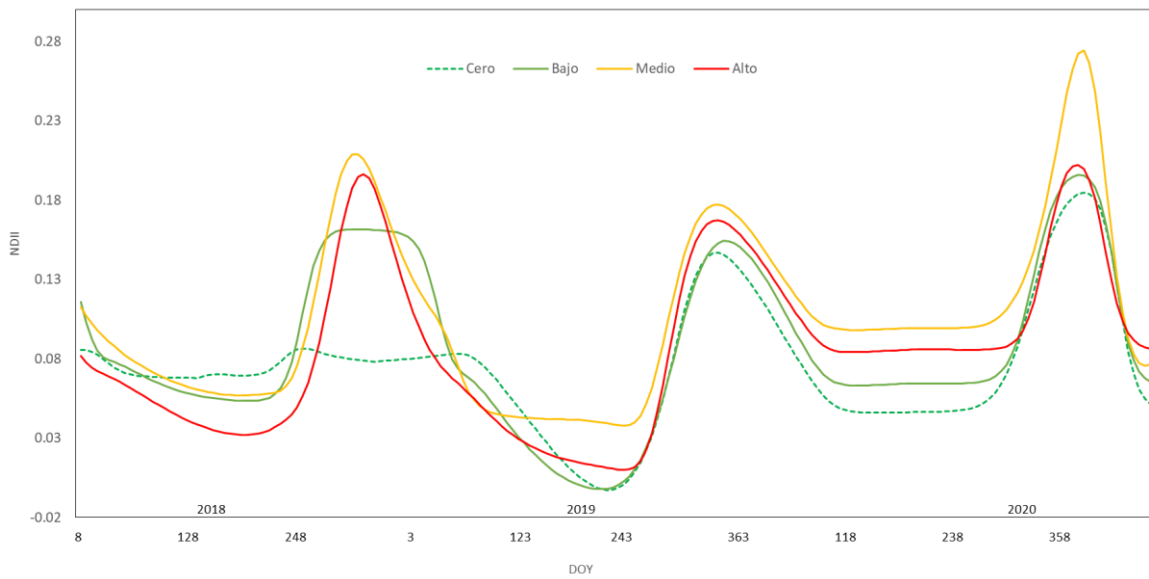


**Figura 12. Curvas medias de NBR por nivel de infestación acumulada**

Adicionalmente, el índice NBR marca una clara diferencia entre los rodales de la categoría Alto y las otras con valores bajos al inicio de la primera estación, pero lo más relevante el pico más alto en invierno de la tercera estación (DOY ~358), que alcanza un NBR igual a 0.6 que según la USGS corresponden a zonas con gravedad moderada-alta debido posiblemente a la ocurrencia de un brote fuerte de procesionaria.

### 5.2.4. Curva media obtenida con el índice NDII

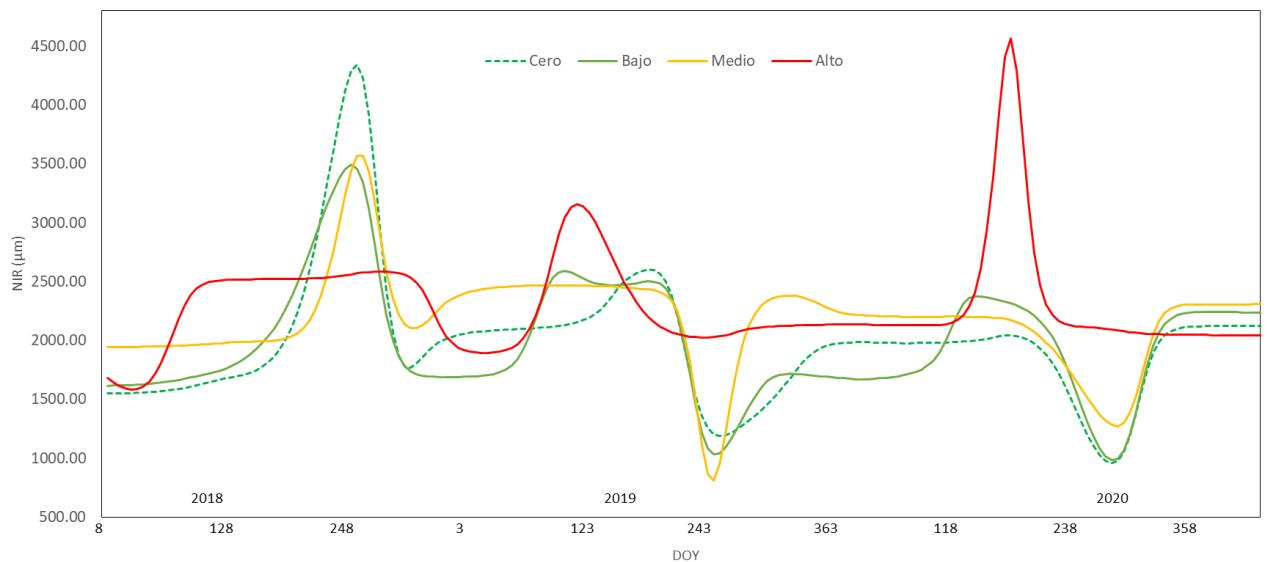
La curva fenológica de la categoría Cero presenta los valores más bajos de NDII, además se identifica el pico más bajo en el verano de la segunda estación (DOY 240) y el más alto en el invierno de la tercera estación (DOY ~ 358), por otra parte las categorías Medio y Alto tienen un comportamiento similar en las tres estaciones, con valores máximos en invierno siendo el más alto el de la tercera estación (DOY ~ 358). Los rodales de la categoría Media presentan valores más altos de NDII y las otras categorías. (Ver figura 13)



**Figura 13. Curvas medias de NDII por nivel de infestación acumulada**

### 5.2.5. Curva media obtenida con el NIR

En la Figura 14 se observa las curvas fenológicas obtenidas con la media de cada rodal considerando solamente la banda del NIR. Se identifica para la categoría Alto un pico en inicio del verano de 2020, mientras que la categoría Bajo y Cero poseen valores menores aunque tienen picos altos en el otoño del 2018. Sin embargo no se diferencian estaciones marcadas.

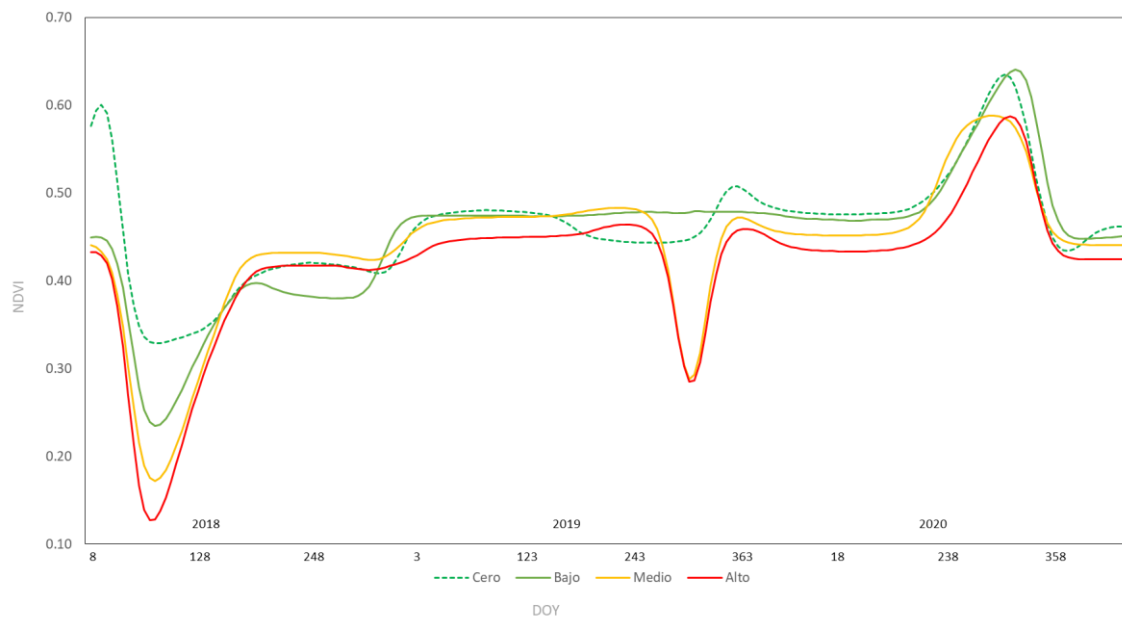


**Figura 14. Curvas medias por nivel de infestación NIR**

### 5.3. Curvas fenológicas medias por categoría de infestación acumulada (Mediana)

#### 5.3.1. Curva media obtenida con el índice NDVI (mediana)

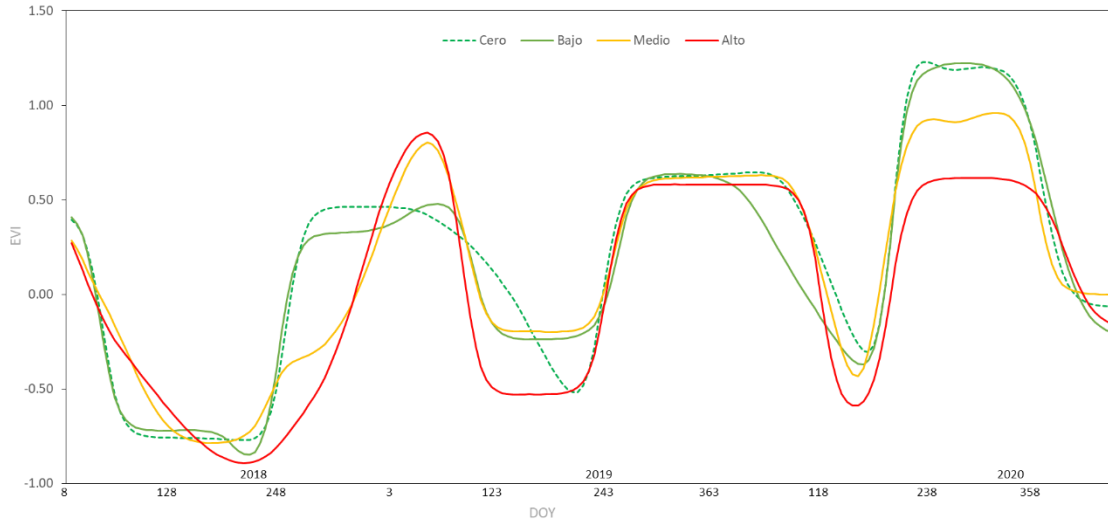
Como se puede observar en la Figura 15 las categorías Medio y Alto son las que poseen menor valor de NDVI comparada con las categorías Cero y Bajo. Además existe un pico máximo en la tercera estación (DOY 320) para todas las categorías que coincide con el fin del otoño de 2020.



**Figura 15. Curvas medias por nivel de infestación NDVI Mediana**

#### 5.3.2. Curva media obtenida con el índice EVI (mediana)

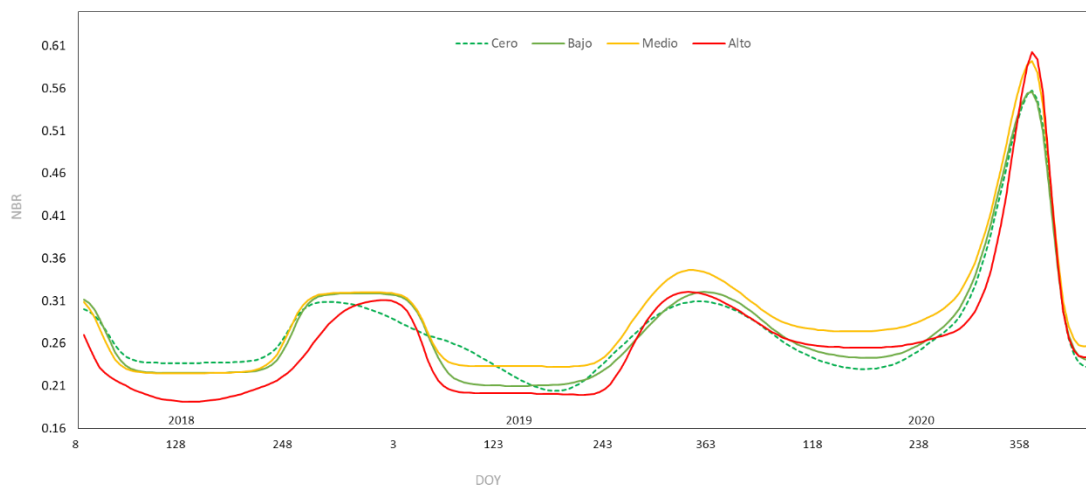
Es destacable que la curva media de EVI obtenida con la media para las categorías Bajo, Medio y Alto (ver figura 10) es similar a la obtenida con la mediana (ver Figura 16). Las categorías Cero y Bajo tienen los valores más altos de EVI para la segunda y tercera demostrando la salud de los rodales, por el contrario, se evidencian valores bajos de EVI en la tercera estación de la categoría Alto, posiblemente por la presencia de procesionaria en los rodales, coincidiendo con los resultados obtenidos con la media.



**Figura 16. Curvas medias por nivel de infestación EVI Mediana**

### 5.3.3. Curva media obtenida con el índice NBR

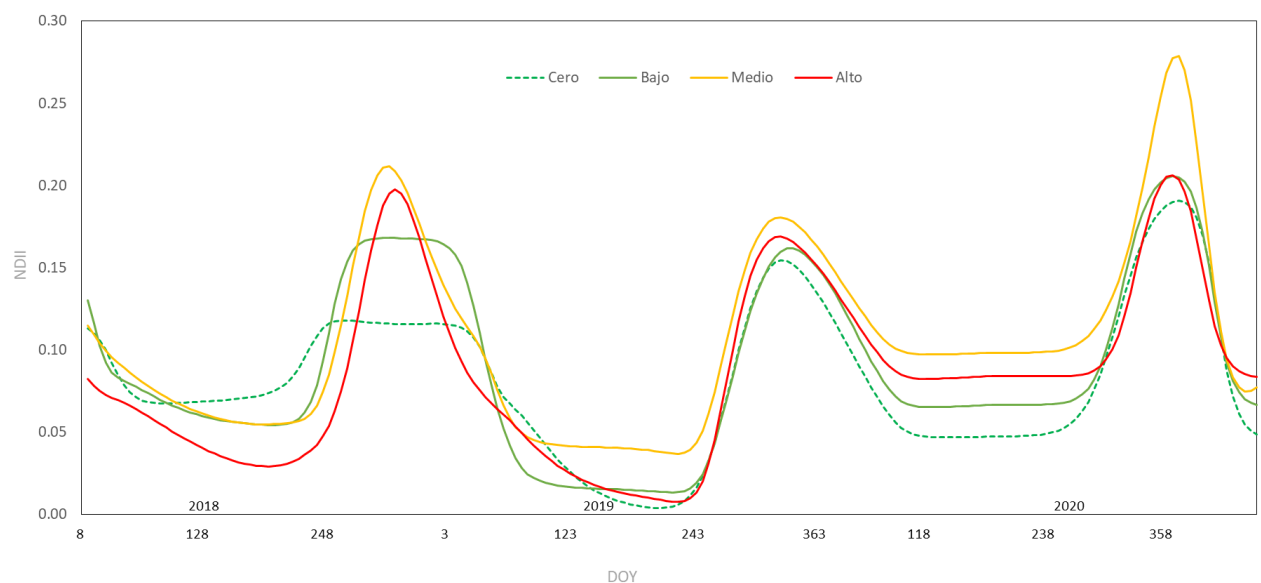
La curva fenológica de las cuatro categorías tienen un comportamiento similar a lo largo de los tres ciclos, el rango de valores de NBR está entre 0.16 y 0.61, según la USGS corresponden a zonas estables o en crecimiento de la vegetación es decir son zonas estables sin infección, El pico más alto para las cuatro categorías coinciden en el invierno de la tercera estación (DOY ~ 365), los rodales de la categoría Media presentan valores más altos de NBR en la segunda estación. (Ver figura 17)



**Figura 17. Curvas medias por nivel de infestación NBR Mediana**

### 5.3.4. Curva media obtenida con el índice NDII

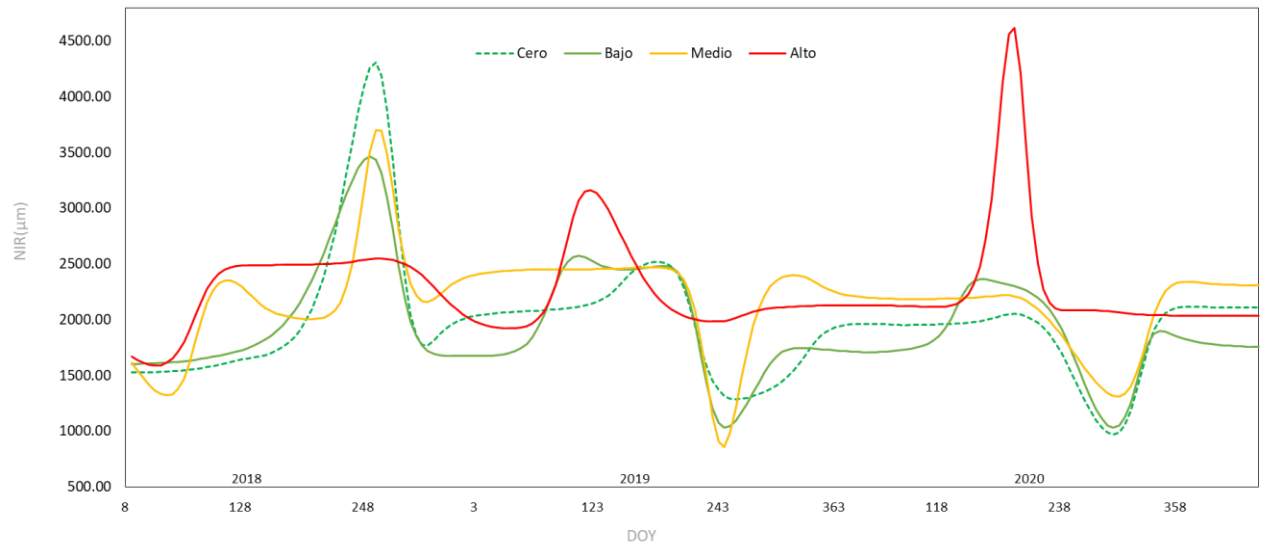
Como se observó en la figura 13 las curvas obtenidas con la mediana son similares a sus homologas realizadas con la media. La curva fenológica de la categoría Cero presenta los valores más bajos de NDII, además se identifica el pico más bajo en verano de la segunda estación (DOY 240) y el más alto en el invierno de la tercera estación (DOY ~ 358), por otra parte las categorías Medio y Alto tienen un comportamiento similar en las tres estaciones, con valores máximos en invierno siendo el más alto el de la tercera estación (DOY ~ 358). Los rodales de la categoría Medio presentan valores más altos de NDII. (Ver figura 18)



**Figura 18. Curvas medias por nivel de infestación NDII Mediana**

### 5.3.5. Curva media obtenida con la banda del NIR

Las curvas fenológicas representadas en la figura 19 tienen un comportamiento similar a las obtenidas con la media de cada rodal. Se identifica para la categoría Alto un pico en inicio del verano de 2020, mientras que las categorías Cero, Bajo y Medio presentan un pico el otoño (DOY 260) de la primera estación. Tampoco son concluyentes como sus homologas realizadas con la media.

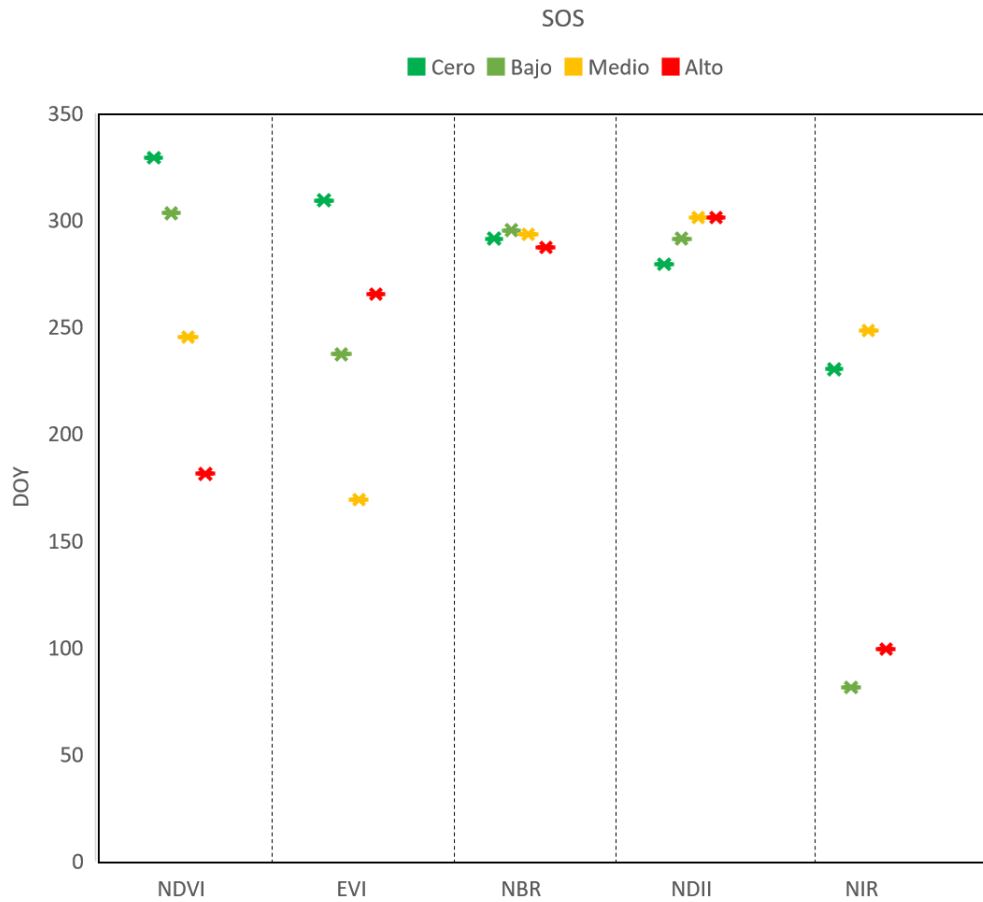


**Figura 19. Curvas medias por nivel de infestación NDII Mediana**

#### 5.4. Parámetros fenológicos de las curvas medias (media)

Las Figuras 20, 21, 22 y 23 representan los valores medios de los parámetros fenológicos de la serie temporal obtenidos por IV y categoría de infestación acumulada: Cero, Bajo, Medio y Alto.

## Inicio de estación (SOS)

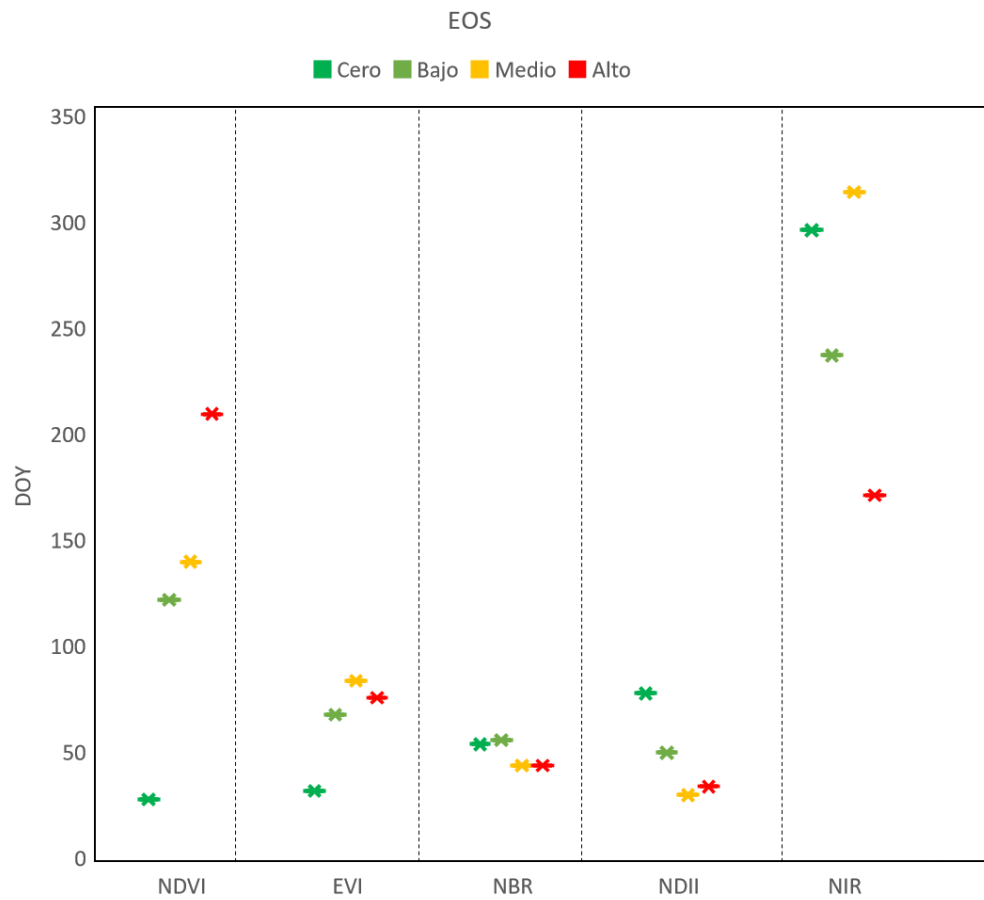


**Figura 20. Inicio de estación por categoría y IV**

El NDVI muestra una gradación clara en el inicio de estación, siendo de media antes en rodales con infestación Alta y más tardía en rodales no infestados. El inicio de estación promedio se produce entre el DOY 170 para rodales infestados y el DOY 340 en rodales no infestados. NBR y NDII no marcan diferencias claras en el inicio de estación de las distintas categorías, y los índices EVI y NIR muestran resultados de difícil interpretación. NIR marca unos valores de inicio de estación bastante más tardíos que los otros índices (ver figura 20).



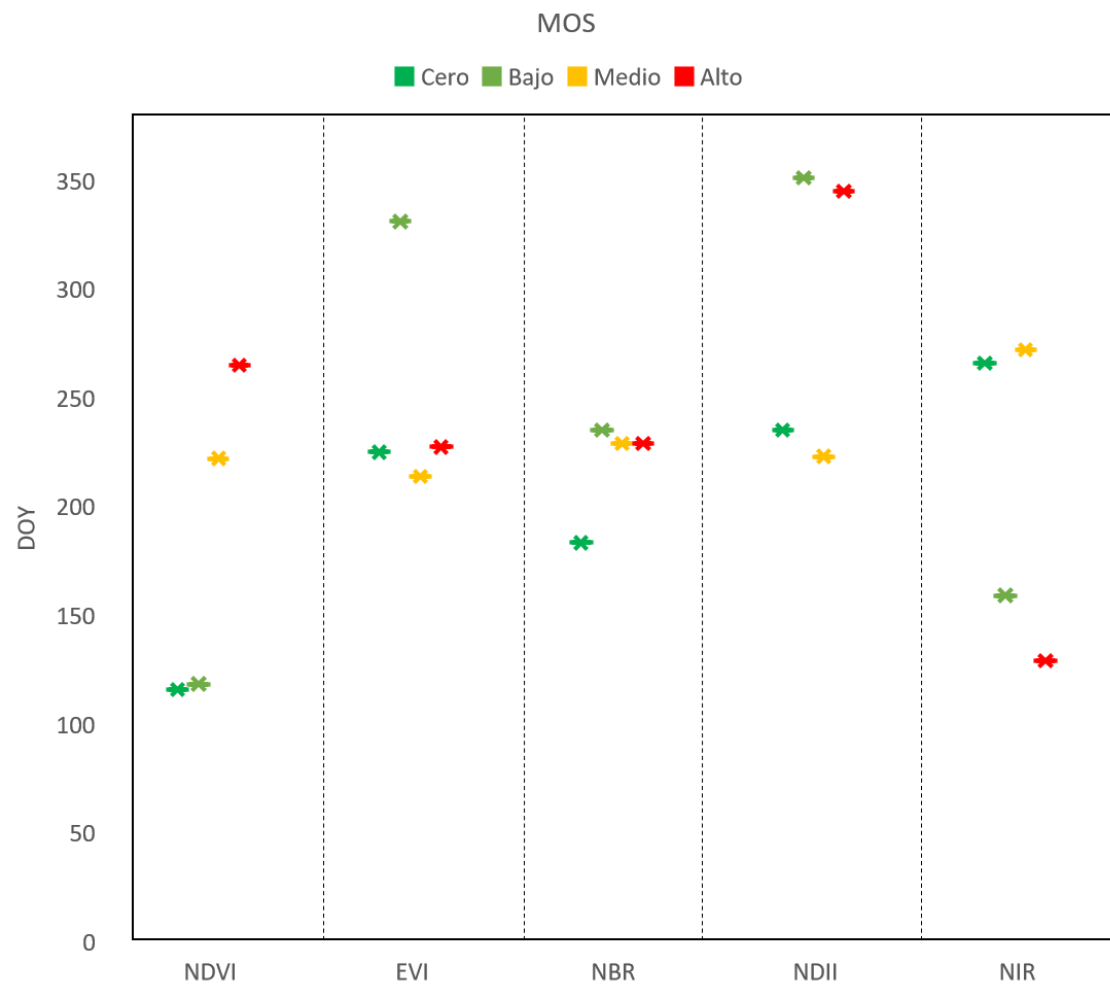
## Fin de Estación (EOS)



**Figura 21. Fin de estación por categoría y IV**

De nuevo el NDVI es el IV que mejor diferencia el parámetro fin de estación entre categorías de infestación acumulada, siendo el grupo Cero el que finaliza antes y el grupo Alto el de más tardía finalización de temporada. Los índices EVI, NBR y NDII muestran los valores más bajos de fin de estación para todos los grupos y NIR los más altos (ver figura 21).

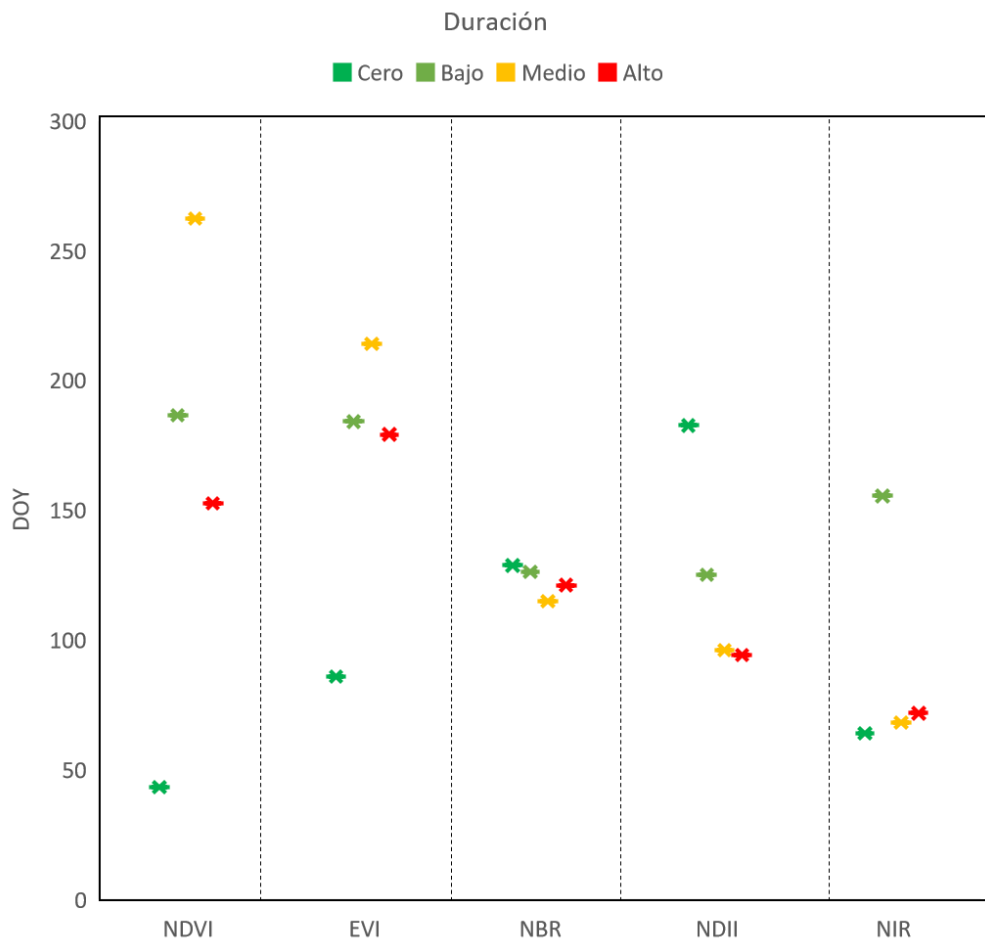
## DOY de Máximo Valor de la Estación



**Figura 22. DOY de máximo valor de estación por categoría y IV**

Una vez más el NDVI es el IV que mejor diferencia el parámetro MOS entre categorías de infestación acumulada, siendo el grupo Cero el que finaliza antes y el grupo Alto el que más tarda en tener el valor máximo de NDVI en la estación. Lo cual complementa lo analizado en la figura 21 de EOS. Los índices EVI, NBR y NDII muestran los valores más altos en el DOY 240 que coincide con el fin del verano.

## Duración de la estación



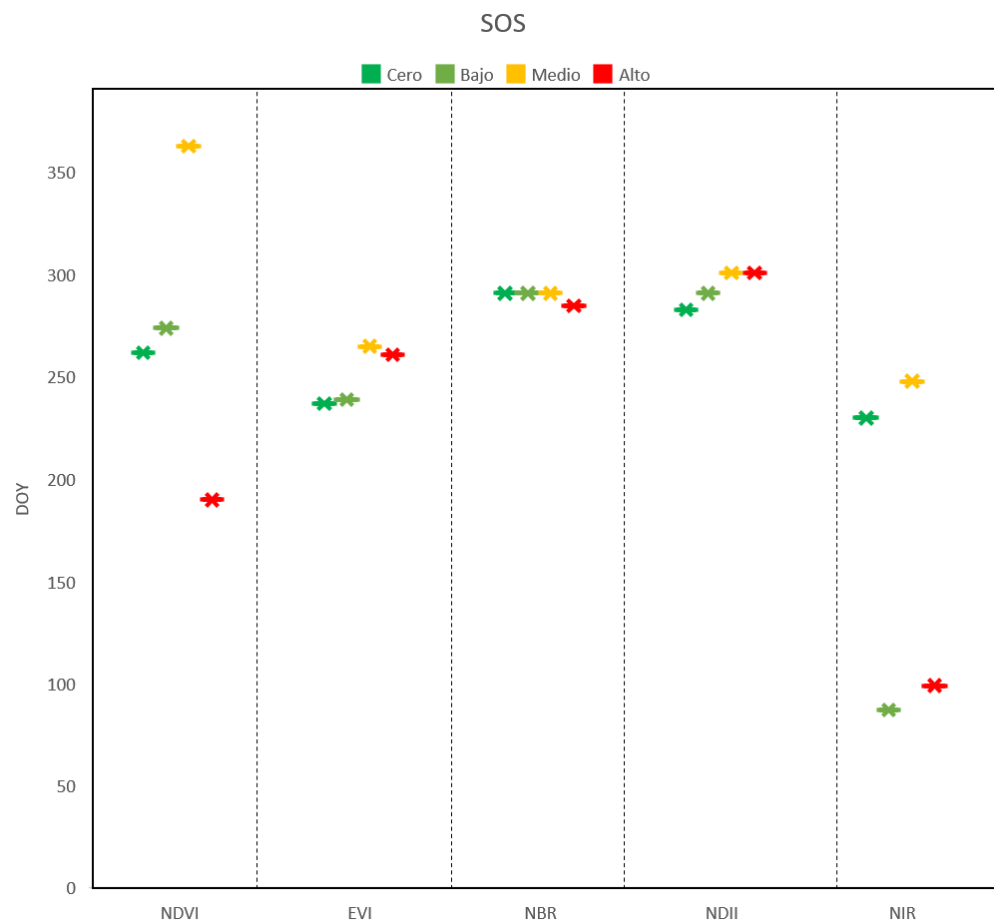
**Figura 23. de estación por categoría y IV**

NDII es el IV que mejor categoriza la duración de estación por categorías de infestación acumulada, mostrando una duración más corta, como promedio, el grupo de rodales en categoría Alto, y una duración más larga (como promedio) el grupo de rodales en categoría Cero. NDVI muestra un rango muy amplio en la duración de estación entre categorías de infestación acumulada.

## 5.5. Parámetros fenológicos de las curvas medias (media)

### Inicio de la estación (SOS)

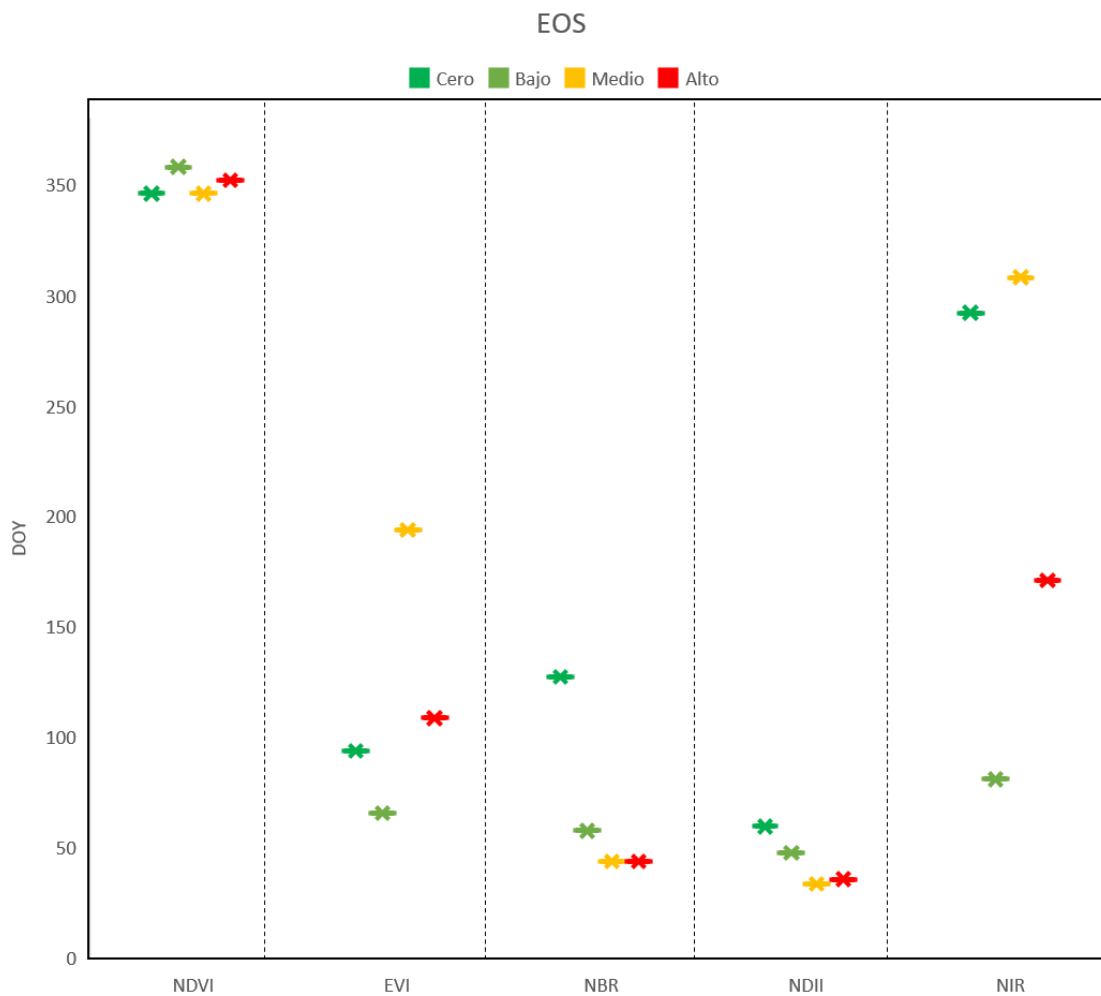
El NDVI no coincide con lo obtenido anteriormente, para este caso el índice EVI diferencia el parámetro inicio de estación entre categorías de infestación acumulada, siendo el grupo Cero el que inicia antes y el grupo Alto el de más tardía iniciación de temporada. El inicio de estación promedio se produce entre el DOY 260 para rodales infestados y el DOY 240 en rodales no infestados. NBR no marca diferencias claras en el inicio de estación de las distintas categorías, en este caso el índice NDII muestra un inicio de estación tardía para los rodales infestados a partir de DOY 300 y para los rodales no infestados DOY 270, el NIR muestran resultados de difícil interpretación. NIR marca unos valores de inicio de estación para las categorías Bajo y Alto bastante tarde que los otros índices. (Ver figura 24)



**Figura 24. Inicio de estación por categoría y IV**

## Fin de la estación (EOS)

El NDVI en este caso no coincide con lo obtenido con las anteriores curvas sin embargo el índice EVI diferencia el parámetro EOS para la categoría alto (DOY 120) más tarde que para los rodales con Bajo y Cero desde DOY 55. NBR y NDII muestran los valores más tempranos de fin de estación para todos los grupos Medio y Alto (DOY 48) y NIR es difícil de interpretar. (Ver figura 25)

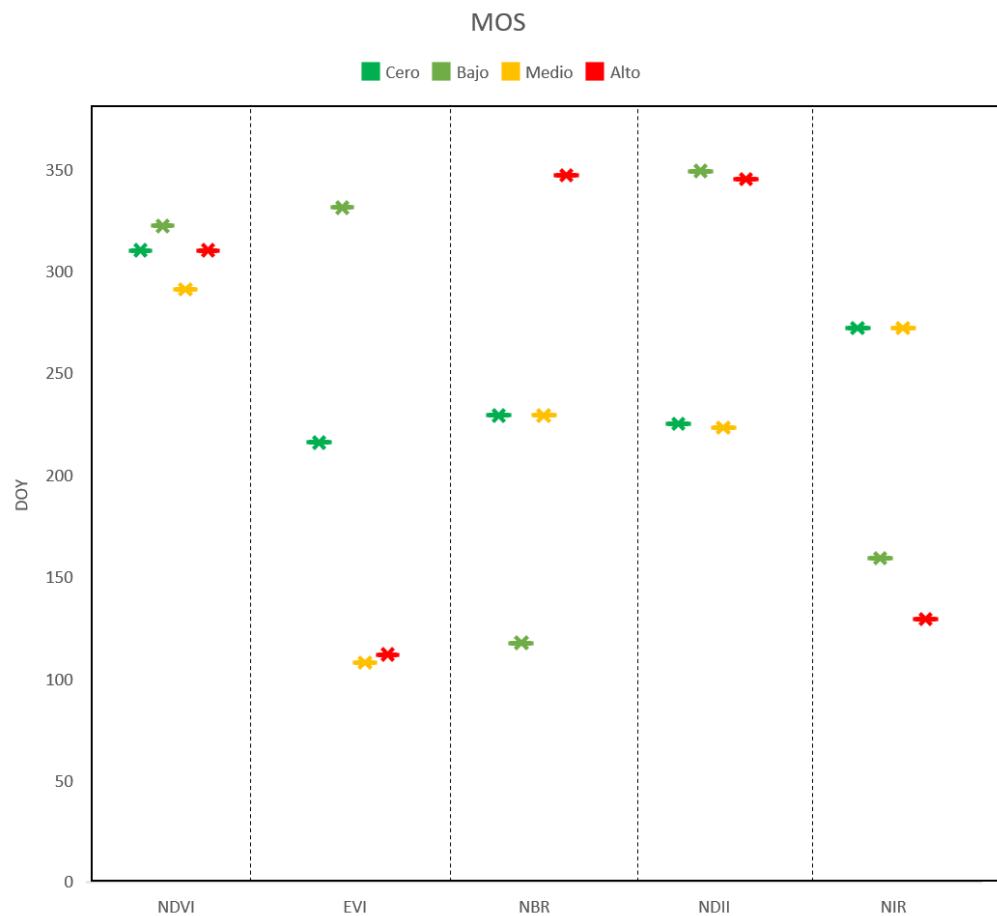


**Figura 25. Fin de estación por categoría y IV**

## DOY máximo de la estación (MOS)

En la figura 26 se observa que los puntos máximos según el índice NDVI son en invierno desde el DOY 290. El MOS del índice EVI para la categoría Medio y Alto es en DOY 100 inicios de primavera, finalmente el MOS para la categoría Alta obtenida con los índices NBR y NDII indican

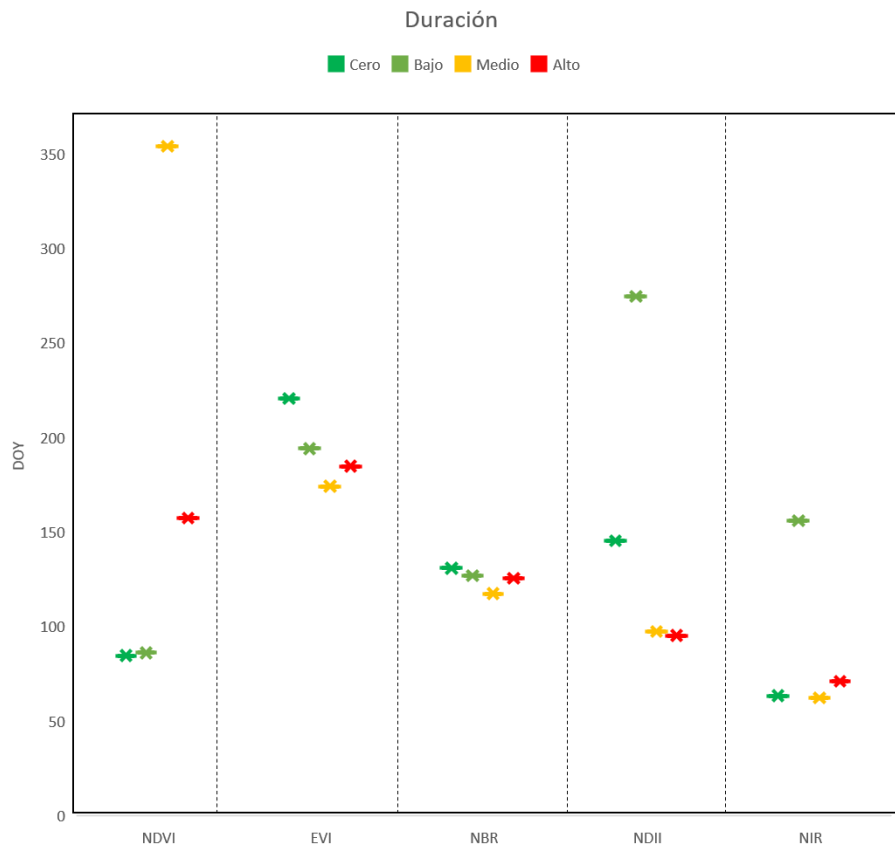
que el valor máximo de la estación se presenta en invierno. Una vez más los resultados obtenidos con NIR son difícil interpretación.



**Figura 26. DOY de máximo valor de estación por categoría y IV**

### Duración de la estación

EVI, NBR y NDII son el IVs que mejor categorizan la duración de estación por categorías de infestación acumulada, mostrando una duración más corta, como promedio, el grupo de rodales en categoría Medio, y una duración más larga (como promedio) el grupo de rodales en categoría Cero. NDVI muestra un rango muy amplio en la duración de estación entre categorías de infestación acumulada.



**Figura 27. Duración de la estación por categoría y IV**

## 5.6. Comparación de los parámetros fenológicos de los rodales por IV

Se compararon algunos parámetros fenológicos para verificar la capacidad de la metodología y detectar desviaciones en la fenología de los rodales infestados por procesionaria. A continuación se muestran las tablas que resumen la comparación de las categorías de los rodales donde las celdas de color rojo son aquellas que representan diferencias entre categorías y las de tono azulado representan categoriales sin diferencias significativas.

## Parámetro fenológico SOS

La categoría medio es aquella categoría que tiene diferencias significativas en el parámetro inicio de estación en casi todas las estaciones y con los diferentes índices coincidiendo con lo que se observa en los resultados de las curvas fenológicas medias. El índice EVI y NBR son los que menos diferencias entre categorías encuentran, al contrario de los índices NDVI, NDII y NIR que son los que encuentran diferencias significativas entre grupos. Este análisis es similar en los resultados con la media y con la mediana (ver tabla 8)

**Tabla 8. Comparación entre IV y categorías por rodal parámetro SOS**

<i>Media NDVI</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3

<i>Mediana NDVI</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3

<i>Media EVI</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3

<i>Mediana EVI</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3

<i>Media NBR</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3

<i>Mediana NBR</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3

<i>Media NDII</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3

<i>Mediana NDII</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3

<i>Media NIR</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3

<i>Mediana NIR</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3



## Parámetro fenológico EOS

Para parámetro EOS se encontraron diferencias significativas entre la categoría Medio y Alto, para la primera estación, además existe disimilitud entre las categorías Medio-Bajo y Medio-Cero en las estaciones 2 y 3 según el índice NDVI extraído con la media. Los índices que menor cantidad de diferencias significativas presentan entre categorías son el NBR y NDII (media y mediana) y el EVI extraído con la mediana. El NIR (media) presenta diferencias significativas entre todas las categorías de la segunda y tercera estación sobretodo reafirma las diferencias entre los rodales de categoría Medio. (Ver Tabla 9)

**Tabla 9. Comparación entre IV y categorías por rodal parámetro EOS**

<i>Media NDVI</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3

<i>Mediana NDVI</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	2	3	4	2	3	4	2	3	4

<i>Media EVI</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3

<i>Mediana EVI</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3

<i>Media NBR</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3

<i>Mediana NBR</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3

<i>Media NDII</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3

<i>Mediana NDII</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3

<i>Media NIR</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3

<i>Mediana NIR</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3

## Parámetro fenológico Duración de la estación

En cuanto el parámetro duración de la estación se encontraron diferencias significativas para la primera estación de los índices NDVI y NDII (media) entre la categoría Alto y las categorías Medio, Bajo y Cero, el índice NBR es el que menor diferencias encuentra (ver Tabla 10).

**Tabla 10. Comparación entre IV y categorías por rodal parámetro Duración**

<i>Media NDVI</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3

<i>Mediana NDVI</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3

<i>Media EVI</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3

<i>Mediana EVI</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3

<i>Media NBR</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3

<i>Mediana NBR</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3

<i>Media NDII</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3

<i>Mediana NDII</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3

<i>Media NIR</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3

<i>Mediana NIR</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3

## Parámetro fenológico MOS

Nuevamente el índice NDVI es el que encuentra el mayor número de diferencias significativas entre las categorías estudiadas, seguido del EVI y NIR. Que menor disimilitudes evidencia es el NBR y una vez más la categoría que menor semejanzas tiene es la categoría Medio. (Ver Tabla 11)

**Tabla 11. Comparación entre IV y categorías por rodal parámetro EOS**

<i>Media NDVI</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3

<i>Mediana NDVI</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3

<i>Media EVI</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3

<i>Mediana EVI</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3

<i>Media NBR</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3

<i>Mediana NBR</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3

<i>Media NDII</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3

<i>Mediana NDII</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3

<i>Media NIR</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3

<i>Mediana NIR</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3

## Parámetro fenológico Máximo valor de la estación

El parámetro Max es el que mayores diferencias presenta en todas las categorías y con todos los índices, el NDVI, el EVI y el NIR son los que mejor identifican las diferencias para este parámetro.

**Tabla 12. Comparación entre IV y categorías por rodal parámetro EOS**

<i>Media NDVI</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3

<i>Mediana NDVI</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3

<i>Media EVI</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3

<i>Mediana EVI</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3

<i>Media NBR</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3

<i>Mediana NBR</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3

<i>Media NDII</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3

<i>Mediana NDII</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3

<i>Media NIR</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3

<i>Mediana NIR</i>	Alto			Bajo			Cero		
Medio	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cero	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estaciones	1	2	3	1	2	3	1	2	3

## 6. DISCUSIONES

El objetivo principal de este trabajo fue caracterizar y comparar la espectro fenología en rodales de pino infestados o no infestados por procesionaria a partir de series de datos Sentinel-2, como se demuestra en los resultados tanto en el apartado de Curvas fenológicas medias, como en los apartados 5.5 y 5.6 se confirma la viabilidad de la utilización de sensores Sentinel-2 MSI para la detección de plagas. Coincidiendo con lo expuesto por Hawryło, *et al.*, 2018 destacando la contribuir de este sensor a los sistemas de vigilancia forestal. Adicional a esto,

gracias a la caracterización, se pudo identificar que la especie con mayor número de rodales de categoría alto es la *P. nigra* coincidiendo con lo expuesto por López, 2014 en su estudio de la dinámica poblacional de la procesionaria.

Aunque el NDVI es el VI más utilizado en contexto de la evaluación de la defoliación forestal por Rullan-Silva *et al.*, 2013 no se obtuvo los resultados esperados en cuanto a la curva fenológica media, por el contrario los índices que mejor se ajustaron a la serie temporal fueron EVI y NDII. Sin embargo para el análisis por rodal se identificaron diferentes respuestas espectrales de acuerdo a la categoría de infestación, y a las cualidades topográficas y climáticas de cada rodal. Lo cual se evidencia en el trabajo realizado por Aragonés *et al.*, 2019 en donde se identifica diferencias significativas en las curvas fenológicas según la especie de pino, obteniendo los picos máximos en invierno producto de la relación e importancia del clima en los índices de vegetación. Así también Sangüesa *et al.* 2014 afirma que la respuesta espectral no solo estará condicionada por las defoliaciones acaecidas, sino también, por las características climáticas del año anterior.

Aunque el análisis para el NIR medio no generó los resultados esperados se identificaron diferencias significativas en el análisis por rodal, esto puede deberse a la heterogeneidad de especies, orientación y altitud en los rodales estudiados

El índice NBR detecta cambios en las curvas medias para las categorías de infestación y se evidencia un aumento del valor de NBR en el invierno del 2020 correspondiente con la tercera estación, sin embargo al realizar el análisis por rodal no se evidencian diferencias entre las categorías analizadas. En el estudio Hawryło, *et al.*, 2018 también se esperaba que los valores de NBR estuvieran correlacionados negativamente con la defoliación sin embargo no sucedió.

Las curvas fenológicas modeladas con el índice de humedad (NDII) calculado tanto con la media y la mediana, presentan tres estaciones, con picos máximos en invierno. Pero al realizar el análisis por rodal no presentan diferencias significativas entre categorías. En base a los resultados obtenidos en este trabajo, se puede afirmar que es posible diferenciar las categorías de infestación acumulada planteadas.

## 7. CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos en las diferentes etapas de este estudio para las cuatro categorías de infestación acumulada Cero, Bajo, Medio, Alto, demuestran la funcionalidad de

las imágenes Sentinel-2 MSI para extraer información multitemporal permitiendo identificar variaciones en la fenología causadas por la procesionaria de pino.

- El índice de vegetación NDVI es el que mejor refleja las defoliaciones por rodal. Mientras que su corrección EVI para el cálculo de la curva media presenta mejores resultados. En general, la categoría alto presentada un menor valor de NDVI, EVI y NDII, y un mayor valor de NBR. Los resultados obtenidos con la media estadística detectaron mejor las diferencias fenológicas categorías acumuladas por rodales.

- Los parámetros fenológicos obtenidos con el NDVI demuestran que existe un gradiente entre las categorías Cero, Bajo, Medio y Alto para los parámetros SOS, EOS y MOS lo que indica que existen desviaciones en la fenología de los pinos según su nivel de infestación acumulada. Así mismo los IVs que diferencian mejor las categorías de infestación por rodal individual son NDVI y el NDII. Mientras que para la curva media el IV que representa mejor la fenología de los pinos y los parámetros son los valores EVI y de NDII.

## 8. REFERENCIAS

Amat, J. R., (2020) Pagina web de RPubS. Disponible en: [https://rpubs.com/Joaquin\\_AR/575169](https://rpubs.com/Joaquin_AR/575169) (Accedido: 6 Agosto 2021).

Aragones D, Rodriguez V y Caparros J, (2019) "Could land surface phenology be used to discriminate Mediterranean pine species?". *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*,(78), pp-281-294

Ayuntamiento de Aracena, (2015). Procesionaria del pino Pagina web del Ayuntamiento de Aracena. Disponible en: <http://www.aracena.es/es/areas-tematicas/medio-ambiente/Plagas-y-enfermedades/procesionaria-del-pino.html> (Accedido: 6 de septiembre del 2021).

Beurs, K. M. y Townsend, P. A., (2008). "Estimating the effect of gypsy moth defoliation using MODIS". *Remote Sensing of Environment*, 112(10), pp. 3983-3990.

Cayueta, L., Hernández, R., Hódar, J., Sánchez, G. y Zamora, R. (2014). Tree damage and population density relationships for the pine processionary moth: Prospects for ecological research and pest management. *Forest Ecology and Management*, Volumen 328, pp. 319-325.

Centro de Sanidad Forestal de Calabazanos, (2020). "La procesionaria del pino. Documento divulgativo". *Palencia: Consejería de Fomento y Medio Ambiente Junta de Castilla y León*.

DÉMOLIN, G. (1969b): "Bioecología de la "Procesionaria del pino" *Thaumetopoea pityocampa* Schiff. Incidencia de los factores climáticos ". *Boletín del Servicio de Plagas Forestales*, (23) 9-22.

Gomez, D. F. y otros, (2020). "Ability of Remote Sensing Systems to Detect Bark Beetle Spots in the Southeastern US", *Forests*, (11), p. 1167.

Hall, R. J., Castilla, G., White, J., Cooke, B. y Skakun, R. (2016). "Remote sensing of forest pest damage: a review and lessons learned from a Canadian perspective", *The Canadian Entomologist*, 148(S1), pp. S296-S356.

Hawryło, P., Bednarz, B., Wężyk, P. y Szostak, M., (2018). "Estimating defoliation of Scots pine stands using machine learning methods and vegetation indices of Sentinel-2", *European Journal of Remote Sensing*, 51(1), pp. 194-204.

Hódar, J. A., Zamora, R. and Cayuela, L., (2021). "Cambio climático y plagas: algo más que el clima. Ecosistemas", 21 (3), pp. 73-78.

Huete, B. N., (1988). "A soil-adjusted vegetation index (SAVI)". Remote Sensing of Environment, Volumen 25, pp. 295-309.

Jactel, H. y otros, (2015). "Insect – Tree Interactions in *Thaumetopoea pityocampa*. En: A. Roques, ed. Processionary Moths and Climate Change: An Update". Francia: Editions Quæ, pp. 262-282.

Junta de Andalucía, (2013). Plan de lucha integrada contra la procesionaria del Pino en la Comunidad Autónoma de Andalucía, Andalucía: Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del territorio.

Junta de Castilla-La Mancha. (2019) *Página Web del Plan de lucha integrada contra la procesionaria del pino en Castilla-La Mancha*. Disponible en: Plan de lucha integrada contra la procesionaria del pino en Castilla-La Mancha. (Accedido: 6 de agosto del 2021)

inFOREST, (2009) *Página Web del Ayuntamiento de Cuenca*. Disponible en: [https://www.cuenca.es/\\_Inforest/](https://www.cuenca.es/_Inforest/).(Accedido: 15 Julio del 2021)

Key, C. H., (2006). "Ecological and sampling constraints on defining landscape fire severity" *Fire Ecology*, pp. 34-59.

Lausch, A. y otros, (2013). "Forecasting potential bark beetle outbreaks based on spruce forest vitality using hyperspectral remote-sensing techniques at different scales." *Forest Ecology and Management*, 308 (1), pp. 76-89.

Lopez Emili S. (2014) Estudio de la dinámica poblacional del lepidóptero *Thaumetopoea pityocampa* (Denis & Schiffermüller, 1775) (Notodontidae) en la provincia de Valencia (España). Tesis doctoral. Universidad de Valencia

Lu, D., Mausel, P., Brondízio, E. y Moran, E., (2004). "Relationships between forest stand parameters and Landsat TM spectral responses in the Brazilian Amazon Basin". *Forest Ecology and Management*, 198(1-3), pp. 149-167.

The MathWorks, Inc. (2021), *Página web de Matlab*. Matemáticas, programación y gráficas. Disponible en: <https://es.mathworks.com/products/matlab.html> (Accedido: 7 de septiembre del 2021)



Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, (2016). Página web de Las Redes Europeas de Seguimiento de Bosques (Nivel I y Nivel II). Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/inventarios-nacionales/redes-europeas-seguimiento-bosques/default.aspx#ancla5>. (Accedido: 6 de septiembre del 2021)

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.

Montoya, R. y Hernández, R., (1998). "La procesionaria del pino". *Plagas de insectos en las masas forestales españolas*. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, pp. 67-84.

Pérez, J., Navarro, R., Palacios, G., Acosta C., y Mesas, F. (2019). Improvement of Remote Sensing-Based Assessment of Defoliation of Pinus spp. Caused by *Thaumetopoea pityocampa* Denis and Schiffermüller and Related Environmental Drivers in Southeastern Spain. *Remote Sensing*, 11(14).

Romanky, N. (1966): "Plagas forestales más importantes de España". *Boletín del Servicio de Plagas Forestales*, 9 (17): 83-96.

Rullan-Silva, C. D., Olthoff, A. E., Delgado de la Mata, J. A. y Pajares, A., (2013). Remote monitoring of forest insect defoliation. A review. *Forest Systems*, 22 (3), pp. 377-391.

Sangüesa, G., Camarero, J., García, A., Hernández, R., y Riva, J. (2014). "Remote-sensing and tree-ring based characterization of forest defoliation and growth loss due to the Mediterranean pine processionary moth". *Forest Ecology and Management*, Volumen 320, pp. 171-181.

Seixas, A., Oliveira, I. y Santos, J., (2011) "Climate change and forest plagues: the case of the pine processionary moth in Northeastern Portugal". *Forest Systems*. pp. 508-515.

Tuominen, J., Lipping, T., Kuosmanen, V. y Haapanen, R. (2009) "Remote Sensing of Forest Health". En: P. P. Ho, ed. *Geoscience and Remote Sensing*. pp.29-52

Vallejo-Bombín, R., (2005). El mapa forestal de España escala 1:50.000 (MFE50) como base del tercer inventario forestal nacional. *Cuad. La Soc. Española Ciencias For.* 19, pp. 205–210. doi: <https://doi.org/10.31167/csef.v0i19.9507>(Accedido: 20 de agosto del 2021)

Vega, J., Vega, J. M. y Moneo, I., (2011). "Manifestaciones cutáneas originadas por la oruga procesionaria del pino (*Thaumetopoea pityocampa*)". *ACTAS Dermo-Sifigráficas*, 12(9), pp. 658-667.

Zeng, L., Wardlow, B., Xiang, D., Hu, S. y Li, D. (2020). "A review of vegetation phenological metrics extraction using time-series, multispectral satellite data". Remote Sensing of Environment, 237(111511)

# ANEXOS

**Anexo 1** Parámetros fenológicos obtenidos de cada rodal con la media

		SOS				EOS				Duración				MOS				Max			
		Cero	Bajo	Medio	Alto	Cero	Bajo	Medio	Alto	Cero	Bajo	Medio	Alto	Cero	Bajo	Medio	Alto	Cero	Bajo	Medio	Alto
NDVI	1era	326	344	338	206	21	45	129	278	54,5	64,32	156,9	78,7	13	27	24	245	0,692	0,66	0,46	0,57784
	2da	363	327	183	123	58	148	130	16	63,1	185,88	319,2	257	30	25	278	270	0,677	0,59	0,52	0,509
	3era	298	238	214	214	4	172	160	334	12,5	309	310,8	122	304	303	364	280	0,682	54	0,51	0,639
	x	329	303	245	181	27,7	121,67	139,67	209	43,4	186,4	262,3	153	116	118	222	265	0,684	18,4	0,4967	0,57528
EVI	1era	278	248	254	332	21	105	165	87	106	190,98	276,54	123	320	362	276,54	33	0,21	0,36	0,3172	0,5327
	2da	291	261	249	255	40	88	82	106	113	190,14	200,22	221	339	345	200,22	345	0,177	0,57	0,7038	0,9328
	3era	358	202	4	208	34	10	4	34	39,4	170,94	164,94	193	16	286	164,94	304	0,535	1,29	1,37	0,6407
	x	309	237	169	265	31,7	67,667	83,667	75,7	85,9	184,02	213,9	179	225	331	213,9	227	0,307	0,74	0,797	0,70207
NBR	1era	254	260	254	260	51	51	45	45	164	157,92	154,32	150	189	332	332	332	0,307	0,31	0,3278	0,3104
	2da	285	291	285	291	70	76	52	46	153	152,58	128,1	120	351	363	345	351	0,314	0,31	0,3448	0,3317
	3era	334	334	340	310	40	40	34	40	69,2	67,8	62,04	92,6	10	10	10	4	0,55	0,55	0,3278	0,386
	x	291	295	293	287	53,7	55,667	43,667	43,7	129	126,1	114,82	121	183	235	229	229	0,39	0,39	0,3335	0,3427
NDII	1era	230	260	278	284	141	57	15	21	270	162,36	107,76	97,2	356	338	320	326	0,087	0,16	0,209	0,1964
	2da	291	297	291	291	46	52	40	46	121	122,7	115,14	117	345	351	345	345	0,147	0,15	0,1772	0,1675
	3era	316	316	334	328	46	40	34	34	157	90,3	65,46	68,2	4	364	4	364	0,185	0,2	0,2742	0,2023
	x	279	291	301	301	77,7	49,667	29,667	33,7	183	125,12	96,12	94,1	235	351	223	345	0,139	0,17	0,2201	0,18873
NIR	1era	230	81	248	99	296	237	314	171	64	155,46	68,22	71,8	266	159	272	129	4343	2593	3572	3160
	2da	NA	88	NA	178	NA	262	NA	240	NA	170,34	NA	35,8	NA	190	NA	196	NA	2375	NA	4564
	3era	NA	352	NA	196	NA	244	NA	244	NA	254,64	NA	44,7	NA	208	NA	220	NA	3274	NA	4195
	x	230	81	248	99	296	237	314	171	64	155,46	68,22	71,8	266	159	272	129	4343	2593	3572	3160

**Anexo 2** Parámetros fenológicos obtenidos de cada rodal con la mediana

		SOS				EOS				Duración				MOS				Max			
		Cero	Bajo	Medio	Alto	Cero	Bajo	Medio	Alto	Cero	Bajo	Medio	Alto	Cero	Bajo	Medio	Alto	Cero	Bajo	Medio	Alto
<b>NDVI</b>	1era	NA	NA	152	140	NA	NA	297	152	NA	NA	508,92	274,7	NA	NA	51	57	NA	NA	0,4722	0,4494
	2da	NA	344	NA	NA	NA	64	NA	NA	NA	450	NA	NA	NA	207	NA	NA	NA	0,48	NA	NA
	3era	262	274	363	190	346	358	346	352	84,48	86	353,7	157,3	310	322	291	310	0,635	0,64	0,5878	0,5874
	x	262	274	363	190	346	358	346	352	84,48	86	353,7	157,3	310	322	291	310	0,635	0,64	0,5878	0,5874
<b>EVI</b>	1era	260	254	338	332	147	99	93	138	252,6	214	120,48	121	4	362	39	39	0,465	0,48	0,825	0,8561
	2da	249	261	261	249	130	88	124	124	243,2	193	232,02	238,2	363	345	4	4	0,655	0,64	0,6305	0,5815
	3era	202	202	196	202	4	10	364	64	165,8	175	169,44	194,6	280	286	280	292	1,229	1,22	0,961	0,6155
	x	237	239	265	261	93,7	65,7	193,67	109	220,5	194	173,98	184,6	216	331	107,67	112	0,783	0,78	0,8055	0,68437
<b>NBR</b>	1era	254	254	254	260	57	57	45	45	168,7	160	155,22	149,5	320	338	332	332	0,309	0,32	0,3326	0,3138
	2da	285	285	285	291	285	76	52	46	151,7	148	130,2	120,9	357	4	345	351	0,323	0,32	0,352	0,3365
	3era	334	334	334	304	40	40	34	40	71,88	72	66,18	105,6	10	10	10	358	0,558	0,56	0,5951	0,3765
	x	291	291	291	285	127	57,7	43,667	43,7	130,8	127	117,2	125,3	229	117	229	347	0,397	0,4	0,4266	0,34227
<b>NDII</b>	1era	230	260	278	284	87	51	21	27	216,8	157	108,66	98,52	326	332	320	326	0,118	0,17	0,2117	0,1974
	2da	285	297	291	291	46	52	40	46	118,8	119	115,74	117,1	345	351	345	345	0,155	0,16	0,1807	0,1689
	3era	334	316	334	328	46	40	40	34	99,96	548	67,2	69,54	4	364	4	364	0,191	0,21	0,2787	0,2064
	x	283	291	301	301	59,7	47,7	33,667	35,7	145,2	274	97,2	95,06	225	349	223	345	0,154	0,18	0,2237	0,1909
<b>NIR</b>	1era	230	87	248	99	292	81	308	171	63,3	156	62,22	70,86	272	159	272	129	4307	2572	3702	3165
	2da	NA	321	NA	178	NA	321	NA	214	NA	302	NA	35,5	NA	184	NA	196	NA	2361	NA	4616
	3era	NA	166	NA	196	NA	166	NA	244	NA	74,8	NA	44,99	NA	208	NA	220	NA	3298	NA	4188