



Universidad de Valladolid

**Escuela de Ingeniería de la Industria Forestal,
Agronómica y de la Energía
Campus de Soria**

GRADO EN Ingeniería Forestal: Industrias Forestales

TRABAJO FIN DE GRADO

**TITULO: _Evaluación de la sanidad forestal en pinares mediterráneos
mediante datos satelitales y datos de dron**

~~~~~

**AUTOR:** David Garcia Muñoz

**DEPARTAMENTO:** Ciencias Agroforestales

**TUTOR/ES:** Darío Domingo Ruiz y Cristina Gómez Almaraz

SORIA, 17 DE Septiembre 2024



***AUTORIZACIÓN del  
TUTOR del TRABAJO  
FIN DE GRADO***

D. Darío Domingo Ruiz profesor del departamento de Geografía y D<sup>a</sup>. Cristina Gómez Almaraz profesora del departamento de Ciencias Agroforestales, como Tutores del TFG titulado:

Evaluación de la sanidad forestal en pinares mediterráneos mediante datos satelitales y datos de dron.

presentado por el alumno D. David García Muñoz dan el V<sup>o</sup>. B<sup>o</sup>. y autorizan la presentación del mismo, considerando que cumple con los requisitos necesarios para su entrega y defensa ante el Tribunal de evaluación asignado.

Soria, 18 de septiembre de 2024

Los Tutores del TFG,

Fdo.: D. Darío Domingo Ruiz

Fdo: D<sup>a</sup>. Cristina Gómez Almaraz



## Resumen del trabajo de fin de grado

Título: Evaluación de la sanidad forestal en pinares mediterráneos mediante datos satelitales y datos de dron.

Departamento: Ciencias agroforestales

Tutores: Darío Domingo Ruiz y Cristina Gómez Almaraz

Autor: David García Muñoz

### Resumen:

El seguimiento de la sanidad forestal es crucial para proteger los ecosistemas, conservar la biodiversidad, asegurar servicios ecosistémicos, mitigar el cambio climático, prevenir desastres naturales, y mantener recursos económicos y culturales para las generaciones futuras.

Este trabajo de fin de grado tiene como objetivo evaluar el uso de información multi-sensor, dron y satelital, para el seguimiento de la defoliación por procesionaria (*Thaumetopoea pityocampa*) en pinares mediterráneos. Concretamente se analiza cómo se comportan los dos sensores y dos índices espectrales para identificar niveles de defoliación en masas forestales afectadas por procesionaria.

La investigación se llevó a cabo en dos parcelas de seguimiento en masas de *Pinus nigra* para las cuales se descargaron y procesaron las imágenes del satélite Sentinel-2 y se adquirieron 15 vuelos de dron entre el 30/11/2022 y el 30/01/2024. Los datos de ambos sensores se procesaron y se calcularon los índices espectrales Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) e índice de vegetación de diferencia normalizada verde (GNDVI). La estimación de la defoliación se realizó mediante fotointerpretación de los mosaicos RGB de dron en dos fechas representativas de momentos pre- y postdefoliación. Concretamente se seleccionaron aleatoriamente 106 polígonos coincidentes con píxeles de Sentinel-2 en la parcela 1 y 111 polígonos coincidentes con píxeles de Sentinel-2 en la parcela 2. Además, también se fotointerpretaron los valores de Fracción de Cobertura para observar la proporción de la superficie del rodal cubierta por la proyección de las copas de los árboles. Después se realizó un análisis descriptivo comparativo entre sensores, de los valores promedio, mínimo y máximo de los índices espectrales calculados.

Se llevó a cabo un análisis estadístico con el fin de evaluar si los índices espectrales de ambos sensores son útiles para diferenciar tres niveles de defoliación: baja (< 20%), media (20-40%) y alta (>40%). En primer lugar, se comprobó la normalidad de los datos mediante un test de Shapiro Wilk. En caso de que las muestras presentaran valores normales se realizó un análisis de varianza (ANOVA), y cuando no lo eran, se aplicó el test de Kruskal-Wallis y el post-hoc test de Dunn, con el propósito de identificar si hay diferencias estadísticamente significativas entre las categorías de defoliación.

Los valores medios de vigor vegetal determinados mediante los índices espectrales capturados por Sentinel-2 y dron muestran un descenso paulatino desde diciembre hasta abril coincidiendo coinciden con los meses en los que se produce la defoliación, mientras que los valores de vigor más altos se encuentran en los meses de noviembre y diciembre.

Los valores absolutos de Sentinel-2 son, generalmente, algo más altos que los del dron. Los meses de febrero a abril presentan para ambos sensores valores medios bajos de vigor en ambos índices espectrales (NDVI y GNDVI). Sentinel-2 presenta el mínimo valor de NDVI en julio mientras que el dron alcanza el valor mínimo en marzo. La tendencia a lo largo del tiempo es similar para ambos índices espectrales analizados, pero con diferencias en algunos momentos específicos del año. Observamos un mayor aumento de los índices en octubre en Sentinel-2 respecto a dron tanto en NDVI y GNDVI en el caso de la parcela 1 y un descenso mayor en los valores del dron en el mes de abril en el GNDVI de la parcela 2.

Los índices espectrales que presentan diferencias significativas entre las clases de defoliación establecidas son, en su mayoría, métricas derivadas de dron. Estas métricas presentan diferencias significativas entre la clase de defoliación baja y alta incluyendo los índices GNDVI y NDVI asociados a los meses de marzo y abril. La diferenciación de la clase de defoliación media con respecto al alta tan sólo se consigue con el índice GNDVI de marzo por lo que se establece que esta clase es difícil de determinar con la información de teledetección analizada.

El uso de técnicas de teledetección facilita el seguimiento a gran escala y a largo plazo de los procesos de defoliación causados por la procesionaria en los pinares, proporcionando datos valiosos para la gestión de las áreas forestales.

# Índice General

|                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.Introducción .....                                                                                   | 9  |
| 2.Justificación .....                                                                                  | 15 |
| 3. Objetivos .....                                                                                     | 19 |
| 4. Área de estudio .....                                                                               | 21 |
| 5.Metodología.....                                                                                     | 25 |
| 5.1. Adquisición de imágenes de dron.....                                                              | 27 |
| 5.2. Descarga de imágenes de Sentinel-2 .....                                                          | 29 |
| 5.3. Cálculo de índices de vegetación.....                                                             | 30 |
| 5.4. Selección aleatoria de píxeles muestreados .....                                                  | 35 |
| 5.5. Determinación de los niveles de defoliación y los valores de fracción de<br>cabida cubierta ..... | 37 |
| 5.6. Obtención de las estadísticas para los píxeles muestreados .....                                  | 39 |
| 5.7. Descripción de los valores de defoliación e índices espectrales .....                             | 43 |
| 5.8. Determinación de clases de defoliación .....                                                      | 43 |
| 5.9 Análisis de diferencias estadísticamente significativas entre clases .....                         | 44 |
| 6. Resultados .....                                                                                    | 47 |
| 6.1. Análisis descriptivo .....                                                                        | 49 |
| 5.1.1. Parcela 1 .....                                                                                 | 49 |
| 6.1.1.1 Sentinel-2 NDVI.....                                                                           | 49 |
| 6.1.1.2 Sentinel-2 GNDVI .....                                                                         | 50 |
| 6.1.1.3 Dron-NDVI.....                                                                                 | 51 |
| 6.1.1.4 Dron-GNDVI .....                                                                               | 51 |
| 6.1.1.5 Graficas Comparativas .....                                                                    | 52 |
| 6.1.2. Parcela 2 .....                                                                                 | 53 |
| 6.1.2.1 Sentinel-2 NDVI.....                                                                           | 53 |
| 6.1.2.2 Sentinel-2 GNDVI .....                                                                         | 54 |
| 6.1.2.3 Dron-NDVI.....                                                                                 | 55 |
| 6.1.2.4 Dron-GNDVI .....                                                                               | 55 |
| 6.1.2.5 Tablas comparativas .....                                                                      | 56 |
| 6.2. Clases de defoliación establecidas .....                                                          | 57 |

|                                                                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 6.3 Análisis de diferencias estadísticamente significativas entre clases de defoliación .....                                                 | 58 |
| 6.3.1. Resultados para las clases determinadas en la fecha postdefoliación ...                                                                | 60 |
| 6.3.2. Resultados diferencia de defoliación .....                                                                                             | 61 |
| 6.3.3 Evolución de valores promedio de los índices espectrales para las clases de defoliación identificadas en la fecha postdefoliación ..... | 64 |
| 7.Discusión.....                                                                                                                              | 67 |
| 8.Conclusión.....                                                                                                                             | 70 |
| 9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                                                                                                           | 73 |

## 1.Introducción



## 1.Introducción

La procesionaria del pino (*Thaumetopoea pityocampa*) es una especie de lepidóptero defoliador el cual abunda en bosques de coníferas de la cuenca mediterránea (Europa del Sur, Asia Menor y Norte de África) y también ha sido introducida en algunas masas forestales de América del Sur. Es considerada como el insecto defoliador más importante de los pinares de España, afectando principalmente a coníferas de hoja perenne como las especies de *Pinus* y *Cedrus*. Constituye una preocupación socioambiental y económica significativa en muchas regiones forestales del mundo, especialmente en Europa y el Mediterráneo siendo una especie autóctona en España. Es una especie que participa en la cadena trófica y contribuye a mantener su diversidad. Cuando sus poblaciones exceden los niveles de equilibrio las orugas pueden afectar vastas extensiones de pinares, causando daños tanto directos como indirectos en los ecosistemas forestales. Los daños, directos se asocian a la pérdida de acículas de las especies vegetales hospedantes, mientras que los daños indirectos están relacionados con urticarias y alergias a personas y animales.

*Thaumetopoea pityocampa* como otros lepidópteros tiene un desarrollo de tipo Holo metabólico, con fases de embrión (huevo), larva (oruga), pupa e imago (adulto/mariposa) (Figura 1). Presenta un ciclo de desarrollo de un año para los individuos adultos. Se caracteriza porque las hembras poseen un ciclo de vida corto viviendo únicamente uno o dos días mientras que los individuos machos son de vida más larga. Tienen hábitos exclusivamente nocturnos, por lo que evitan en gran medida su depredación por las aves diurnas. Su color parduzco las hace confundirse con el medio en el que viven y se hacen invisibles a sus depredadores.



Figura 1: Mariposa de Procesionaria

El ciclo de vida de la procesionaria se inicia con la aparición de adultos en verano (junio-septiembre). Los individuos adultos en forma de mariposas (figura 1) se aparean en verano y, posteriormente, la hembra deposita sus huevos la misma noche del apareamiento, sobre las copas de los árboles, formando puestas muy características en forma de espiral alrededor de una o dos acículas. Cada puesta puede contar con entre 100 y 300 huevos que la hembra protege mediante la colocación de escamas de su propio cuerpo. Después de 30-40 días nacen las larvas las cuales empezarán a alimentarse de las acículas de los pinos. Las orugas pasarán por cinco estadios de desarrollo distintos, en cada estadio deben mudar “la piel” para crecer y “se visten” de

un color diferente: primero verde, luego rosado, rojizo y finalmente negro con una banda pelosa naranja en el lomo y blancas en los laterales. Los dos últimos estadios son los más voraces y pueden hacer perder tantas hojas en los árboles que parezca que se han secado.

Tras alimentarse durante el invierno, a finales del invierno o comienzos de la primavera las orugas, en su último estadio de desarrollo proceden a descender en grupo formando las características “procesiones” (figura 2) siguiendo un hilo de seda segregado por ellas mismas con el fin de ir juntas. El motivo de ir juntas es para protegerse mutuamente la cabeza, ya que es el alimento de muchos pájaros. Las procesiones están siempre guiadas por una hembra (Mossoll, 2024) y buscan las zonas más cálidas y soleadas (temperatura óptima) donde se entierran y pasan la fase de pupa o crisálida. Durante la fase de pupa pueden llegar a realizar una diapausa corta o prolongada de hasta varios años en circunstancias específicas, además de ser organismos con comportamiento sociales y gregarios



Figura 2: Oruga de procesionera

El área afectada por procesionaria en Europa ha aumentado en el último siglo debido principalmente a bosques monoespecíficos y repoblaciones con estructuras simples y a los impactos del cambio climático que ha provocado cambios en la dinámica forestal produciendo la expansión y su aumento hacia el norte latitudinal y altitudinalmente donde antes estaba ausente, probablemente como resultado del aumento de las temperaturas invernales (Battisti et al., 2015).

La procesionaria es tolerante a la congelación, pero periodos prolongados con temperaturas bajo cero pueden acarrear la mortalidad de las orugas. Los inviernos cálidos y húmedos pueden aumentar la presencia de parasitoides disminuyendo su población, mientras que un invierno frío y seco tiene el efecto contrario. La actividad normal de las orugas se produce con temperaturas entre 0 y 25 °C. Los umbrales de temperatura letal para ellas se encuentran por encima de 30 °C y por debajo de los - 7 °C (Demolin, 1969). En este sentido, el control biológico de la procesionaria es más eficiente en altitudes bajas, mientras que el control de la procesionaria en elevaciones medias altas está fuertemente determinado por el clima ya que por encima de ~1300 m, el control biológico se vuelve más dependiente de las condiciones climáticas) (Cardil, 2019). La intensidad de la defoliación muestra una asociación significativa con inviernos cálidos. En este sentido, el calentamiento climático podría intensificará la aparición de la procesionaria. Este hecho, sumado a la capacidad de las pupas para prolongar su diapausa bajo tierra durante varios años, permite a la procesionaria hacer frente a condiciones adversas. La intensidad de la defoliación muestra una asociación

significativa con inviernos cálidos. En este sentido, el calentamiento climático podría intensificar la aparición de la procesionaria. Este hecho, sumado a la capacidad de las pupas para prolongar su diapausa bajo tierra durante varios años, permite a la procesionaria hacer frente a condiciones adversas.

La vulnerabilidad a la infestación por procesionara depende de múltiples factores climáticos, ambientales y de la estructura de las masas forestales. Dentro de los factores asociados a la estructura, los hábitats abiertos juegan un papel en la incidencia de PPM y se ha determinado que a escala de localidad y de parcela la presencia de claros ocupados por arbustos o afloramientos rocosos reducía la vulnerabilidad a PPM, mientras que los claros con una estructura más simplificada producían el efecto contrario. . En general, masas monoespecíficas con una estructura simple favorecen la vulnerabilidad a la infestación por procesionaria. Las orugas se alimentan de acículas de coníferas, provocando un debilitamiento general de los árboles y, finalmente, una defoliación a nivel de rodal y de paisaje. La defoliación intensa afecta negativamente al volumen y el crecimiento radial de los árboles, aumenta la tasa de mortalidad de los árboles jóvenes y reduce la capacidad de reproducción de los árboles. Al mismo tiempo, la procesionaria puede desencadenar una disminución en la resistencia de los árboles y su resiliencia frente a otras perturbaciones como incendios forestales, condiciones de sequía u otras plagas que podrían influir y modificar la composición de especies de árboles en bosques mixtos. Cuantificar los procesos de defoliación a nivel de paisaje es clave para mejorar el conocimiento de los patrones de daño de la procesionaria, en consecuencia, orientar mejor las medidas de control o mejorar las condiciones ecológicas para aumentar la resistencia y resiliencia de los bosques a este tipo de daños. Los árboles jóvenes son más vulnerables a la PPM, pero los viejos reportan tasas de infestación más altas. Esas zonas con defoliaciones más propensas y severas suelen ser bordes de bosques y árboles desolados. Los árboles afectados suelen tardar un tiempo de 2 a 4 años para recuperar el crecimiento y cubrir valores similares a los observados antes del brote.

Para el control de esta especie se han utilizado trampas de feromonas, pero no hay pruebas claras de la eficacia de este tipo de tratamiento.

En este contexto, los avances en tecnología de teledetección ofrecen un enfoque prometedor para la detección temprana, y gestión de la procesionaria del pino. Los métodos de teledetección, que abarcan desde imágenes satelitales hasta drones equipados con sensores especializados, permiten la recopilación rápida de datos a diversas escalas, facilitando la identificación de áreas afectadas, la evaluación de la distribución espacial de la plaga y la planificación de estrategias de control.

Entre los sistemas de detección remota tenemos los sistemas aéreos tripulados a distancia o “dron”, que son herramientas que sirven para observar y hacer seguimiento de las zonas objetivo cuando la nubosidad no permite a los satélites obtener una imagen clara para realizar análisis a pequeña escala, así como muestreo, evaluación y validación a escala local que pueden complementarse e integrarse con imágenes aéreas o satelitales para análisis a escala espacial más amplia. En los últimos años se ha aumentado el uso de drones debido a los bajos requisitos de infraestructura, la facilidad de implementación, adquisición e idoneidad para los flujos de trabajo fotogramétricos. La disponibilidad actual de software fotogramétrico permite el manejo y procesamiento de grandes conjuntos de datos espaciales. Los drones se han utilizado en estudios a

escala de detalle para inventariar los recursos forestales, cartografiar localización de enfermedades, evaluar los daños de las plagas a nivel de los árboles y a nivel del paisaje, cuantificar brechas espaciales o estimar el desplazamiento del suelo después de la cosecha. Las plataformas dron están creando un nicho en la adquisición de imágenes de bajo costo a escalas locales que hacen de esta tecnología una opción rentable en aplicaciones forestales.

Por otra parte, existe un gran número de satélites diseñados para la observación de la Tierra y la evaluación de sus recursos naturales. Entre ellos destaca el programa Landsat de la NASA o el programa Copernicus de la ESA, que proporcionan imágenes gratuitas de resolución media.

Los sensores de teledetección se clasifican en sensores pasivos y activos. Los sensores pasivos miden la radiación proveniente de una fuente externa al sensor, como la luz solar reflejada por los objetos terrestres o la radiación térmica infrarroja emitida por la Tierra. Los sensores pasivos no capturan información por la noche ni son capaces de ver, por ejemplo, a través de las nubes. Por otra parte, los sensores activos usan su propia fuente de radiación. El sensor activo emite radiación hacia los objetos terrestres y mide la cantidad de radiación reflejada. Los sensores activos pueden medir tanto de día como de noche y los dos principales tipos son el radar de apertura sintética (por sus siglas en inglés SAR) y el LiDAR (Light detection and Ranging). Los sistemas radar pueden medir a través de las nubes.

Entre las numerosas aplicaciones de la teledetección, el análisis del vigor de los bosques ha sido ampliamente analizada. Si bien, los efectos de plagas han sido menos analizada puesto que, normalmente, generan perturbaciones de menor intensidad que otras como incendios o cortas. Por ejemplo, Sangüesa-Barreda et al., 2014 utilizó información Landsat para caracterizar las defoliaciones de procesionaria en combinación con reconstrucciones dendrocronológicas. Por su parte Domingo et al., 2024 analizaron los cambios estructurales generados por la defoliación utilizando información LiDAR capturada con dron.

Entre otras aplicaciones existentes destaca su uso para cartografía de cobertura y usos del suelo, estudio de erosión, inventarios forestales y evaluación de las condiciones de estrés en la vegetación debidas a sequía o deforestación.

En este contexto, esta investigación explora cómo la teledetección puede aplicarse eficazmente en la gestión integrada de la procesionaria del pino, proporcionando herramientas valiosas para conservar los recursos forestales y mitigar los impactos negativos asociados con esta plaga.

## 2. Justificación



## 2. Justificación

Este proyecto se realiza con el fin de evaluar el estado sanitario de una masa de árboles de *Pinus nigra* afectados en diverso grado por la procesionaria del pino. Para tal fin se utilizan y comparan imágenes adquiridas por los satélites Sentinel-2 e imágenes obtenidas mediante vuelos dron en la zona de estudio. El trabajo me va a permitir aplicar los conocimientos aprendidos durante la carrera y finalizar con mi proceso formativo.



### 3. Objetivos

### 3-Objetivos

El objetivo principal de este estudio es evaluar el uso de información multi-sensor, dron y satelital, para el seguimiento de la defoliación causada por procesionaria en pinares de *P. nigra* de Soria. Se pretende analizar cómo diversos sensores que proporcionan información multispectral pueden contribuir a la identificación y evaluación de áreas afectadas por la procesionaria a lo largo del tiempo (finales de 2022 a comienzos de 2024).

Objetivos específicos:

- Comparar las series temporales de Sentinel-2 y dron adquiridas sobre espacios afectados por procesionaria con distinto grado de defoliación
- Analizar la capacidad de los índices NDVI y GNDVI para identificar la defoliación por procesionaria
- Determinar si la información espectral derivada de dron y Sentinel-2 es capaz de determinar tres clases de defoliación

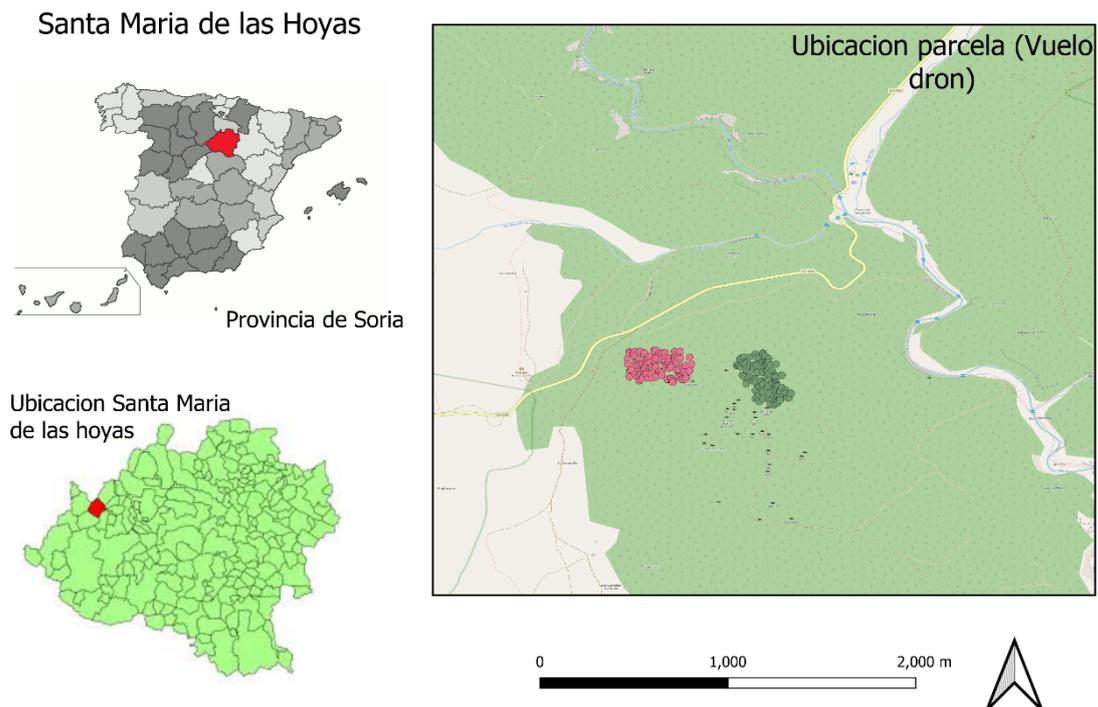
## *4. Área de estudio*



#### 4. Área de estudio

El área de estudio se localiza en la provincia de Soria próximo al municipio de Santa María de las Hoyas y se enmarca en el Parque Natural Cañón del Río Lobos (Figura 3). Concretamente se trata de masas de *Pinus nigra*, una especie vulnerable al impacto de la procesionaria.

En cuanto a sus características climáticas presenta una temperatura media anual entorno a los 9 grados y con una precipitación anual de 670mm. La topografía es, generalmente, plana con elevaciones que oscilan entre 1138 y 1168 m sobre el nivel del mar con una litología predominante en conglomerados y margas del Cretácico.



Elaboracion propia: David García Muñoz

16/07/2024 WGS 84 EPSG:4326

Figura 3: Localización del área de estudio

En esta zona el grupo de investigación Cambium tiene establecidas desde 2021 dos parcelas de seguimiento del efecto de la procesionaria. Para el presente estudio se adquirieron datos de las dos parcelas (parcela 1 y parcela 2) que se utilizaron en distintas fases de la investigación. Los datos de la parcela 1, por su mayor completitud, se utilizaron en todas las fases de análisis, mientras que los datos de la parcela 2, por su menor completitud, se utilizaron solo en algunas fases del análisis.

Podemos observar a continuación imágenes adquiridas durante una de las salidas de campo en esta ubicación (figura 4).



Figura 4: Detalles de la zona experimental

En estas parcelas de investigación algunos árboles cuentan con sistemas de monitorización midiéndose los valores de temperatura, humedad y flujo de savia del árbol (figura 5). También cuentan con dendrómetros capaces de medir el crecimiento radial. Estos sensores proporcionan información relevante de las condiciones climáticas que presenta la zona.



Figura 5: Sistema de seguimiento de los árboles en la zona experimental

## 5. Metodología



## 5.1. Adquisición de imágenes de dron

La adquisición de los vuelos de dron se realizó utilizando un DJI Mavic 3M (figura 6), un dron multiespectral con precisión de localización en tiempo real (RKT) que no necesita la toma de coordenadas de referencia dado que recibe la información sobre su posición con precisión centimétrica en tiempo real (figura 6).

El dron DJI Mavic-3M cuenta con múltiples sensores que detectan con precisión obstáculos en todas las direcciones para lograr un sistema anticolidión omnidireccional, permitiendo la inspección aérea para el seguimiento del terreno incluyendo terrenos inclinados y generación de rutas 3D. El dron consta de una autonomía aproximada de 43 minutos de vuelo la cual depende de las condiciones meteorológicas y de la pendiente del terreno, entre otros.

Previo a la realización de los vuelos, es necesario planificar la misión de vuelo en la que se deben de establecer valores como la altura de vuelo (90 m), el solape (80% longitudinal y 80% transversal). Durante todo el vuelo se controlará el estado de las baterías y el acceso a internet para poder obtener precisión RTK durante el vuelo.





Figura 6: Equipo de dron utilizado

En nuestro caso las bandas capturadas por el dron son las siguientes:

Verde (G):  $560 \pm 16$  nm;

Rojo (R):  $650 \pm 16$  nm;

Borde rojo (RE):  $730 \pm 16$  nm;

Infrarrojo cercano (NIR):  $860 \pm 26$  nm

El procesado de las imágenes de dron se realizó por parte de miembros del equipo Cambium utilizando el software Pix4D que permite generar orto mosaicos RGB, así como de las distintas bandas espectrales adquiridas (verde, rojo, borde del rojo e infrarrojo próximo), información que posteriormente se ha utilizado en el presente trabajo para el cálculo de los índices espectrales (ver apartado 4.3).

Las fechas de dron y satélite fueron adquiridas en las fechas indicadas en la tabla 1.

| FECHA (año, mes, día) | EXPERIMENTO 1 |         | EXPERIMENTO 2 |         | Fechas Imágenes satélite (Descargadas) |
|-----------------------|---------------|---------|---------------|---------|----------------------------------------|
| 30/11/2022            | RGB_P4        | SEQUOIA | -             | -       | 12/11/2022                             |
| 17/12/2022            | RGB_P4        | SEQUOIA | -             | -       | 04/12/2022                             |
| 27/12/2022            | RGB_P4        | SEQUOIA | -             | -       | 04/12/2022                             |
| 02/03/2023            | RGB_P4MS      | MS_P4MS | RGB_P4MS      | MS_P4MS | 04/03/2023                             |
| 06/04/2023            | RGB_M3M       | MS_M3M  | RGB_M3M       | MS_M3M  | 06/04/2023                             |
| 24/04/2023            | RGB_M3M       | MS_M3M  | RGB_M3M       | MS_M3M  | 18/04/2023                             |
| 01/06/2023            | RGB_M3M       | MS_M3M  | RGB_M3M       | MS_M3M  | 15/06/2023                             |
| 27/06/2023            | RGB_M3M       | MS_M3M  | RGB_M3M       | MS_M3M  | 27/06/2023                             |
| 24/07/2023            | RGB_M3M       | MS_M3M  | RGB_M3M       | MS_M3M  | 20/07/2023                             |
| 08/09/2023            | RGB_M3M       | MS_M3M  | RGB_M3M       | MS_M3M  | 13/09/2023                             |
| 09/10/2023            | RGB_M3M       | MS_M3M  | RGB_M3M       | MS_M3M  | 10/10/2023                             |
| 31/10/2023            | RGB_M3M       | MS_M3M  | RGB_M3M       | MS_M3M  | 10/10/2023                             |
| 03/12/2023            | RGB_M3M       | MS_M3M  | RGB_M3M       | MS_M3M  | 19/12/2023                             |
| 27/12/2023            | RGB_M3M       | MS_M3M  | RGB_M3M       | MS_M3M  | 27/12/2023                             |
| 30/01/2024            | RGB_M3M       | MS_M3M  | RGB_M3M       | MS_M3M  | 31/01/2024                             |

Tabla 1: Fechas de imágenes de dron y de satélite

Las fechas seleccionadas para ambos sensores (dron, satélite) son las siguientes:

Se han seleccionado una fecha por mes para los análisis para poder comparar los resultados obtenidos tanto en S2 como en dron (tabla 2) y se añadido una columna con todos los meses de las distintas fechas el cual se va a emplear para elaborar las gráficas.

| S2         | DRON       | Meses graficas |
|------------|------------|----------------|
| 04-12-2022 | 27-12-2022 | Diciembre 22   |
| 04-03-2023 | 02-03-2023 | Marzo 23       |
| 06-04-2023 | 06-04-2023 | Abril 23       |
| 21-04-2023 | 24-04-2023 | Mayo 23        |
| 15-06-2023 | 01-06-2023 | Junio 23       |
| 27-06-2023 | 27-06-2023 | Julio 23       |
| 20-07-2023 | 24-07-2023 | Agosto 23      |
| 13-09-2023 | 08-09-2023 | Septiembre 23  |
| 10-10-2023 | 09-10-2023 | Octubre 23     |
| 17-12-2023 | 31-10-2023 | Noviembre 23   |
| 27-12-2023 | 03-12-2023 | Diciembre 23   |
| 31-01-2024 | 03-01-2024 | Enero 24       |

Tabla 2: Fechas seleccionadas para Sentinel-2 y dron en la parcela 1

## 5.2. Descarga de imágenes de Sentinel-2

En primer lugar, se realizó la descarga de imágenes de Sentinel-2 a través del portal de Copernicus Browser (<https://browser.dataspace.copernicus.eu/>), del cual se seleccionaron las imágenes correspondientes a las fechas más próximas en las que se realizaron los vuelos de dron (Figura 7). Las imágenes descargadas pertenecen a la colección "Level 2A" corregidas atmosférica y topográficamente. Se descargan imágenes con un porcentaje de nubes menor del 30%. El porcentaje de nubes se amplió

Evaluación de la sanidad forestal en pinares mediterráneos mediante datos satelitales y datos de dron

debido a que en algunas fechas con un porcentaje de 10% no existían imágenes disponibles de Sentinel-2.

Las imágenes se descargaron en formato TIFF de 8 bit y una resolución espacial X e Y de 10 m en el sistema de coordenadas WGS84 como se puede observar en la figura 8.

La descarga de las imágenes se hace de esta manera para que luego se puedan usar junto a las imágenes de dron adquiridas.

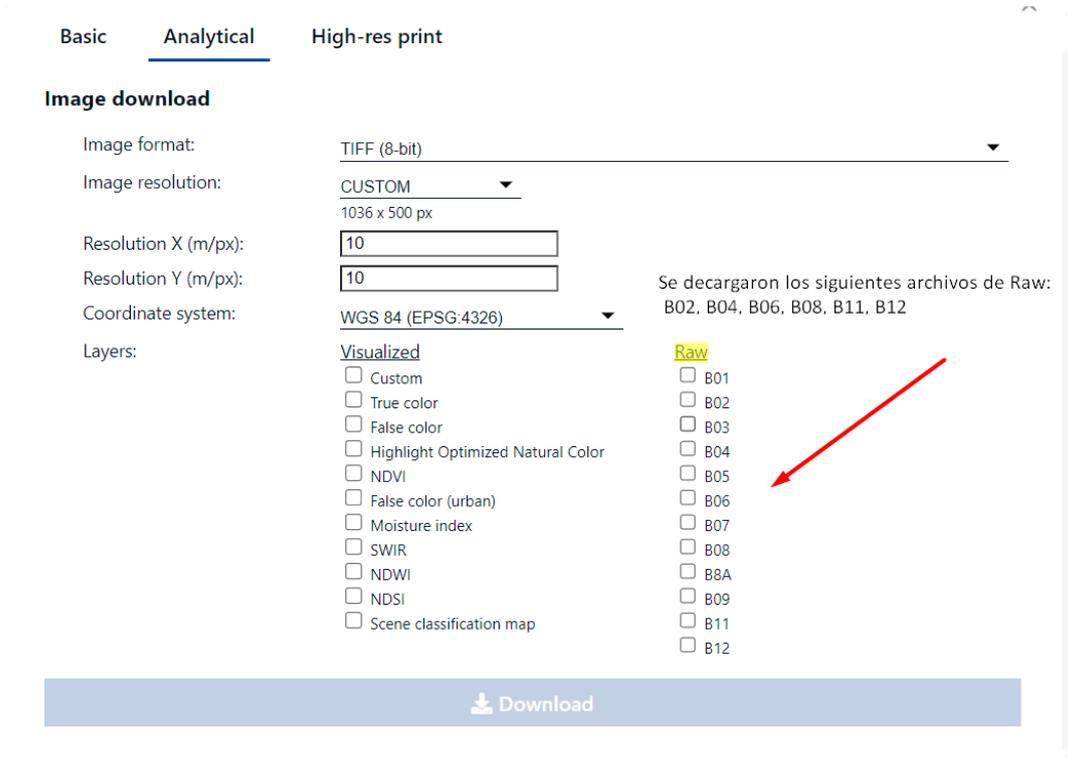


Figura 7: Descarga de imágenes en Copernicus Browser

### 5.3. Cálculo de índices de vegetación

Tras descargar estos archivos originales procedemos a su procesamiento en QGIS, en el cual a través de la calculadora ráster (Figura 8) procedemos a la obtención de los índices Normalized Burn Ratio (NBR), Normalized Difference Infrared Index (NDII), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) y Moisture Stress Index (MSI) de las distintas fechas de vuelo dron mediante sus respectivas fórmulas.

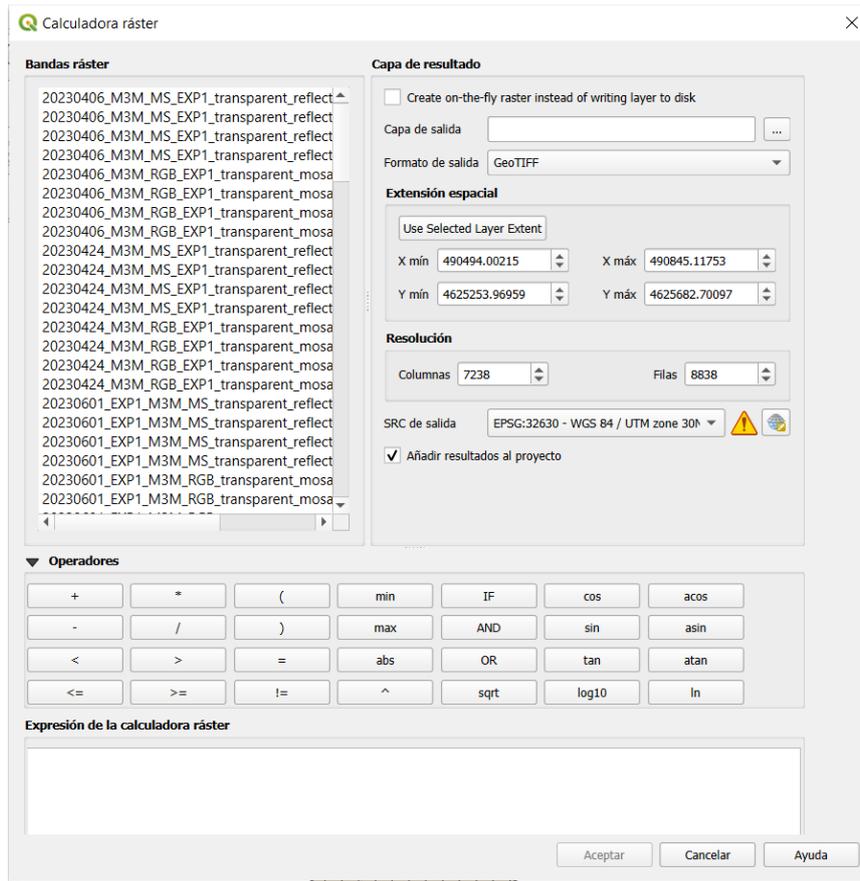


Figura 8: Calculadora ráster en QGIS

Fórmulas empleadas en el cálculo de los índices espectrales con datos Sentinel-2:

NBR:  $(B8-B12) / (B8+B12)$  Sentinel-2A

NDII:  $(B8-B11) / (B8+B11)$  Sentinel-2A

NDVI:  $(B8-B4) / (B8+B4)$  Sentinel-2A

MSI:  $B11/B8$  Sentinel-2A

Como el sensor dron tiene un menor número de bandas espectrales que Sentinel-2, los índices espectrales calculados serán dos: GNDVI y NDVI. Calculamos el GNDVI y el NDVI en sus respectivas fechas, tanto en la parcela 1 como en la parcela 2 mediante las siguientes fórmulas:

NDVI:  $(NIR-RED) / (NIR+RED)$

GNDVI:  $(NIR-GREEN) / (NIR+GREEN)$

Los resultados obtenidos lo podemos observar de la figura 9 hasta la figura 14 a continuación.



Figura 9: Datos obtenidos (Determinada fecha)

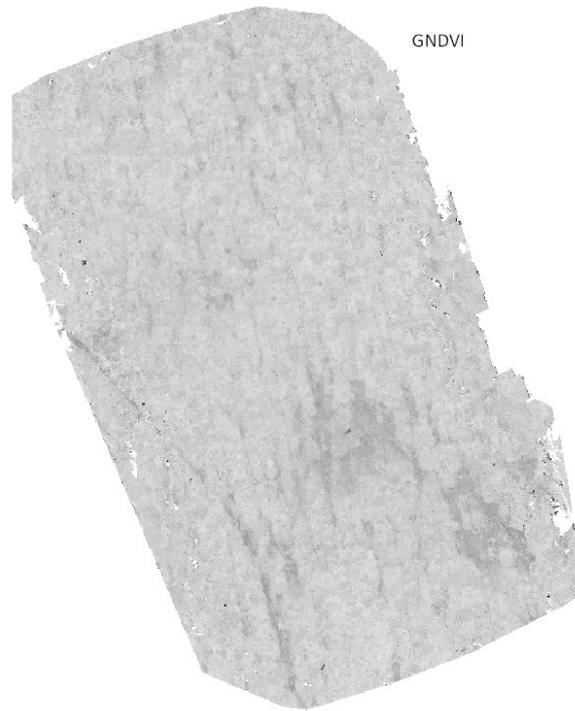


Figura 10: Ejemplo de cálculo de GNDVI para una fecha en la parcela 1

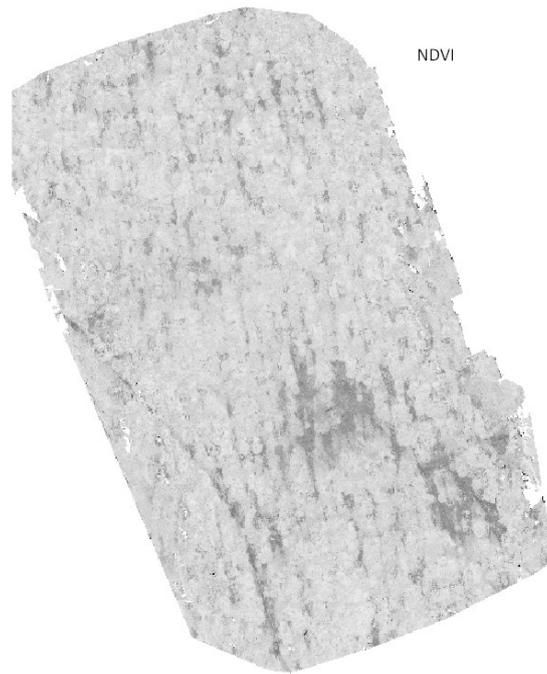


Figura 11: Ejemplo de cálculo de NDVI para una fecha en la parcela 1

- ▼   30\_01\_2024
  - ▶   **NDVI\_30\_01\_2024**
  - ▶   **GNDVI\_30\_01\_2024**
  - ▶   **20240130\_M3M\_MS\_EXP2\_transparent\_reflectance\_green**
  - ▶   **20240130\_M3M\_RGB\_EXP2\_transparent\_mosaic\_group1**
  - ▶   **20240130\_M3M\_MS\_EXP2\_transparent\_reflectance\_red**
  - ▶   **20240130\_M3M\_MS\_EXP2\_transparent\_reflectance\_red edge**
  - ▶   **20240130\_M3M\_MS\_EXP2\_transparent\_reflectance\_nir**

Figura 12: Datos obtenidos (Determinada fecha)

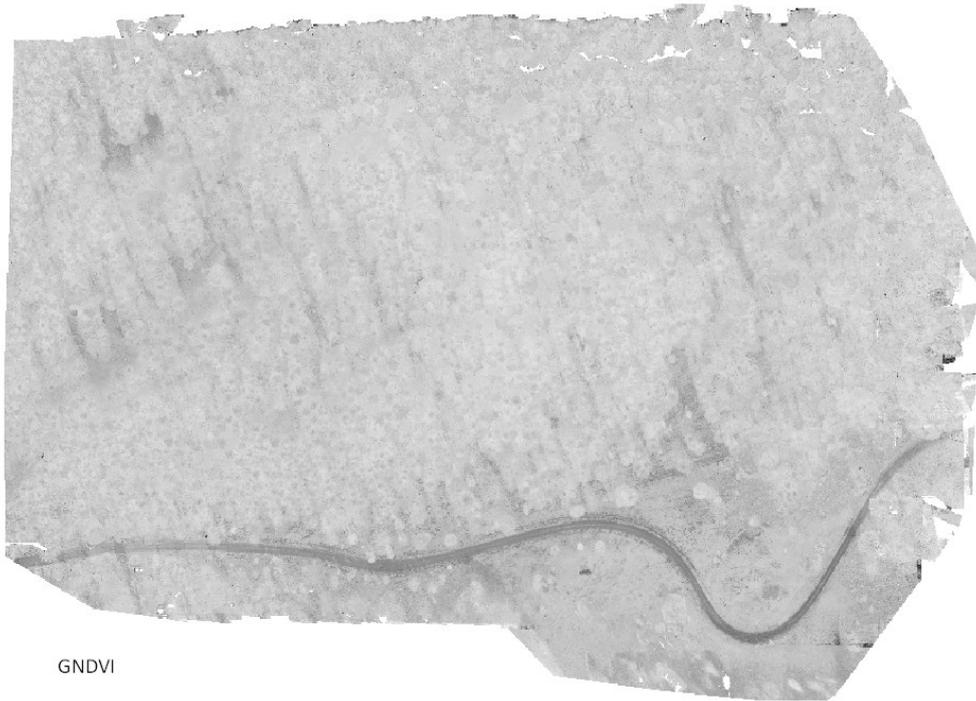


Figura 13: Ejemplo de cálculo de GNDVI para una fecha en la parcela 2

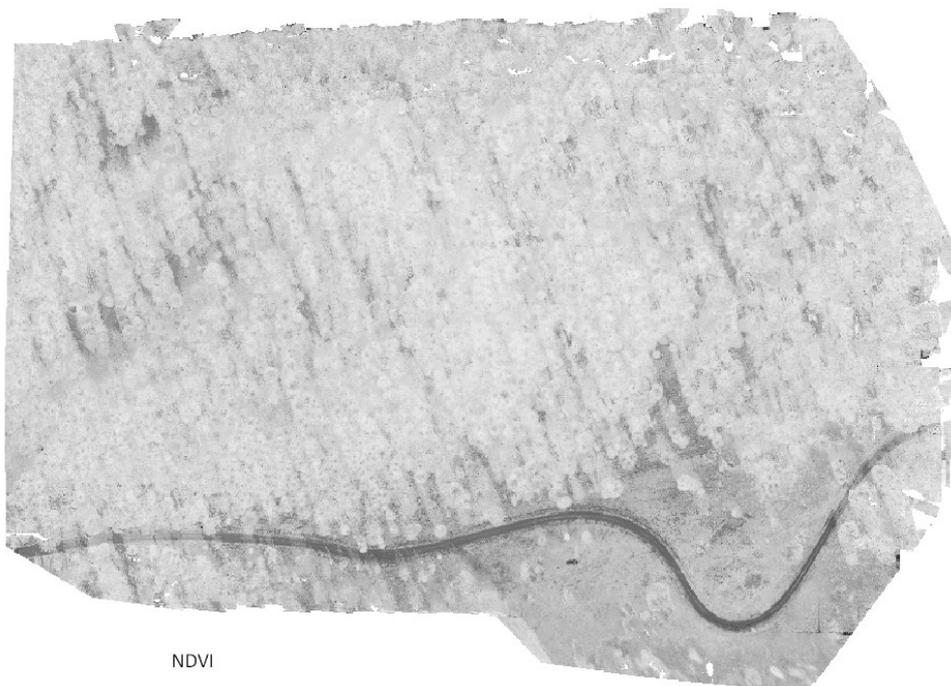


Figura 14: Ejemplo de cálculo de NDVI para una fecha en la parcela 2

#### 5.4. Selección aleatoria de píxeles muestreados

Para seleccionar de forma aleatoria un número de píxeles que nos sirva como muestra del análisis de datos, procedemos a aplicar técnicas de geoprocésamiento de datos en QGIS.

En base a los ráster de GNDVI y NDVI del satélite Sentinel-2 para las dos parcelas y las distintas fechas de adquisición de datos generamos un Grid (cuadrícula) con la localización de los píxeles de dichas imágenes con una resolución de 10 x 10 m (figura 15) Para la creación de la cuadrícula utilizamos la herramienta de transformación de formato ráster a vectorial en QGIS. Tras transformar nuestro archivo a formato vectorial procedemos al recorte de nuestra cuadrícula la zona de vuelo (orto mosaico generado del procesado de las imágenes de dron). Este proceso se realiza tanto en la parcela 1 como en la 2.

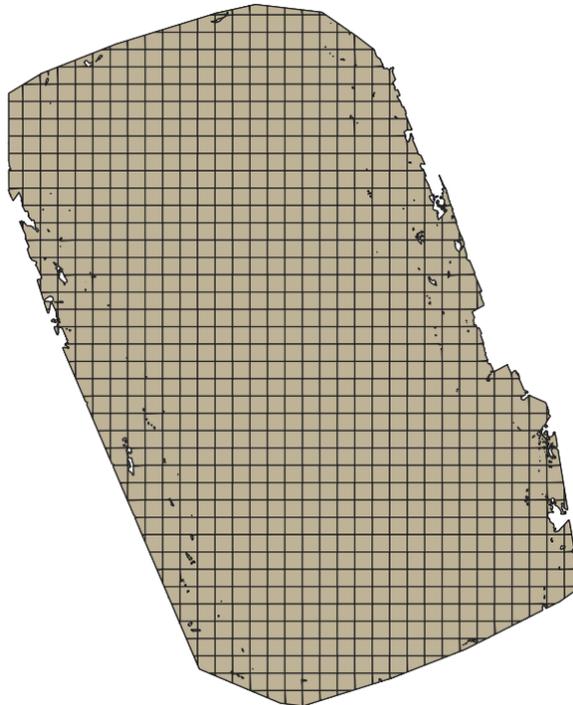


Figura 15: Cuadrícula 10 x 10 m para la zona de vuelo

Después, con objeto de seleccionar los píxeles completos y descartar aquellos píxeles que sean de borde o presenten huecos, seleccionamos en la tabla de atributos aquellos píxeles con una superficie de 100 m<sup>2</sup> (figura 16).

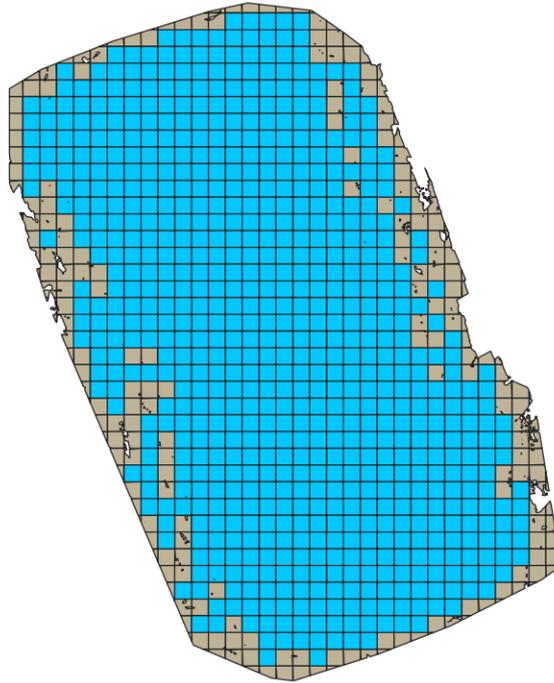


Figura 16: Ejemplo para la parcela 1 de los píxeles completos seleccionados

Finalmente, dado que la fotointerpretación de los valores de fracción de cabida cubierta y defoliación (ver apartado 4.5) se realiza de forma manual, se procedió a realizar una selección aleatoria del 15% de píxeles para poder realizar un análisis factible y adaptado al tiempo destinado a invertir en el trabajo fin de grado (figura 17)

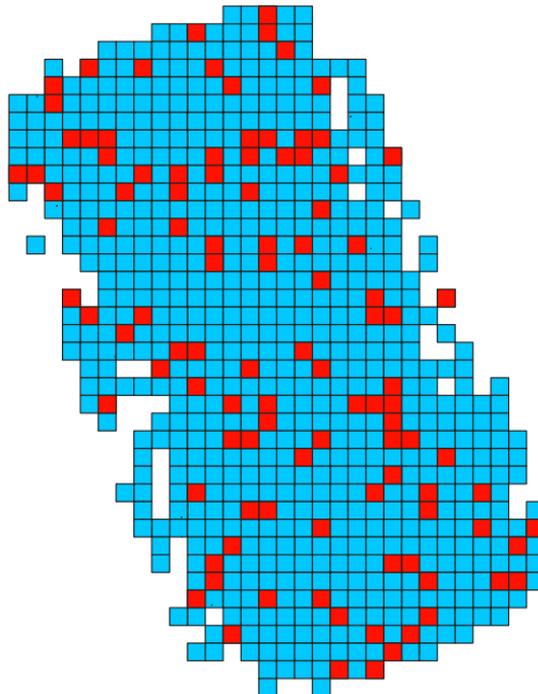


Figura 17: Píxeles seleccionados aleatoriamente (15%) en la parcela 1.

## 5.5. Determinación de los niveles de defoliación y los valores de fracción de cubierta cubierta

Una vez seleccionados los píxeles aleatoriamente (apartado 4.4) procedemos a su fotointerpretación. La fotointerpretación consiste en la estimación de los valores de defoliación considerando el % de copa defoliada con respecto a la superficie que ocupan todas las copas del píxel utilizando las imágenes RGB del dron de dos fechas: fecha previa a la defoliación (27-12-2022) y fecha posterior a la defoliación (24-04-2023) (figura 18).



Figura 18: Imagen RGB para la fecha predefoliación: 27-12-2022 y la fecha postdefoliación: 24-04-2023 en la parcela 1

A partir de aquí estimamos la defoliación antes y después en los píxeles seleccionados alternando las imágenes pre y post defoliación (figura 19 y figura 20). Añadimos estos valores de defoliación determinados visualmente a la tabla de atributos de nuestra selección aleatoria. Este proceso se realiza tanto en la parcela 1 como en la parcela 2 pero en el caso de la parcela 2 solo analizamos en las imágenes postdefoliación ya que no hay un vuelo adecuado en la fecha de predefoliación.

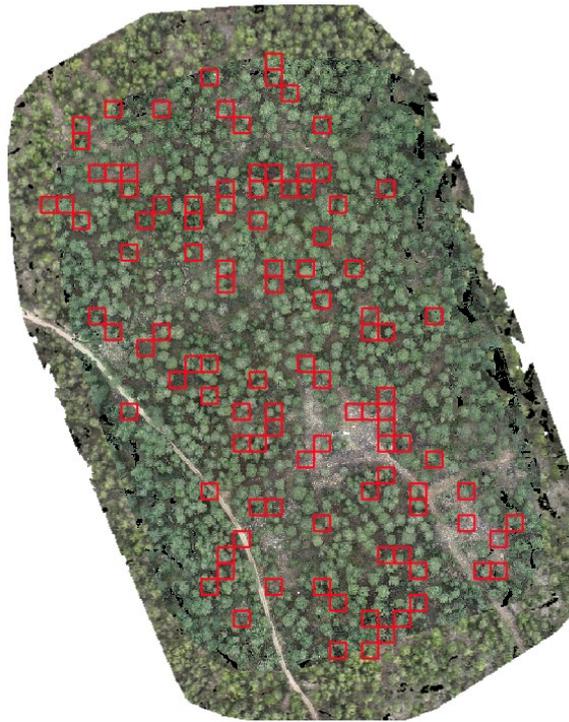


Figura 19: Localización de los píxeles seleccionados para realizar la fotointerpretación de los valores de defoliación y fracción de cabida cubierta (ejemplo parcela 1)

|    | id     | left             | top              | right            | bottom           | row_index | col_index | Filtrado | Pre_defol | Post-Defol |
|----|--------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------|-----------|----------|-----------|------------|
| 1  | 132653 | 490651.097821... | 4625660.35788... | 490661.097271... | 4625650.36339... | 152       | 265       | 1.000    | 4         | 56         |
| 2  | 132654 | 490651.097821... | 4625650.36339... | 490661.097271... | 4625640.36891... | 153       | 265       | 1.000    | 8         | 60         |
| 3  | 130654 | 490611.100020... | 4625650.36339... | 490621.099470... | 4625640.36891... | 153       | 261       | 1.000    | 5         | 38         |
| 4  | 133155 | 490661.097271... | 4625640.36891... | 490671.096722... | 4625630.37442... | 154       | 266       | 1.000    | 3         | 43         |
| 5  | 129156 | 490581.101669... | 4625630.37442... | 490591.101120... | 4625620.37994... | 155       | 258       | 1.000    | 7         | 62         |
| 6  | 131156 | 490621.099470... | 4625630.37442... | 490631.098921... | 4625620.37994... | 155       | 262       | 1.000    | 3         | 35         |
| 7  | 127656 | 490551.103319... | 4625630.37442... | 490561.102769... | 4625620.37994... | 155       | 255       | 1.000    | 10        | 65         |
| 8  | 126657 | 490531.104418... | 4625620.37994... | 490541.103868... | 4625610.38545... | 156       | 253       | 1.000    | 0         | 34         |
| 9  | 134157 | 490681.096172... | 4625620.37994... | 490691.095622... | 4625610.38545... | 156       | 268       | 1.000    | 4         | 46         |
| 10 | 131657 | 490631.098921... | 4625620.37994... | 490641.098371... | 4625610.38545... | 156       | 263       | 1.000    | 2         | 50         |
| 11 | 126658 | 490531.104418... | 4625610.38545... | 490541.103868... | 4625600.39097... | 157       | 253       | 1.000    | 3         | 52         |
| 12 | 133660 | 490671.096722... | 4625590.39649... | 490681.096172... | 4625580.40200... | 159       | 267       | 1.000    | 1         | 10         |
| 13 | 134160 | 490681.096172... | 4625590.39649... | 490691.095622... | 4625580.40200... | 159       | 268       | 1.000    | 5         | 48         |
| 14 | 127660 | 490551.103319... | 4625590.39649... | 490561.102769... | 4625580.40200... | 159       | 255       | 1.000    | 3         | 48         |
| 15 | 128160 | 490561.102769... | 4625590.39649... | 490571.102219... | 4625580.40200... | 159       | 256       | 1.000    | 2         | 35         |
| 16 | 132160 | 490641.098371... | 4625590.39649... | 490651.097821... | 4625580.40200... | 159       | 264       | 1.000    | 5         | 70         |
| 17 | 132660 | 490651.097821... | 4625590.39649... | 490661.097271... | 4625580.40200... | 159       | 265       | 1.000    | 6         | 58         |
| 18 | 127160 | 490541.103868... | 4625590.39649... | 490551.103319... | 4625580.40200... | 159       | 254       | 1.000    | 8         | 66         |
| 19 | 133661 | 490671.096722... | 4625580.40200... | 490681.096172... | 4625570.40752... | 160       | 267       | 1.000    | 2         | 35         |
| 20 | 136161 | 490721.093973... | 4625580.40200... | 490731.093423... | 4625570.40752... | 160       | 272       | 1.000    | 7         | 40         |
| 21 | 131161 | 490621.099470... | 4625580.40200... | 490631.098921... | 4625570.40752... | 160       | 262       | 1.000    | 2         | 22         |
| 22 | 133161 | 490661.097271... | 4625580.40200... | 490671.096722... | 4625570.40752... | 160       | 266       | 1.000    | 8         | 55         |
| 23 | 132161 | 490641.098371... | 4625580.40200... | 490651.097821... | 4625570.40752... | 160       | 264       | 1.000    | 3         | 22         |
| 24 | 128161 | 490561.102769... | 4625580.40200... | 490571.102219... | 4625570.40752... | 160       | 256       | 1.000    | 4         | 32         |

Figura 20: Datos de predefoliación y postdefoliación

También estimamos la Fracción de Cavidad Cubierta (FCC) de nuestros píxeles aleatorios mediante fotointerpretación de una imagen en cada parcela. Para la parcela

Evaluación de la sanidad forestal en pinares mediterráneos mediante datos satelitales y datos de dron

1 utilizamos la fecha 27-12-2022 (predefoliación) y para la parcela 2 empleamos la fecha 24-04-2023 (postdefoliación), dado que no teníamos una adquisición con dron previa a la defoliación). Posteriormente, añadimos los datos a nuestra tabla de atributos (figura 21).

|    | id     | left             | top              | right            | bottom           | row_index | col_index | Filtrado | Pre_defol | Post-Defol | FCC Pre |
|----|--------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------|-----------|----------|-----------|------------|---------|
| 1  | 132653 | 490651.097821... | 4625660.35788... | 490661.097271... | 4625650.36339... | 152       | 265       | 1.000    | 4         | 56         | 5       |
| 2  | 132654 | 490651.097821... | 4625650.36339... | 490661.097271... | 4625640.36891... | 153       | 265       | 1.000    | 8         | 60         | 10      |
| 3  | 130654 | 490611.100020... | 4625650.36339... | 490621.099470... | 4625640.36891... | 153       | 261       | 1.000    | 5         | 38         | 5       |
| 4  | 133155 | 490661.097271... | 4625640.36891... | 490671.096722... | 4625630.37442... | 154       | 266       | 1.000    | 3         | 43         | 5       |
| 5  | 129156 | 490581.101669... | 4625630.37442... | 490591.101120... | 4625620.37994... | 155       | 258       | 1.000    | 7         | 62         | 0       |
| 6  | 131156 | 490621.099470... | 4625630.37442... | 490631.098921... | 4625620.37994... | 155       | 262       | 1.000    | 3         | 35         | 3       |
| 7  | 127656 | 490551.103319... | 4625630.37442... | 490561.102769... | 4625620.37994... | 155       | 255       | 1.000    | 10        | 65         | 0       |
| 8  | 126657 | 490531.104418... | 4625620.37994... | 490541.103868... | 4625610.38545... | 156       | 253       | 1.000    | 0         | 34         | 5       |
| 9  | 134157 | 490681.096172... | 4625620.37994... | 490691.095622... | 4625610.38545... | 156       | 268       | 1.000    | 4         | 46         | 5       |
| 10 | 131657 | 490631.098921... | 4625620.37994... | 490641.098371... | 4625610.38545... | 156       | 263       | 1.000    | 2         | 50         | 3       |
| 11 | 126658 | 490531.104418... | 4625610.38545... | 490541.103868... | 4625600.39097... | 157       | 253       | 1.000    | 3         | 52         | 3       |
| 12 | 133660 | 490671.096722... | 4625590.39649... | 490681.096172... | 4625580.40200... | 159       | 267       | 1.000    | 1         | 10         | 5       |
| 13 | 134160 | 490681.096172... | 4625590.39649... | 490691.095622... | 4625580.40200... | 159       | 268       | 1.000    | 5         | 48         | 10      |
| 14 | 127660 | 490551.103319... | 4625590.39649... | 490561.102769... | 4625580.40200... | 159       | 255       | 1.000    | 3         | 48         | 5       |
| 15 | 128160 | 490561.102769... | 4625590.39649... | 490571.102219... | 4625580.40200... | 159       | 256       | 1.000    | 2         | 35         | 2       |
| 16 | 132160 | 490641.098371... | 4625590.39649... | 490651.097821... | 4625580.40200... | 159       | 264       | 1.000    | 5         | 70         | 5       |
| 17 | 132660 | 490651.097821... | 4625590.39649... | 490661.097271... | 4625580.40200... | 159       | 265       | 1.000    | 6         | 58         | 10      |
| 18 | 127160 | 490541.103868... | 4625590.39649... | 490551.103319... | 4625580.40200... | 159       | 254       | 1.000    | 8         | 66         | 5       |
| 19 | 133661 | 490671.096722... | 4625580.40200... | 490681.096172... | 4625570.40752... | 160       | 267       | 1.000    | 2         | 35         | 10      |
| 20 | 136161 | 490721.093973... | 4625580.40200... | 490731.093423... | 4625570.40752... | 160       | 272       | 1.000    | 7         | 40         | 10      |
| 21 | 131161 | 490621.099470... | 4625580.40200... | 490631.098921... | 4625570.40752... | 160       | 262       | 1.000    | 2         | 22         | 5       |
| 22 | 133161 | 490661.097271... | 4625580.40200... | 490671.096722... | 4625570.40752... | 160       | 266       | 1.000    | 8         | 55         | 5       |
| 23 | 132161 | 490641.098371... | 4625580.40200... | 490651.097821... | 4625570.40752... | 160       | 264       | 1.000    | 3         | 22         | 5       |
| 24 | 128161 | 490561.102769... | 4625580.40200... | 490571.102219... | 4625570.40752... | 160       | 256       | 1.000    | 4         | 32         | 10      |

Figura 21: Datos FCC

## 5.6. Obtención de las estadísticas para los píxeles muestreados

A continuación, se procedió a extraer las estadísticas de zona del NDVI y GNDVI de las imágenes procedentes de dron correspondientes a cada uno de los píxeles 10x10, tanto en la parcela 1 como en la parcela 2. Para ello se utilizó la herramienta de “Estadísticas de zona” en el software QGIS (figura 22).

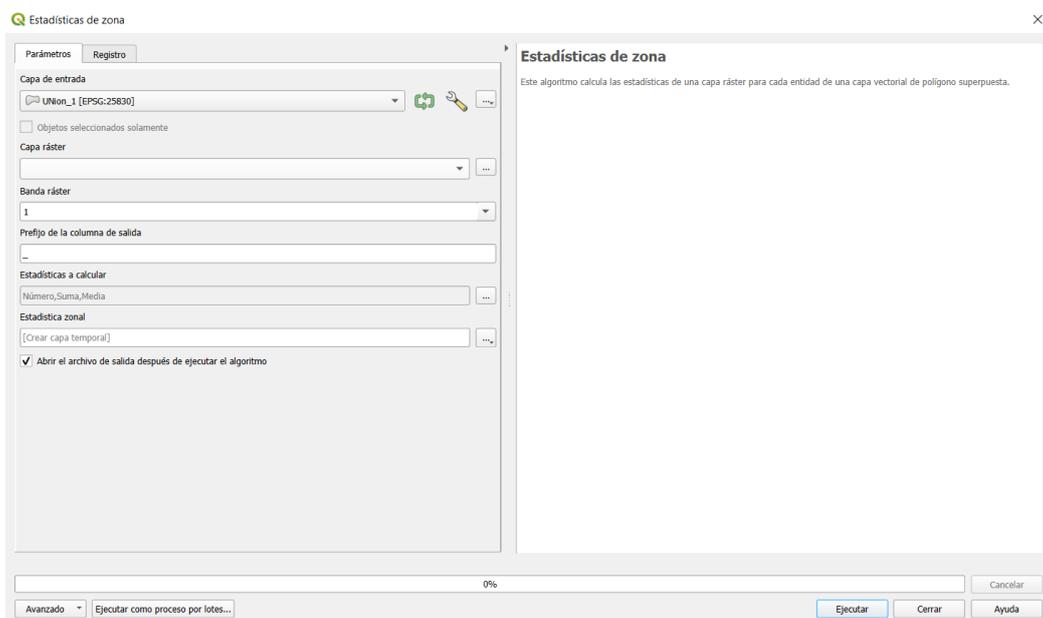


Figura 22: Herramienta de estadísticas de zona

A través de esta herramienta calculamos la estadística de las capas ráster (GNDVI y NDVI) de una capa de polígonos (selección aleatoria usada anteriormente) sacando los valores de la media, mediana, desviación estándar, mínimo y máximo de nuestras capas respecto a esa selección de puntos aleatorios (figura 23 y figura 24). Estos datos serán posteriormente analizados estadísticamente.



Figura 23: Superposición de los polígonos elegidos aleatoriamente en las parcelas 1 y 2 sobre una imagen Sentinel-2

|    | ND_31_10_2       | ND_31_10_1       | ND_31_10_3       | ND_31_10_4       | ND_31_10_5       | ND_3_12_23       | ND_3_12_1        | ND_3_12_2         | ND_3_12_3        | ND_3_12_4        | ND_03_01_2        | ND_03_01_1       | ND_03_01_3       | ND_03_01_4       | ND_03_01_5       |
|----|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 1  | 0.67890185406... | 0.67932271957... | 0.06129340930... | 0.44513276219... | 0.82408529520... | 0.76374381249... | 0.77760338783... | 0.06948240190...  | -0.1913600116... | 0.98497664928... | 0.73525928891...  | 0.75712668895... | 0.07967195318... | 0.31655880808... | 0.88741618394... |
| 2  | 0.69215511709... | 0.70251956582... | 0.05877705727... | 0.39493557810... | 0.96085262298... | 0.78085882646... | 0.78662800788... | 0.04973588954...  | 0.38416177034... | 0.97817093133... | 0.74304849718...  | 0.75451335310... | 0.06668950406... | 0.33919200201... | 0.89818829298... |
| 3  | 0.68137288600... | 0.69766905903... | 0.08648568348... | 0.28421393036... | 0.86475813388... | 0.77990139161... | 0.78764557838... | 0.06312501324...  | 0.29812225699... | 0.93641126155... | 0.75331687047...  | 0.76370754837... | 0.07977732527... | 0.01062378659... | 0.93654537200... |
| 4  | 0.73551800150... | 0.75916966795... | 0.07682295324... | 0.26818278431... | 0.86507397890... | 0.79998320548... | 0.80854800343... | 0.06336181273...  | 0.37404793500... | 0.91837352514... | 0.73589524375...  | 0.77756279706... | 0.10192132327... | 0.24107106029... | 0.91280668973... |
| 5  | 0.68826076364... | 0.71169292926... | 0.08407537570... | 0.28679731488... | 0.83634287118... | 0.76725047245... | 0.77290230989... | 0.06210345914...  | 0.20331408083... | 0.92069369554... | 0.74427710461...  | 0.75678122043... | 0.07443873058... | 0.12903138995... | 0.89322406053... |
| 6  | 0.62810439089... | 0.63457900285... | 0.09940909170... | 0.20143693685... | 0.83039027452... | 0.74688598682... | 0.75147050619... | 0.07804392677...  | 0.26252406835... | 0.89687001705... | 0.75921771444...  | 0.75800490379... | 0.04640961048... | 0.44693893194... | 0.91331845521... |
| 7  | 0.67701926728... | 0.68170827627... | 0.07581948721... | 0.37494012713... | 0.87694877386... | 0.76644243778... | 0.78288161754... | 0.07487048973...  | 0.26383399963... | 0.97967553138... | 0.71404532748...  | 0.73229327797... | 0.08703297364... | 0.22976429760... | 0.94561731815... |
| 8  | 0.69709697732... | 0.70472031831... | 0.06060788381... | 0.42923694849... | 0.86025118827... | 0.74952775343... | 0.76147818565... | 0.07225681143...  | -0.3837953507... | 0.98228746652... | 0.73705273783...  | 0.74898177385... | 0.07834177708... | 0.26168239116... | 0.98048561811... |
| 9  | 0.57401491017... | 0.55541995167... | 0.12092123366... | 0.11329536885... | 0.83025121688... | 0.73897204481... | 0.73998969793... | 0.0588299035...   | 0.17078976333... | 0.89290624856... | 0.69871516779...  | 0.72095537185... | 0.09289031441... | 0.16137380897... | 0.88733851909... |
| 10 | 0.66506730963... | 0.68691200017... | 0.08609418281... | -0.3026823699... | 0.83953744173... | 0.73746102469... | 0.74491631984... | 0.07595959385...  | -0.1131300926... | 0.95699262619... | 0.66167139737...  | 0.67969799041... | 0.10724814563... | -0.4069688916... | 0.94666069746... |
| 11 | 0.60905734996... | 0.59840172529... | 0.09171270610... | 0.14148893952... | 0.81959468126... | 0.74001916557... | 0.74529069662... | 0.05519591048...  | 0.33023133873... | 0.89236092567... | 0.72852453029...  | 0.74112981557... | 0.06364921223... | 0.15195478498... | 0.87715202569... |
| 12 | 0.72042788265... | 0.72666901688... | 0.06471022121... | 0.42070218920... | 0.86075323820... | 0.78469177917... | 0.79515373706... | 0.07105768276...  | 0.30261272192... | 0.91315680074... | 0.77630303658...  | 0.78379040956... | 0.06785269041... | 0.40198186039... | 0.90692675113... |
| 13 | 0.68683266323... | 0.71095681190... | 0.08102285235... | 0.34168434143... | 0.84404617547... | 0.78032758610... | 0.78615573048... | 0.05362392500...  | 0.19289244711... | 0.91582703590... | 0.74380469660...  | 0.75285089015... | 0.05843552156... | 0.31788870692... | 0.87570422887... |
| 14 | 0.59344529081... | 0.58379429578... | 0.12958062582... | 0.10939094424... | 0.81864500045... | 0.71987957504... | 0.72824001312... | 0.06288080922...  | -0.075454686...  | 0.90719217061... | 0.63726251030...  | 0.65295746922... | 0.11279023491... | 0.05360116064... | 0.92568945884... |
| 15 | 0.68819843316... | 0.70555096864... | 0.08420320935... | 0.15844050049... | 0.84286260002... | 0.78604020543... | 0.79740834236... | 0.06549517892...  | 0.29044255811... | 0.92179411649... | 0.71292809743...  | 0.73494672775... | 0.0909648775...  | 0.26217851042... | 0.89439839124... |
| 16 | 0.66455753578... | 0.67323613166... | 0.06877044652... | 0.2450984597...  | 0.82031458616... | 0.7702299420...  | 0.77316790819... | 0.04363201100...  | 0.45809733667... | 0.88095563650... | 0.72028871158...  | 0.73160150647... | 0.06964827060... | -0.0301513895... | 0.90649694204... |
| 17 | 0.5434855173...  | 0.53897178173... | 0.11921130539... | 0.19215384125... | 0.82360750436... | 0.71963534234... | 0.72138381004... | 0.06786369238...  | 0.33650514483... | 0.88937348127... | 0.66946509517...  | 0.68703407049... | 0.09582347233... | 0.22204984724... | 0.87684601545... |
| 18 | 0.69634387890... | 0.72045734524... | 0.08837148225... | 0.27556934952... | 0.85540598630... | 0.83021760216... | 0.83540785312... | 0.04047159381...  | 0.53405451774... | 0.91653662919... | 0.78317517208...  | 0.79088860750... | 0.04645672703... | 0.30194324254... | 0.89875113964... |
| 19 | 0.64077910977... | 0.66380038857... | 0.09709138551... | 0.20994788408... | 0.81663703918... | 0.75275587031... | 0.75493484735... | 0.05372917351...  | 0.19938322901... | 0.88774263858... | 0.68300931691...  | 0.70802736282... | 0.09994769444... | 0.15318749845... | 0.88597089052... |
| 20 | 0.65009715225... | 0.67279660701... | 0.08587901007... | 0.33341243863... | 0.82449358701... | 0.76979628768... | 0.77739584445... | 0.04994465055...  | 0.32254338264... | 0.91497230529... | 0.71147905636...  | 0.73183399438... | 0.08456770217... | 0.29378598928... | 0.89349859952... |
| 21 | 0.69167582100... | 0.71292153000... | 0.08100414895... | 0.14935576915... | 0.85982689228... | 0.79142531472... | 0.79087620973... | 0.049110164600... | 0.54770219326... | 0.90759366750... | 0.73164597228...  | 0.74779874086... | 0.09122863859... | 0.28579175472... | 0.90793974444... |
| 22 | 0.74304091487... | 0.75669234991... | 0.06138466074... | 0.37711003422... | 0.85699623823... | 0.82157666135... | 0.82970976829... | 0.05001310216...  | 0.49461868405... | 0.92386120557... | 0.78714918893...  | 0.79141390323... | 0.04706513385... | 0.51302295923... | 0.89409017562... |
| 23 | 0.65795737000... | 0.66418734192... | 0.07312172602... | 0.29665992069... | 0.82810777425... | 0.75595908359... | 0.76162487268... | 0.05357020903...  | 0.30143812298... | 0.89164394140... | 0.65292943279...  | 0.68400645256... | 0.11001295284... | 0.20654226839... | 0.87451142072... |
| 24 | 0.74363608613... | 0.74393536360... | 0.03801460001... | 0.40432036411... | 0.84010170034... | 0.70465604001... | 0.80004893451... | 0.06300878781...  | 0.50884637371... | 0.81645174360... | 0.764800314231... | 0.76626039350... | 0.04603476401... | 0.47077616030... | 0.92640881736... |

Figura 24: Datos obtenidos de las estadísticas de zona

Para extraer las estadísticas de los píxeles seleccionados de las imágenes de Sentinel-2 se tuvo que seleccionar, en primer lugar, los centroides de dichos píxeles utilizando la herramienta "Point-Sampling-Tool" en QGIS (figura 25).

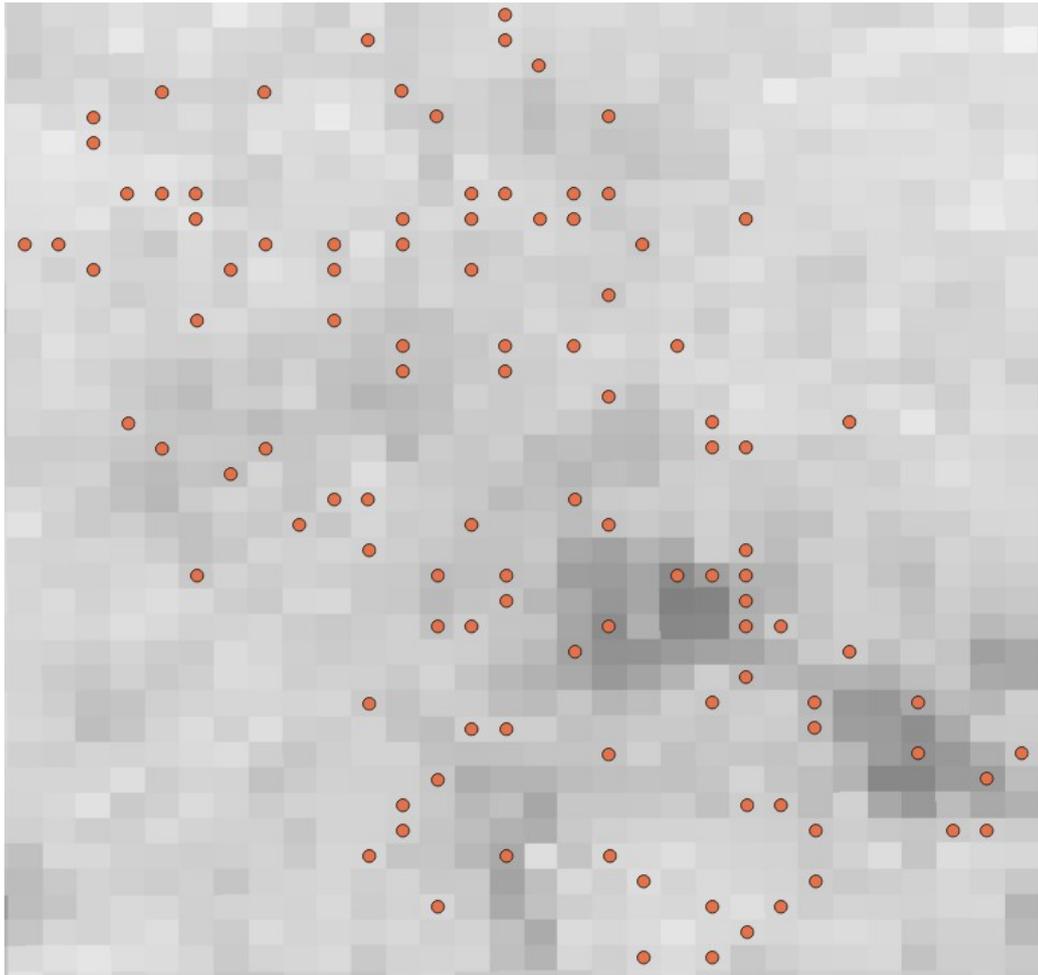


Figura 25: Centroides generados para Sentinel-2

Una vez obtenidos los centroides a través de la herramienta Point Sampling Tool extraemos los valores correspondientes a los píxeles Sentinel-2 aplicando esta herramienta a cada una de nuestras capas ráster relativas a las distintas fechas de adquisición determinadas en la tabla 1 (figura 26 y figura 27).

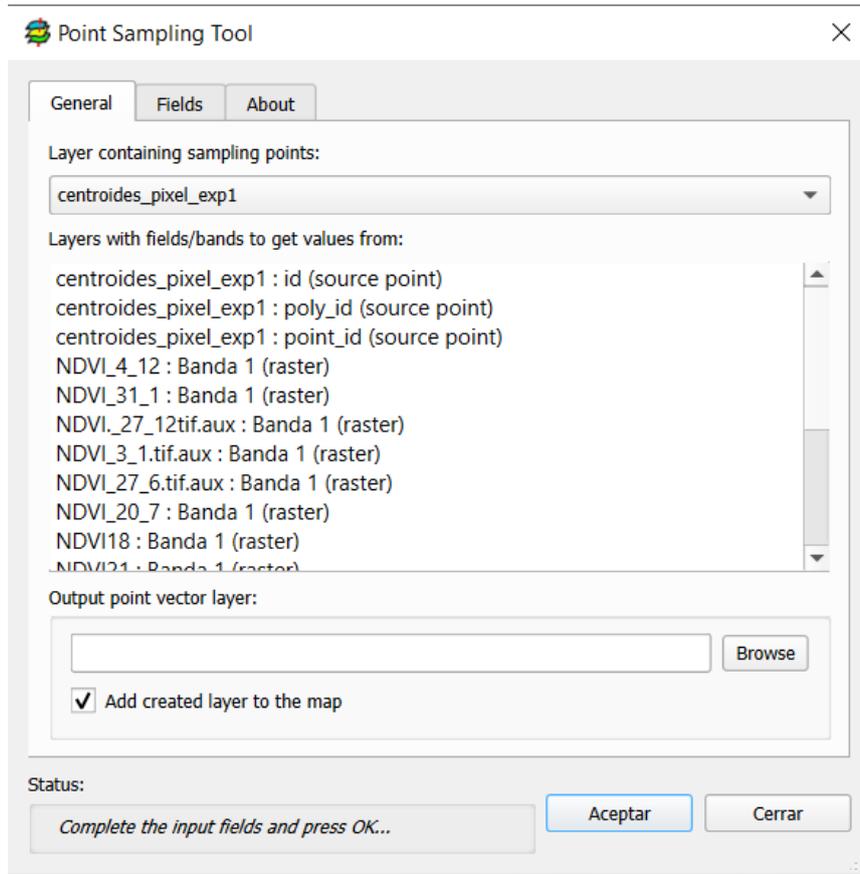


Figura 26: Herramienta de Point Sampling

| NDVI_4_12 | NDVI_31_1 | NDVI_27_1 | NDVI_3_1.1 | NDVI_27_6 | NDVI_20_7 | NDVI18  | NDVI21  | NDVI_10_10 | NDVI_13_9 | NDVI_6_4 | NDVI_17_12 |
|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|---------|---------|------------|-----------|----------|------------|
| 0.85366   | 0.64      | 0.94872   | 0.8        | 0.65625   | 0.79592   | 0.70909 | 0.62069 | 0.80392    | 0.79167   | 0.73913  | 0.90244    |
| 0.84615   | 0.65385   | 0.88235   | 0.8        | 0.66154   | 0.76923   | 0.70909 | 0.63333 | 0.79167    | 0.79167   | 0.76471  | 0.88571    |
| 0.86364   | 0.60784   | 0.86957   | 0.80488    | 0.64179   | 0.73585   | 0.66102 | 0.59322 | 0.82456    | 0.76      | 0.67347  | 0.91489    |
| 0.87755   | 0.67857   | 0.90698   | 0.82222    | 0.64179   | 0.71429   | 0.67742 | 0.58065 | 0.78571    | 0.79592   | 0.69231  | 0.95455    |
| 0.83871   | 0.66667   | 0.88462   | 0.78947    | 0.65217   | 0.7377    | 0.72727 | 0.62319 | 0.8        | 0.75862   | 0.71429  | 0.85455    |
| 0.875     | 0.62791   | 0.95      | 0.88571    | 0.62857   | 0.68421   | 0.61404 | 0.55172 | 0.80769    | 0.75      | 0.69565  | 0.89189    |
| 0.8       | 0.65625   | 0.83607   | 0.77049    | 0.66667   | 0.74545   | 0.66667 | 0.625   | 0.79412    | 0.78947   | 0.69811  | 0.86207    |
| 0.81395   | 0.64      | 0.94595   | 0.80952    | 0.66154   | 0.73077   | 0.73077 | 0.62712 | 0.78261    | 0.82222   | 0.69565  | 0.89189    |
| 0.875     | 0.59091   | 0.94286   | 0.81818    | 0.5942    | 0.62069   | 0.61404 | 0.53333 | 0.72549    | 0.71429   | 0.65217  | 0.89189    |
| 0.75758   | 0.60606   | 0.84848   | 0.76119    | 0.63889   | 0.65625   | 0.6     | 0.58824 | 0.76471    | 0.77049   | 0.63934  | 0.83607    |
| 0.84211   | 0.625     | 0.86047   | 0.8        | 0.58904   | 0.57576   | 0.53846 | 0.54545 | 0.7037     | 0.69811   | 0.60784  | 0.89744    |
| 0.88235   | 0.63265   | 0.94286   | 0.81818    | 0.62319   | 0.68421   | 0.64912 | 0.60656 | 0.76       | 0.75      | 0.71429  | 0.88889    |
| 0.84314   | 0.63636   | 0.90909   | 0.79167    | 0.64706   | 0.7037    | 0.64912 | 0.58621 | 0.75439    | 0.75      | 0.70213  | 0.91667    |
| 0.77778   | 0.56863   | 0.89474   | 0.77778    | 0.53659   | 0.51351   | 0.55882 | 0.47826 | 0.58824    | 0.51429   | 0.54098  | 0.88571    |
| 0.81481   | 0.64912   | 0.88      | 0.80392    | 0.61111   | 0.66667   | 0.625   | 0.55882 | 0.77778    | 0.74545   | 0.66667  | 0.88       |
| 0.74359   | 0.65385   | 0.85      | 0.7619     | 0.61765   | 0.68966   | 0.61404 | 0.55932 | 0.74545    | 0.72549   | 0.65957  | 0.88889    |
| 0.81818   | 0.6087    | 0.89189   | 0.7931     | 0.52778   | 0.57377   | 0.6     | 0.55556 | 0.71429    | 0.64      | 0.65385  | 0.87879    |
| 0.84615   | 0.66038   | 0.88679   | 0.82979    | 0.62319   | 0.7193    | 0.67213 | 0.6129  | 0.77049    | 0.76923   | 0.72     | 0.87755    |
| 0.76744   | 0.62264   | 0.85366   | 0.70732    | 0.60606   | 0.64912   | 0.60656 | 0.52381 | 0.73333    | 0.74074   | 0.6      | 0.85366    |
| 0.8       | 0.62264   | 0.86047   | 0.72093    | 0.5942    | 0.6875    | 0.57377 | 0.55556 | 0.7377     | 0.74545   | 0.64     | 0.85714    |
| 0.8       | 0.64286   | 0.88      | 0.82456    | 0.62857   | 0.71429   | 0.67213 | 0.61905 | 0.75       | 0.73077   | 0.72549  | 0.88       |
| 0.81132   | 0.64286   | 0.875     | 0.84906    | 0.65217   | 0.75      | 0.70492 | 0.65079 | 0.76271    | 0.81132   | 0.76     | 0.91111    |
| 0.79661   | 0.63333   | 0.84906   | 0.78182    | 0.62319   | 0.67213   | 0.6129  | 0.54545 | 0.75       | 0.72881   | 0.63636  | 0.87755    |

Figura 27: Datos estadísticos obtenido mediante Point Sampling

Tras obtener las estadísticas para las imágenes de dron y las imágenes de Sentinel-2 de todos nuestros píxeles seleccionados, procedemos a unir todos nuestros datos

Evaluación de la sanidad forestal en pinares mediterráneos mediante datos satelitales y datos de dron dentro de un Excel (figura 28) que será posteriormente utilizado como información para el cálculo de las estadísticas descriptivas en el apartado 4.7.

| id       | id   | Pre_defol | Post-Defol | FCC Pre | Sentinel 2 | S2_NDVI_4_12_2022 | S2_NDVI_3_1_2023 | S2_NDVI_4_4_2023 | S2_NDVI_6_4_2023 | S2_NDVI_18_4_2023 | S2_NDVI_21_4_2023 | S2_NDVI_31_5_2023 | S2_NDVI_15_6_2023 | S2_NDVI_27_6_2023 | S2_NDVI_29_7_2023 | S2_NDVI_13_9_2023 | S2_NDVI_10_10_2023 |
|----------|------|-----------|------------|---------|------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| 136179   | 75   | 5         | 60         | 10      | 0.521      | 0.514             | 0.425            | 0.377            | 0.356            | 0.326             | 0.348             | 0.415             | 0.455             | 0.373             | 0.486             | 0.486             | 0.500              |
| 135680   | 76   | 2         | 10         | 10      | 0.850      | 0.805             | 0.763            | 0.709            | 0.731            | 0.621             | 0.590             | 0.704             | 0.672             | 0.731             | 0.780             | 0.780             | 0.780              |
| 137180   | 77   | 8         | 28         | 5       | 0.800      | 0.778             | 0.509            | 0.739            | 0.725            | 0.607             | 0.655             | 0.673             | 0.656             | 0.755             | 0.783             | 0.789             | 0.789              |
| 138880   | 78   | 6         | 22         | 5       | 0.613      | 0.613             | 0.567            | 0.446            | 0.421            | 0.413             | 0.392             | 0.528             | 0.452             | 0.459             | 0.581             | 0.573             | 0.573              |
| 130680   | 79   | 3         | 18         | 5       | 0.763      | 0.762             | 0.792            | 0.714            | 0.655            | 0.600             | 0.696             | 0.649             | 0.806             | 0.714             | 0.750             | 0.720             | 0.720              |
| 137181   | 80   | 5         | 14         | 10      | 0.850      | 0.842             | 0.907            | 0.783            | 0.741            | 0.643             | 0.665             | 0.709             | 0.692             | 0.774             | 0.626             | 0.633             | 0.633              |
| 132681   | 81   | 3         | 15         | 10      | 0.839      | 0.833             | 0.836            | 0.754            | 0.727            | 0.667             | 0.697             | 0.688             | 0.660             | 0.797             | 0.797             | 0.813             | 0.813              |
| 132181   | 82   | 4         | 14         | 10      | 0.840      | 0.835             | 0.853            | 0.673            | 0.679            | 0.574             | 0.667             | 0.709             | 0.667             | 0.736             | 0.741             | 0.793             | 0.793              |
| 139682   | 83   | 0         | 0          | 5       | 0.935      | 0.769             | 0.828            | 0.704            | 0.738            | 0.631             | 0.663             | 0.700             | 0.667             | 0.745             | 0.760             | 0.621             | 0.621              |
| 134182   | 84   | 0         | 2          | 5       | 0.767      | 0.731             | 0.750            | 0.600            | 0.600            | 0.538             | 0.543             | 0.606             | 0.630             | 0.690             | 0.690             | 0.770             | 0.770              |
| 140182   | 85   | 4         | 20         | 10      | 0.692      | 0.680             | 0.615            | 0.556            | 0.524            | 0.477             | 0.529             | 0.569             | 0.553             | 0.569             | 0.621             | 0.656             | 0.656              |
| 139683   | 86   | 2         | 8          | 5       | 0.667      | 0.667             | 0.544            | 0.508            | 0.437            | 0.444             | 0.500             | 0.556             | 0.487             | 0.515             | 0.600             | 0.549             | 0.549              |
| 131683   | 87   | 2         | 11         | 5       | 0.654      | 0.622             | 0.492            | 0.384            | 0.383            | 0.357             | 0.383             | 0.472             | 0.402             | 0.402             | 0.515             | 0.506             | 0.506              |
| 136684   | 88   | 2         | 3          | 5       | 0.730      | 0.714             | 0.600            | 0.592            | 0.586            | 0.541             | 0.607             | 0.524             | 0.500             | 0.567             | 0.569             | 0.585             | 0.585              |
| 131184   | 89   | 3         | 12         | 10      | 0.800      | 0.750             | 0.838            | 0.636            | 0.623            | 0.544             | 0.636             | 0.636             | 0.806             | 0.655             | 0.720             | 0.731             | 0.731              |
| 136184   | 90   | 1         | 5          | 5       | 0.840      | 0.804             | 0.843            | 0.725            | 0.695            | 0.645             | 0.631             | 0.645             | 0.629             | 0.724             | 0.650             | 0.789             | 0.789              |
| 139685   | 91   | 0         | 0          | 5       | 0.783      | 0.674             | 0.745            | 0.560            | 0.515            | 0.462             | 0.531             | 0.587             | 0.514             | 0.556             | 0.660             | 0.660             | 0.660              |
| 131185   | 92   | 5         | 18         | 10      | 0.796      | 0.714             | 0.792            | 0.682            | 0.649            | 0.577             | 0.649             | 0.643             | 0.806             | 0.680             | 0.708             | 0.741             | 0.741              |
| 139185   | 93   | 1         | 7          | 10      | 0.833      | 0.778             | 0.830            | 0.702            | 0.690            | 0.588             | 0.607             | 0.649             | 0.576             | 0.698             | 0.750             | 0.752             | 0.752              |
| 137185   | 94   | 1         | 6          | 10      | 0.714      | 0.689             | 0.529            | 0.559            | 0.500            | 0.471             | 0.474             | 0.437             | 0.519             | 0.538             | 0.621             | 0.621             | 0.621              |
| 132686   | 95   | 6         | 38         | 5       | 0.730      | 0.737             | 0.714            | 0.633            | 0.593            | 0.541             | 0.633             | 0.574             | 0.583             | 0.633             | 0.692             | 0.684             | 0.684              |
| 130686   | 96   | 3         | 7          | 10      | 0.763      | 0.822             | 0.750            | 0.640            | 0.633            | 0.574             | 0.633             | 0.698             | 0.818             | 0.709             | 0.767             | 0.767             | 0.767              |
| 134186   | 97   | 7         | 23         | 10      | 0.800      | 0.800             | 0.787            | 0.673            | 0.638            | 0.559             | 0.613             | 0.614             | 0.606             | 0.673             | 0.714             | 0.750             | 0.750              |
| 137187   | 98   | 1         | 11         | 5       | 0.833      | 0.778             | 0.675            | 0.710            | 0.710            | 0.619             | 0.700             | 0.695             | 0.672             | 0.745             | 0.765             | 0.786             | 0.786              |
| 134887   | 99   | 5         | 20         | 10      | 0.793      | 0.770             | 0.745            | 0.630            | 0.625            | 0.582             | 0.600             | 0.667             | 0.589             | 0.667             | 0.741             | 0.763             | 0.763              |
| 131688   | 100  | 3         | 10         | 5       | 0.647      | 0.644             | 0.667            | 0.500            | 0.462            | 0.429             | 0.477             | 0.467             | 0.456             | 0.485             | 0.551             | 0.556             | 0.556              |
| 136688   | 101  | 1         | 10         | 5       | 0.552      | 0.564             | 0.467            | 0.429            | 0.397            | 0.389             | 0.386             | 0.397             | 0.436             | 0.405             | 0.438             | 0.438             | 0.500              |
| 135688   | 102  | 6         | 15         | 5       | 0.786      | 0.769             | 0.565            | 0.574            | 0.525            | 0.462             | 0.548             | 0.581             | 0.506             | 0.567             | 0.633             | 0.623             | 0.623              |
| 136189   | 103  | 1         | 11         | 5       | 0.593      | 0.607             | 0.531            | 0.500            | 0.459            | 0.444             | 0.447             | 0.515             | 0.487             | 0.486             | 0.574             | 0.528             | 0.528              |
| 135690   | 104  | 2         | 7          | 5       | 0.800      | 0.742             | 0.625            | 0.640            | 0.574            | 0.518             | 0.613             | 0.607             | 0.547             | 0.619             | 0.660             | 0.621             | 0.621              |
| 134690   | 105  | 8         | 31         | 5       | 0.778      | 0.769             | 0.796            | 0.702            | 0.679            | 0.627             | 0.655             | 0.660             | 0.606             | 0.720             | 0.783             | 0.789             | 0.789              |
| Promedio | 3.61 | 25.92     | 6.90       |         | 0.767      | 0.763             | 0.764            | 0.654            | 0.627            | 0.564             | 0.615             | 0.635             | 0.609             | 0.670             | 0.726             | 0.726             | 0.726              |
| Mínimo   | 0    | 0         | 0          |         | 0.521      | 0.514             | 0.425            | 0.377            | 0.356            | 0.326             | 0.348             | 0.397             | 0.402             | 0.373             | 0.438             | 0.438             | 0.438              |
| Máximo   | 10   | 70        | 10         |         | 0.882      | 0.886             | 0.918            | 0.783            | 0.781            | 0.667             | 0.723             | 0.770             | 0.743             | 0.833             | 0.849             | 0.849             | 0.849              |

Figura 28: Excel con todos nuestros datos estadísticos de cada una de nuestras variables

### 5.7. Descripción de los valores de defoliación e índices espectrales

A continuación, pasamos a realizar la estadística descriptiva calculando el promedio, mínimo y máximo de nuestras variables (defoliación y FCC medida visualmente, así como índices de vegetación de Sentinel-2 y dron para las distintas fechas de adquisición) (figura 29). También realizamos gráficos de las distintas variables, teniendo en cuenta si son datos de Sentinel-2 o dron y si corresponden a los índices espectrales GNDVI o NDVI.

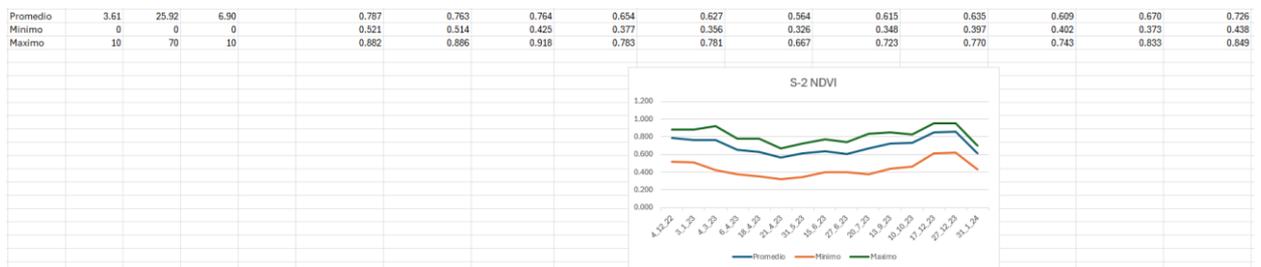


Figura 29: Extracción de promedio, mínimo y máximo de nuestros datos.

### 5.8. Determinación de clases de defoliación

En este apartado se presenta la metodología utilizada para definir clases de defoliación y las clases en cambio de defoliación (diferencia entre los valores postdefoliación y predefoliación) que posteriormente servirá para analizar si existen diferencias estadísticamente significativas entre las clases establecidas en relación con los valores de los índices espectrales calculados (apartado 4.9). Es preciso señalar que este análisis se aplicó en la parcela 1 ya que en la parcela 2 no se disponía de imágenes de

dron que caracterizaran la fecha previa a la defoliación. Para ello se utilizó el programa R en base a la adaptación de un script proporcionado por miembros del grupo Cambium.

Para establecer las clases de defoliación y las clases en cambio de defoliación (diferencia entre los valores postdefoliación y predefoliación) utilizamos un análisis visual basado en la generación de histogramas usando valores de post defoliación para distinguir clases de defoliación en dicha fecha. Previo a este análisis, eliminamos los polígonos que no contengan datos (espacios vacíos en la tabla) como se muestra en la figura 30 y posteriormente generar los histogramas (figura 31).

```
#directorio de trabajo
setwd("C:/Users/estep/OneDrive/Escritorio/Análisis estadístico")

datos_0<-read.table("Parcela_1.txt",header=TRUE, sep = ("\t"))
datos_0<-as.data.frame(lapply(datos_0,as.numeric))
datos_0<-na.omit(datos_0)
str(datos_0)
```

Figura 30: Script para eliminar los polígonos vacíos

```
# 1. Histograma
p <- datos_0 %>%
  ggplot(aes(x=Post_defol)) +
  geom_histogram(binwidth=3, color="#e9ecef", alpha=0.9) +
  #scale_fill_manual(values =c("#bd7466","#648b7f","#e7d292","#465d91")) + #quitar si lo ejecutas para una sola especie
  xlim(0,75)+
  ggtitle("Defoliación abril") +
  theme_ipsum() +
  theme(
    plot.title = element_text(size=10)
  )
p
summary(datos_0$Post_defol)
```

Figura 31: Script para generar los histogramas

Tras analizar el histograma determinamos tres clases, defoliación baja a la que se le asigna el número 0, defoliación media asignando el número 1 y defoliación alta asignándole el número 2.

## 5.9 Análisis de diferencias estadísticamente significativas entre clases

Una vez determinadas las clases de defoliación pasamos al análisis de varianza para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre las clases definidas. Concretamente este análisis se realizó en base a los datos post defoliación para ver si somos capaces de distinguir las clases de defoliación en una misma fecha y utilizando la diferencia entre el periodo pre y post defoliación para ver si se pueden distinguir categorías de cambio de defoliación.

El análisis de varianza hace uso de prueba estadísticos que deben seleccionarse en función de las características de los datos de partida, concretamente en función de la normalidad de estos. Por ello, en primer lugar, tenemos que hacer un análisis previo mediante la prueba de Shapiro para comprobar si nuestras variables son normales. Previo a la prueba de Shapiro Wilk los datos se prepararon transformando las variables

a formato numérico y eliminando aquellas variables que tuvieran una varianza cero (figura 32).

```
# 3.1. Shapiro test
df<-datos

# Extract names for numeric columns
numeric_vars<-df%>%select_if(is.numeric)%>%names()
# Drop non numeric columns
df<-df%>%
  select(all_of(numeric_vars))

# Extract zero variance variables first
zero_var_columns<-nearZeroVar(df, saveMetrics = TRUE)%>%
  filter(zeroVar==TRUE)%>%
  row.names()
# Show
zero_var_columns
# Drop zero variance columns
df<-df%>%
  select(-all_of(zero_var_columns))
```

Figura 32: Preparación de los datos antes de ejecutar la prueba de Shapiro Wilk

La prueba de Shapiro Wilk es una prueba estadística utilizada para verificar la normalidad de una muestra de datos o conocer si los datos provienen de una distribución normal. Esta prueba es sensible para muestras muy grandes y también para muestras pequeñas y se calculó usando el 95% de probabilidad (figura 33). La prueba de normalidad se realizó para los valores originales (sin transformar) y, en aquellos casos que no cumplieran la normalidad, los valores se transformaron a logaritmo y a raíz cuadrada.

```
lshap <- lapply(df, shapiro.test)
lres <- sapply(lshap, `[`, c("statistic", "p.value"))
lres<-as.data.frame(t(lres))
lres<-lres[lres$p.value >=0.05,]
```

Figura 33: Script para verificar la normalidad de nuestros datos

En caso de que los datos no fueran normales se aplicó la prueba de Kruskal-Wallis, la cual es una prueba estadística no paramétrica y se utiliza para determinar si hay diferencias significativas entre las medianas de tres o más grupos independientes (figura 34).

```
-----
# 4. kruskal wallis automatizado
#####
install.packages('tidyr')
install.packages('broom')
library(tidyr)
library(broom)

df<-datos[,-1:-6]
results <- list()
for(i in names(df[,1:58])){
  results[[i]] <- kruskal.test(formula(paste(i, "~ def_mean_clases")), data = df)
}
df2 <- df %>% gather(key, value, -def_mean_clases) %>%
  group_by(key) %>%
  do(tidy(kruskal.test(x= .$value, g = .$def_mean_clases)))
results_kruskal<-df2[df2$p.value <0.05, ]
results_kruskal<-na.omit(results_kruskal)
results_kruskal$reclass<-c("kruskal_def_mean_clases")
kruskal_def_mean_clases<-results_kruskal
```

Figura 34: Script de Krusal Wallis

Para poder determinar qué clases son diferentes estadísticamente entre sí, tenemos que aplicar test de Dunn (figura 35). Esta prueba es una prueba utilizada para realizar comparaciones múltiples después de haber llevado a cabo una prueba de Kruskal-Wallis.

```
# 4.1. Posthoc test: test de Dunn
#####
install.packages('dunn.test')
install.packages('FSA')
library(dunn.test)
library(FSA)

df$def_mean_clases<-as.factor(df$def_mean_clases)
# str(df)

#Sacar el nombre de las variables que muestran diferencias estadísticamente significativas en el test de kruskal wallis
kruskal_def_mean_clases$key
```

Figura 35 Script de la prueba de Dunn

Tras obtener la información de nuestro análisis estadístico para la parcela 1, procedemos a unir nuestros datos dentro de un Excel para utilizarla como información para la construcción de distintas graficas (véase apartado 6.3.3)

## 6. Resultados



## 6.1. Análisis descriptivo

En este apartado se presenta la descripción de los valores de defoliación (pre y post), los valores de FCC y las estadísticas de los índices espectrales (NDVI y GNDVI) para los dos sensores (dron y Sentinel-2). Además, se comparan los valores entre dron y Sentinel-2. Primeramente, se comentan los resultados para la parcela 1 y posteriormente para la parcela 2 en la que no tenemos datos del periodo predefoliación.

### 6.1.1. Parcela 1

Según se observa en la tabla 1, el promedio de defoliación determinado visualmente para la fecha predefoliación se encuentra en torno al 3% mientras que aumentó al 25% en la fecha postdefoliación, con píxeles concretos que alcanzaron un máximo de 70% (tabla 3).

En el caso de la FCC podemos observar que presenta un promedio entono al 69%, con un mínimo 0% ya que serán zona sin cubierta vegetal o caminos y con un máximo de 100% las cuales indican una masa densa (tabla 3).

Tabla 3. Valores predefoliacion, postdefoliacion y FCC para la parcela 1

|          | Predefoliación | Postdefoliación | FCC |
|----------|----------------|-----------------|-----|
| Promedio | 3.61           | 25.92           | 69  |
| Mínimo   | 0              | 0               | 0   |
| Máximo   | 10             | 70              | 100 |

#### 6.1.1.1 Sentinel-2 NDVI

En la figura 36 se observa que el valor medio más bajo de NDVI capturado por Sentinel-2 para el conjunto de píxeles en la serie analizada (diciembre de 2022 a enero de 2024) es de 0.56 correspondiendo a julio de 2023 y el valor medio más alto es de 0.76 correspondiente a abril de 2023. El rango de valores de NDVI se encuentran, en su mayoría, entre 0.60 y 0.80. Como podemos observar en este gráfico la tendencia de los estadísticos promedio, mínimo, y máximo es similar.

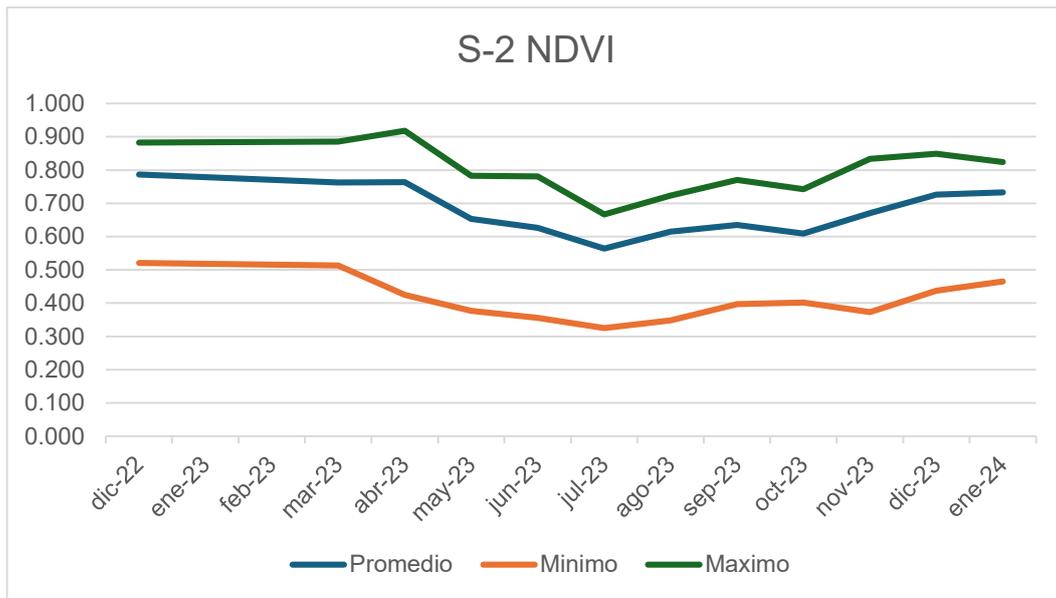


Figura 36. Evolución de los valores de NDVI para Sentinel-2 en la parcela 1

### 6.1.1.2 Sentinel-2 GNDVI

La serie de valores analizados del índice GNDVI de Sentinel-2 muestra que el promedio de los píxeles analizados con valor más bajo corresponde a 0.58 en julio y el más alto es 0.80 en abril. También observamos que la mayoría de los valores se encuentran entre 0.58 y 0.70 (figura 37). Como en el caso del NDVI, los tres estadísticos siguen una tendencia similar, aunque aquí se puede observar que el mínimo no sufre una subida tan pronunciada como el promedio y el máximo en abril.

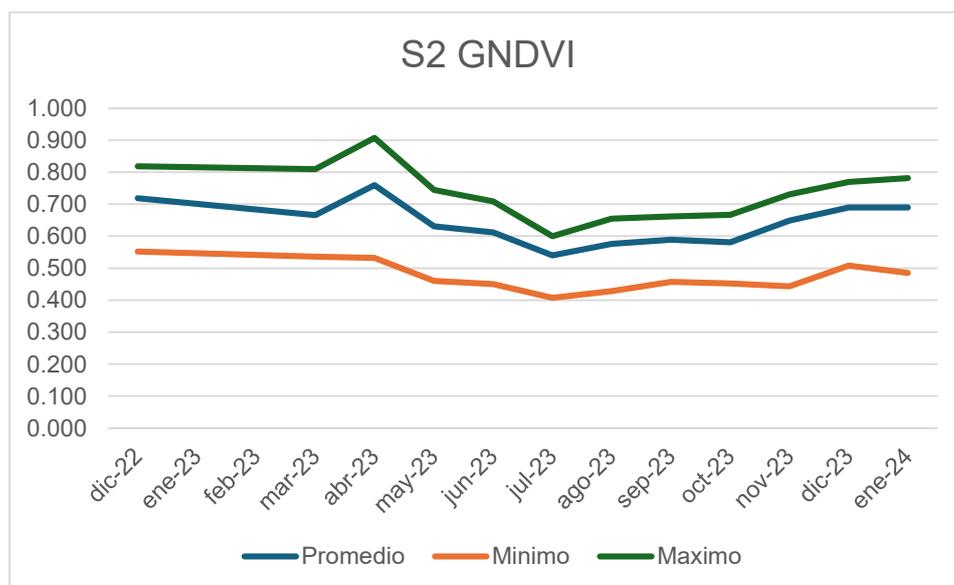


Figura 37: Evolución de los valores de NDVI para Sentinel-2 en la parcela 1

### 6.1.1.3 Dron-NDVI

Los valores de NDVI adquiridos con el dron muestran que el promedio mínimo de la serie analizada se localiza en marzo y el valor más alto de 0.62 corresponde a abril. La mayoría de estos valores se encuentran entre 0.6 y 0.7 (figura 38). En esta gráfica podemos observar una tendencia muy similar por parte de los 3 valores calculados, aunque el descenso en marzo es mucho más marcado en el mínimo que en el promedio y el máximo.

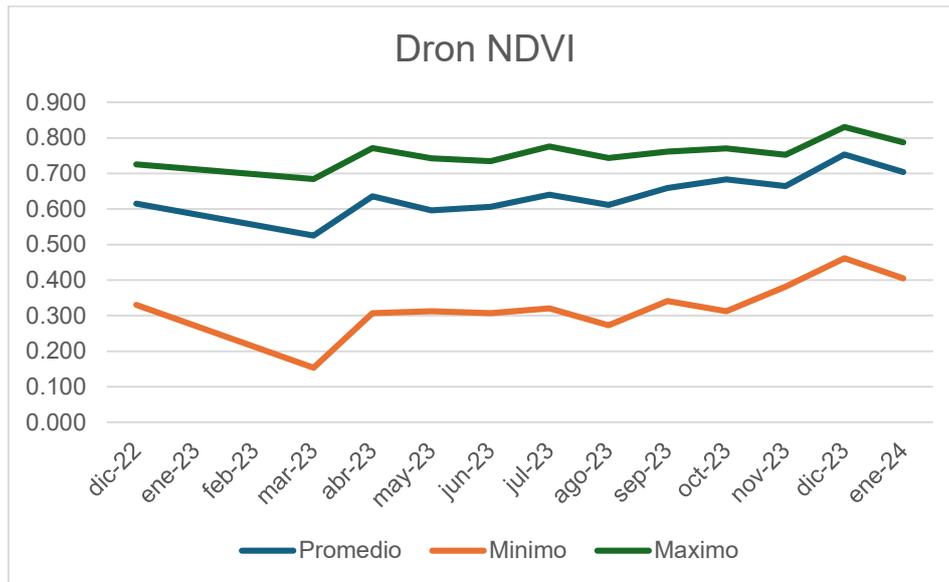


Figura 38: Evolución de los valores de NDVI para dron en la parcela 1

### 6.1.1.4 Dron-GNDVI

Como en el caso del NDVI, el promedio mínimo de GNDVI adquirido por dron corresponde a marzo con 0.48 mientras que el valor más alto es de 0.62 correspondiente a abril. Los valores de GNDVI se encuentran en este caso en su mayoría entre 0.6 y 0.7 (figura 39). En esta gráfica los 3 datos muestran una tendencia muy similar, aunque en el caso del mínimo presenta una gran diferencia respecto a los otros dos datos en marzo. Mientras que el máximo y el mínimo sufren una pequeña caída, el mínimo sufre un descenso bastante característico.

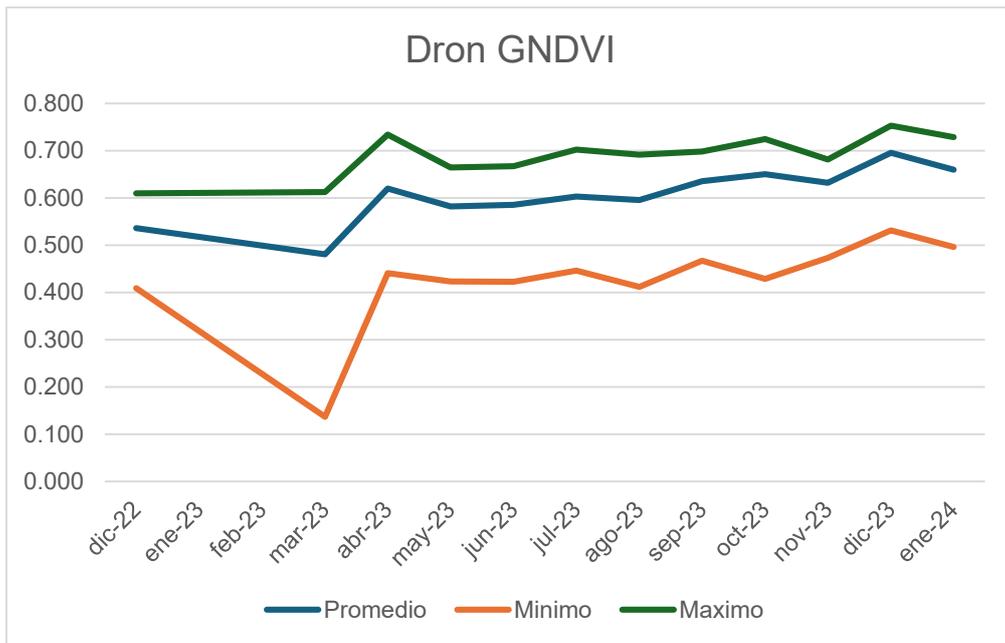


Figura 39: Evolución de los valores de GNDVI para dron en la parcela 1

### 6.1.1.5 Graficas Comparativas

A continuación, tenemos gráficas comparativas entre nuestros datos Sentinel-2 y dron. Para poder hacer esta comparación se ha seleccionado una fecha por mes (ver apartado 5.1).

En el caso del promedio de NDVI podemos observar una tendencia más o menos similar entre los valores de Sentinel-2 y dron en algunas fechas (mayo-octubre 2023), aunque cabe destacar que en las primeras fechas los valores de Sentinel-2 difieren de los del dron. En los meses de diciembre de 2023 y enero de 2024 se puede observar que los datos de Sentinel-2 sufren una caída mucho mayor que los de dron (figura 40).

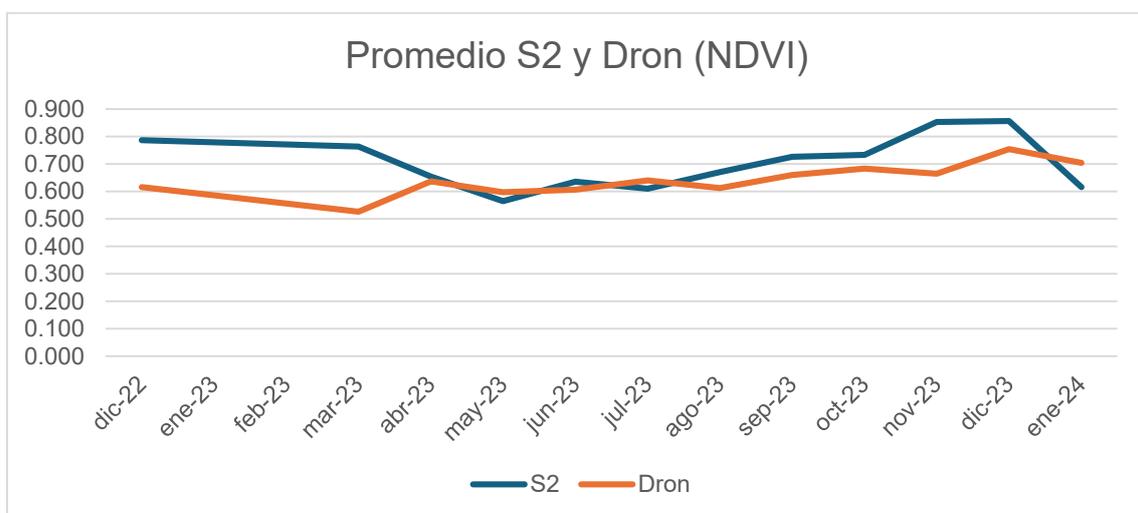


Figura 40. Grafica comparativa del promedio de S2 y Dron (NDVI) en la parcela 1

### Promedio S2 y Dron GNDVI

En el caso del promedio del índice GNDVI se observa una tendencia muy similar entre mayo y octubre de 2023, aunque cabe destacar la gran diferencia de valores al inicio y al final de la serie analizada (figura 41).

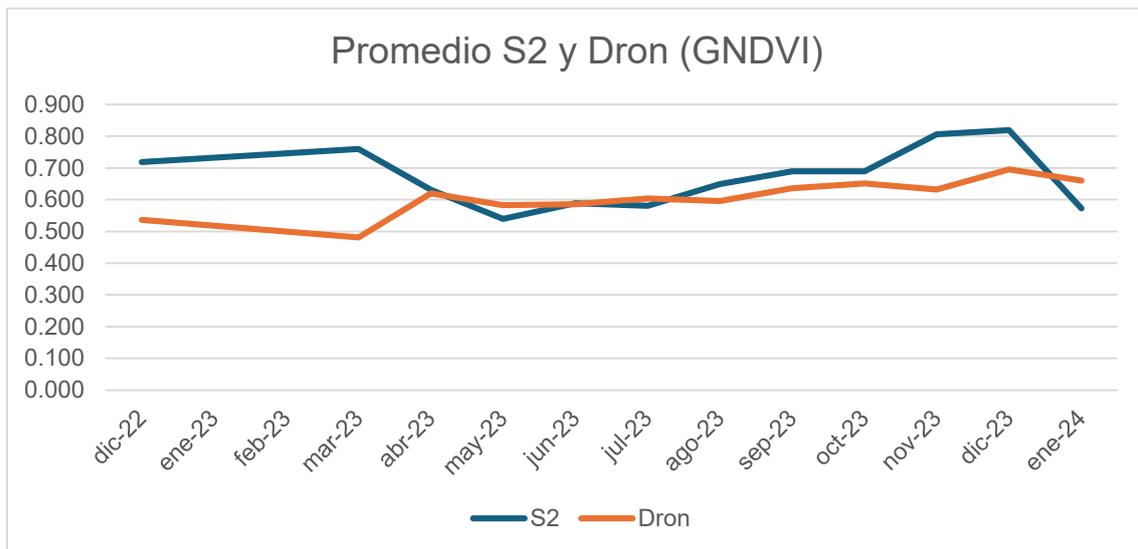


Figura 41: Grafica comparativa del promedio de S2 y Dron (GNDVI) en la parcela 1

### 6.1.2. Parcela 2

La tabla 4 recoge los valores determinados visualmente para el periodo de post defoliación (abril de 2023). Podemos observar un valor promedio en torno al 25% en la parcela dos y un máximo de 68%.

Respecto a la fracción de cabida cubierta el promedio está en torno a 70% con un mínimo de cero, asociado a zonas sin cubierta vegetal y un máximo de 90%.

Tabla 4. Valores postdefoliacion y FCC para la parcela 2

|          | Postdefoliación (%) | FCC (%) |
|----------|---------------------|---------|
| Promedio | 25.12               | 70      |
| Mínimo   | 0                   | 0       |
| Máximo   | 68                  | 90      |

#### 6.1.2.1 Sentinel-2 NDVI

En el caso del promedio mínimo de NDVI de la serie analizada es de 0.54 correspondiente a julio y el valor más alto es 0.79 correspondiente a abril. A lo largo de

la serie los valores fluctúan entre 0.5 a 0.8 pero sobre todo se encuentran en torno a la cifra de 0.7 (figura 42).

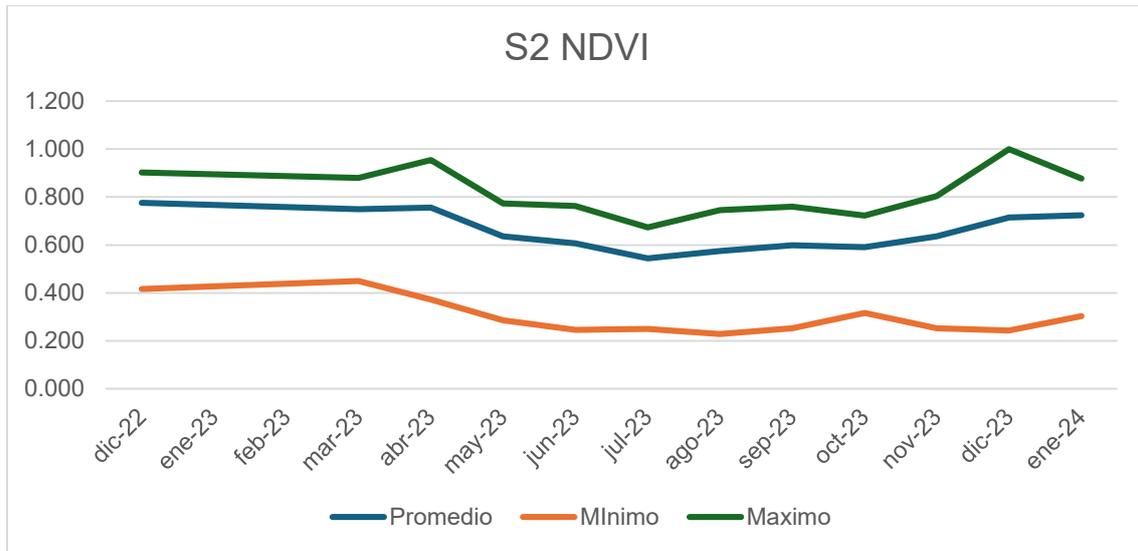


Figura 42: Evolución de los valores de NDVI para S2 en la parcela 2

#### 6.1.2.2 Sentinel-2 GNDVI

En el caso del promedio de GNDVI el valor más bajo de la serie es de 0.51 correspondiente a julio y el valor más alto es 0.78 correspondiente a abril coincidiendo con los picos observados en el NDVI. La serie presenta valores promedio en torno a 0.6 (figura 43). Al igual que la gráfica anterior los tres estadísticos tienen tendencias muy similares, aunque cabe destacar en el caso del máximo que en el mes de octubre hay un incremento que no se observa en el mínimo ni en el promedio.

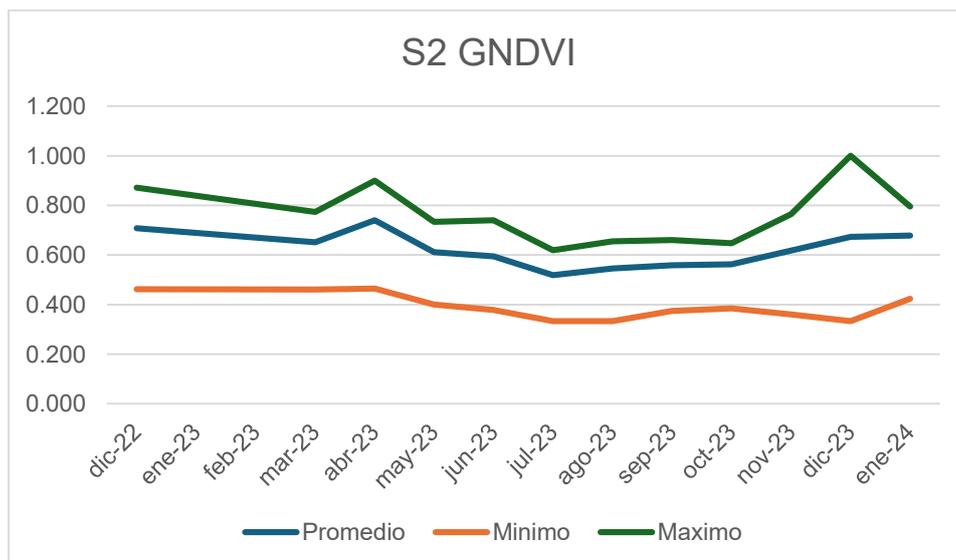


Figura 43: Evolución de los valores de GNDVI para S2 en la parcela 2

### 6.1.2.3 Dron-NDVI

Los valores de NDVI adquiridos con dron muestran el valor promedio más alto en diciembre (27/12/2023) con 0.71 y el valor más bajo es 0.48 correspondiente a diciembre de 2022. La mayoría de los valores están próximos tanto a 0.6 y 0.7 (figura 44).

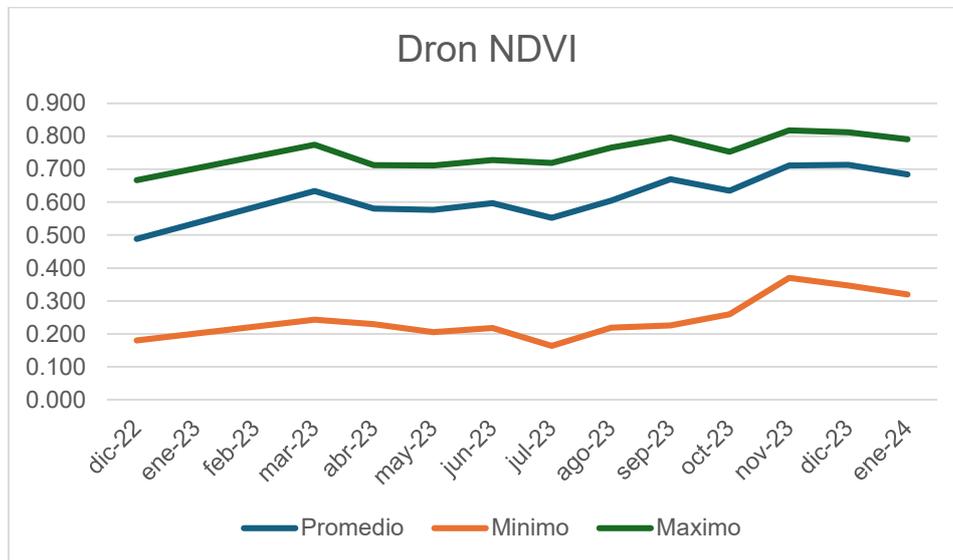


Figura 44: Evolución de los valores de NDVI para dron en la parcela 2

### 6.1.2.4 Dron-GNDVI

El valor promedio más bajo de la serie de GNDVI es de 0.35 y se alcanzó en mayo mientras que su valor más alto es 0.65 en noviembre (figura 45). El GNDVI presenta valores medios en torno a 0.5.

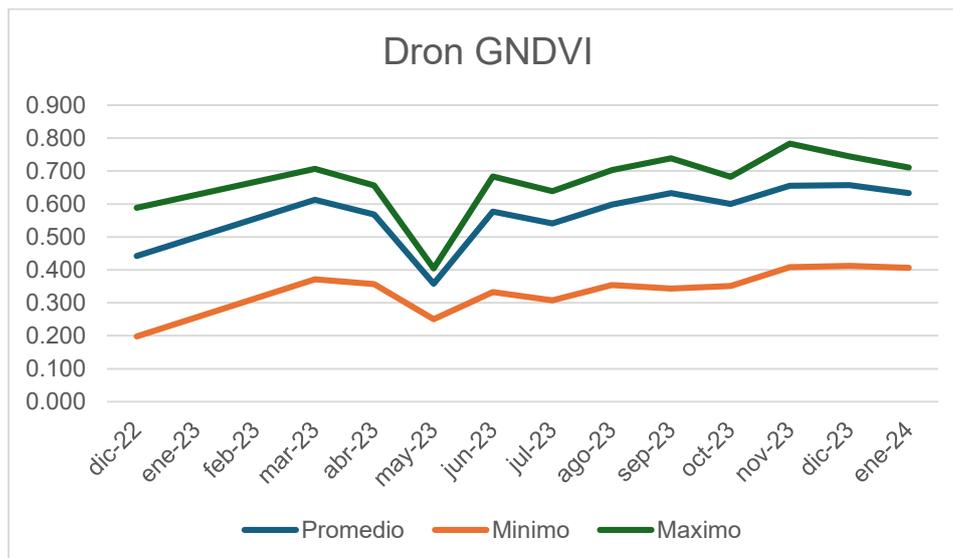


Figura 45: Evolución de los valores de GNDVI para dron en la parcela 2

### 6.1.2.5 Tablas comparativas

Entre S2 y dron con los distintos valores calculados.

En el caso del promedio de NDVI Sentinel-2 presenta valores muy similares a los adquiridos con el dron mostrando tendencias similares con un descenso al inicio de la serie y un posterior ascenso en los valores a partir de mayo de 2023 hasta diciembre de dicho año y el comienzo de un nuevo descenso en enero 2024, este último mucho más marcado en el caso de Sentinel-2 que el dron (figura 46).

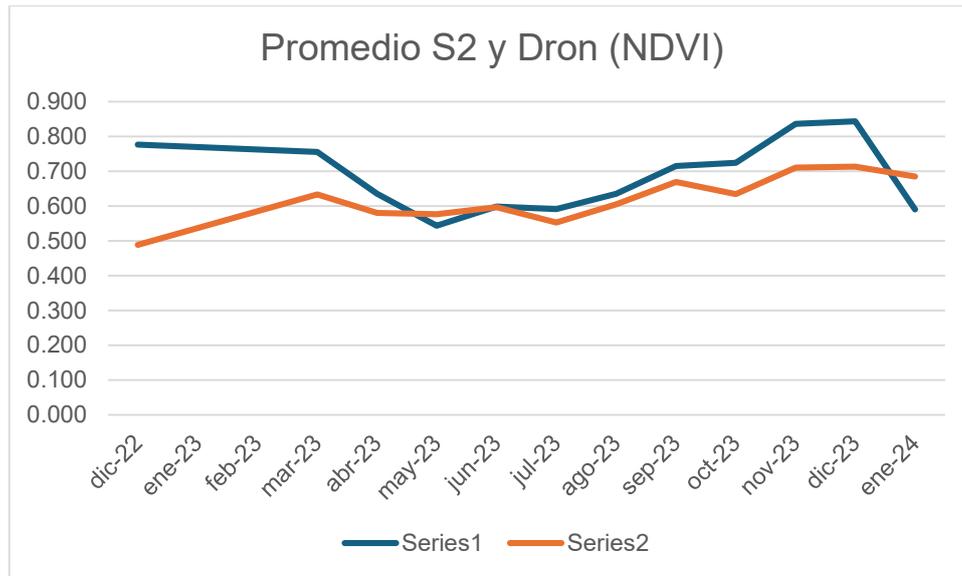


Figura 46: Grafica comparativa del promedio de S2 y Dron (NDVI) en la parcela 2

En el caso del promedio en el índice GNDVI podemos ver tendencias similares a las comentadas para el NDVI (figura 47).

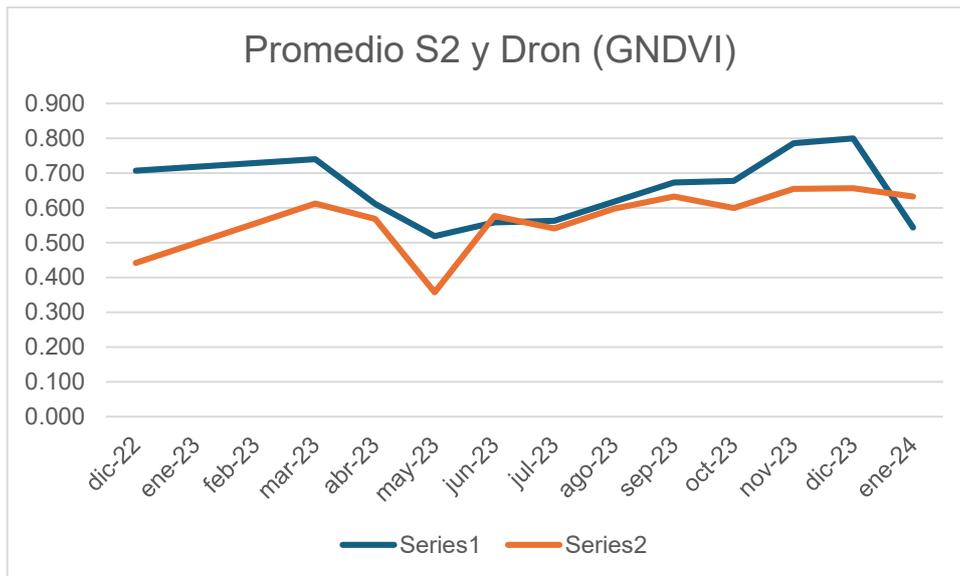


Figura 47: Grafica comparativa del promedio de S2 y Dron (NDVI) en la parcela 2

### 6.2. Clases de defoliación establecidas

Podemos observar que los rangos de defoliación en la fecha post-defoliación (abril de 2023) van entre 2.6 y 70. En el histograma se observa un pico en torno al rango 0-20 y un segundo pico, que podría ser una subpoblación, en torno a 25-50. A partir de estos datos definimos tres clases de defoliación (Figura 48):

Baja: < 20%

Media: 20-40%

Alta: >40%

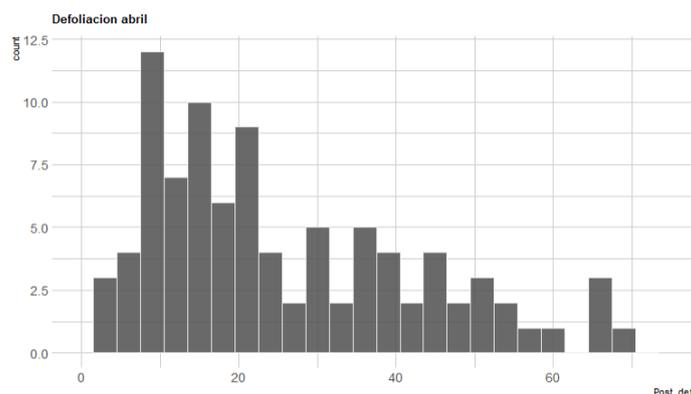


Figura 48: Histograma generado

Llevamos a cabo el mismo proceso que en el caso de la postdefoliación para la diferencia de defoliación.

En este caso se puede observar que las variables van de 0 a 70 y presenta una distribución similar a la anterior, donde 0 a 20 se presentan los mayores valores,

seguidos de 20 a 40 y en torno a 60 los valores más bajos. De esta manera establecemos las clases de defoliación manteniendo las establecidas previamente para la fecha postdefoliación, 0-20 (baja) 20-40 (media) y mayor de 40 (alta). (Figura 49)

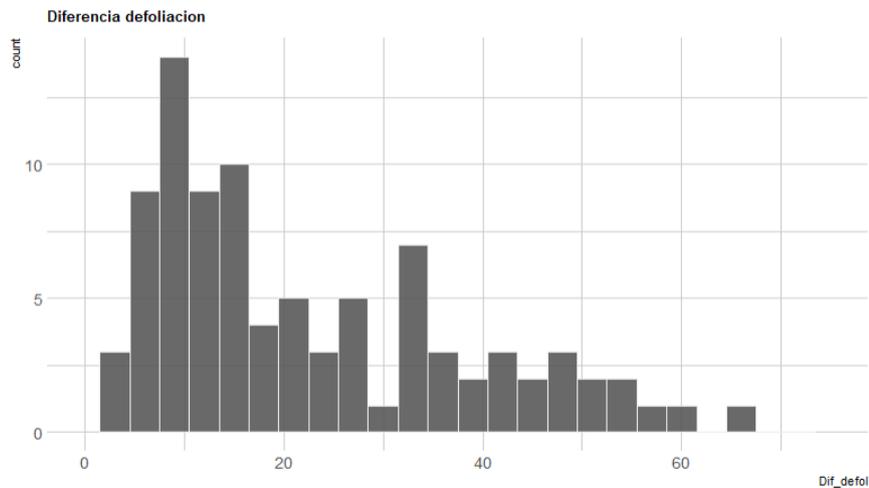


Figura 49: Histograma de la diferencia de defoliación

### 6.3 Análisis de diferencias estadísticamente significativas entre clases de defoliación

Una vez se determinan las tres clases de defoliación (figura 50) se procede al análisis estadístico de la varianza.

```
datos<- transform(datos_0,def_mean_clases=ifelse(Post_defol<20, 0,
                                                ifelse(Post_defol >=20 & Post_defol <=40,1,
                                                ifelse(Post_defol >40,2,3))))
```

Figura 50: Script para clasificar según las clases establecidas

Previo al análisis de varianza, verificamos si nuestras variables presentaban una distribución normal aplicando el test de Shapiro Wilk (figura 51).

```
lshap <- lapply(df, shapiro.test)
lres <- sapply(lshap, `[`, c("statistic","p.value"))
lres<-as.data.frame(t(lres))
lres<-lres[lres$p.value >=0.05,]
```

Figura 51: Shapiro test

Los resultados de la prueba de Shapiro Wilk muestran que una única métrica muestra una distribución normal correspondiente a la diferencia del GNDVI en Sentinel-2 (tabla 5).

|              | statistic                | p.value           |
|--------------|--------------------------|-------------------|
| id           | c(W = 0.982774518773875) | 0.246795878011818 |
| S2_GNDVI_dif | c(W = 0.987589815158954) | 0.516228221810272 |

Tabla 5: Resultados verificación de normalidad de los datos

Posteriormente, procedemos a transformar nuestras variables a logaritmo para ver si de esta manera el conjunto de las variables presenta una distribución normal (figura 52).

```
#transformar a logaritmo
df_log<-log(abs(df[,1:ncol(df)]))
df<-cbind(df[,1:12],df_log)
df[df == -Inf] <- 0
```

Figura 52: Script para transformar en logaritmo

Los resultados del test de Shapiro Wilk realizado con las variables transformadas logarítmicamente nos indica que tres variables presentan una distribución normal (Sentinel-2 GNDVI y NDVI diferencias) (tabla 6).

|                | statistic                | p.value           |
|----------------|--------------------------|-------------------|
| id             | c(W = 0.982774518773875) | 0.246795878011818 |
| S2_GNDVI_dif   | c(W = 0.987589815158954) | 0.516228221810272 |
| id.2           | c(W = 0.981982213480562) | 0.216494792471851 |
| S2_NDVI_dif.1  | c(W = 0.985935331608987) | 0.406656064386752 |
| S2_GNDVI_dif.1 | c(W = 0.980732261132439) | 0.1755494712641   |

Tabla 6: Resultados tras transformar a logaritmo

Tras ello procedemos a repetir este análisis de normalidad transformado a raíz cuadrada nuestras variables (figura 53).

```
#transformar a raíz cuadrada
df_sqrt <- sqrt (abs(df[,9:ncol(df)]))
df<-cbind(df[,1:7],df_sqrt)
```

Figura 53: Script para transformar a raíz cuadrada

|               | statistic                | p.value           |
|---------------|--------------------------|-------------------|
| id            | c(W = 0.982774518773875) | 0.246795878011818 |
| Dron_NDVI_dif | c(W = 0.987352765228536) | 0.499534582967342 |

Tabla 7: Resultados tras transformar a raíz cuadrada

Tras transformar a raíz cuadrada obtenemos únicamente una única variable referida a la diferencia del NDVI entre la fecha post y predefoliación con dron presenta diferencias estadísticamente significativas entre clases.

Como podemos observar nuestros datos no presentan, en su gran mayoría, una distribución normal por lo que se aplica de forma generalizada a todas las variables el método de Kruskal Wallis y la prueba de Dunn (apartado 6.3.1).

## 6.3.1. Resultados para las clases determinadas en la fecha postdefoliación

Tras aplicar Kruskal Wallis y el test de Dunn, en el caso de la variable postdefoliacion (abril de 2023) se han determinado un total de 12 métricas (asociadas a fechas de adquisición) que muestran diferencias estadísticamente significativas entre las clases de defoliación determinadas, las cuales incluyen a los índices NDVI y GNDVI para fechas desde diciembre del año 2022 a enero del año 2024 (tabla 7).

Tabla 7: Estadísticas de Kruskal Wallis y de la prueba de Dunn para el análisis de las clases definidas en el periodo postdefoliacion (abril 2023).

| Métrica             | Kruskall Wallis (p-valor) | Test de Dunn      |                   |                   |
|---------------------|---------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                     |                           | Clase 0-1 (P.adj) | Clase 1-2 (P.adj) | Clase 0-2 (P.adj) |
| Dron_GNDVI_01_06_23 | 0.037                     | 0.188             | 0.214             | <b>0.030</b>      |
| Dron_GNDVI_02_03_23 | 0.003                     | 0.110             | <b>0.056</b>      | <b>0.002</b>      |
| Dron_GNDVI_08_09_23 | 0.046                     | 0.072             | 0.609             | 0.093             |
| Dron_GNDVI_27_12_22 | 0.024                     | 0.201             | 0.141             | <b>0.019</b>      |
| Dron_NDVI_01_06_23  | 0.010                     | 0.153             | 0.095             | <b>0.008</b>      |
| Dron_NDVI_02_03_23  | 0.008                     | 0.132             | 0.086             | <b>0.005</b>      |
| Dron_NDVI_08_09_23  | 0.007                     | <b>0.018</b>      | 0.464             | <b>0.016</b>      |
| Dron_NDVI_24_04_23  | 0.018                     | 0.141             | 0.157             | <b>0.016</b>      |
| Dron_NDVI_27_06_23  | 0.030                     | 0.236             | 0.146             | <b>0.026</b>      |
| Dron_NDVI_27_12_22  | 0.031                     | 0.119             | 0.283             | <b>0.035</b>      |
| Dron_NDVI_31_10_23  | 0.016                     | 0.098             | 0.207             | <b>0.017</b>      |
| S2_NDVI_17_12_2023  | 0.003                     | 0.066             | <b>0.004</b>      | <b>0.017</b>      |

En la figura 54 podemos observar la distribución de los valores de GNDVI para la fecha 01-06-2023 para las tres clases de defoliación que hemos establecido, las cuales muestran valores muy similares en torno a 0.6. No obstante, se puede observar que existen diferencias entre la clase 0 (defoliación baja) con valores más altos de GNDVI y la clase 2 (defoliación alta) que muestra los valores de vigor más bajos. Por contra, la clase 1 (defoliación media) muestra valores algo superiores a la clase 0 (defoliación baja) lo que indica que esta adquisición no es óptima para diferenciar dichas clases (baja vs media).

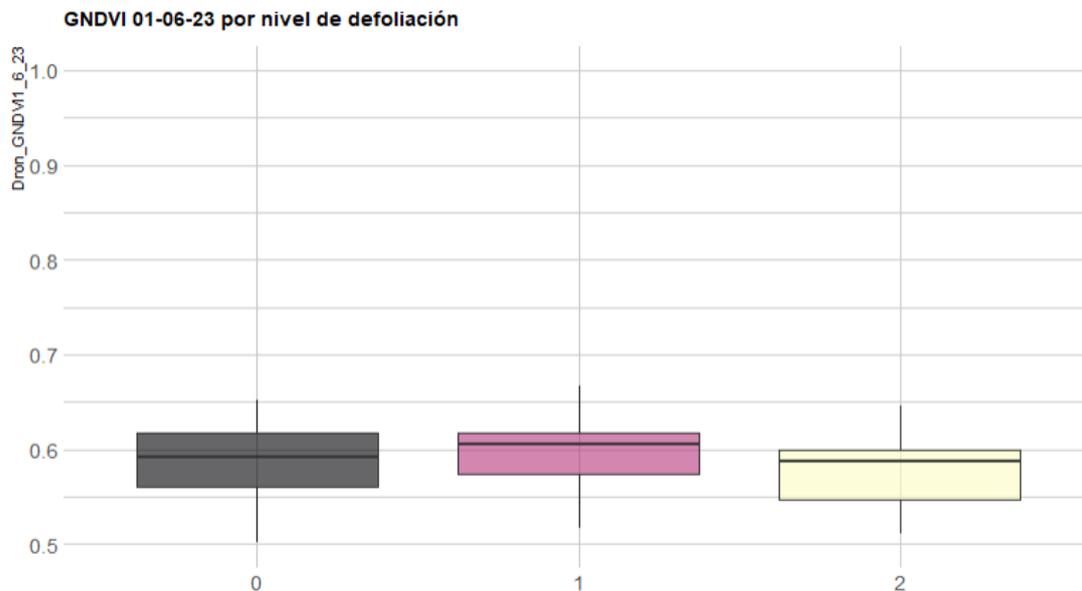


Figura 54: Grafica de las clases de defoliación del GNDVI 1\_06\_23

### 6.3.2. Resultados diferencia de defoliación

Para el análisis de la diferencia de defoliación, en primer lugar, verificamos si nuestros datos son normales aplicando el Shapiro test (tabla 8).

|              | statistic                | p.value           |
|--------------|--------------------------|-------------------|
| id           | c(W = 0.982774518773875) | 0.246795878011818 |
| S2_GNDVI_dif | c(W = 0.987589815158954) | 0.516228221810272 |

Tabla 8: Resultados Shapiro test para la diferencia entre el periodo pre y postdefoliación.

Únicamente nos muestra una posible variable normal, así que procedemos a su transformación en logaritmo para seguir comprobando si son normales las variables.

|                | statistic                | p.value           |
|----------------|--------------------------|-------------------|
| id             | c(W = 0.982774518773875) | 0.246795878011818 |
| S2_GNDVI_dif   | c(W = 0.987589815158954) | 0.516228221810272 |
| id.2           | c(W = 0.981982213480562) | 0.216494792471851 |
| S2_NDVI_dif.1  | c(W = 0.985935331608987) | 0.406656064386752 |
| S2_GNDVI_dif.1 | c(W = 0.980732261132439) | 0.1755494712641   |

Tabla 9: Resultados obtenidos tras transformar a logaritmo

Podemos observar que la transformación a raíz cuadrada nos muestra una única variable que presenta una distribución normal, la diferencia de NDVI de los datos de dron (tabla 9).

|               | statistic                | p.value           |
|---------------|--------------------------|-------------------|
| id            | c(W = 0.982774518773875) | 0.246795878011818 |
| Dron_NDVI_dif | c(W = 0.987352765228536) | 0.499534582967342 |

Tabla 10: Resultados tras transformar a raíz cuadrada

Una vez transformado a raíz cuadrada (tabla 10) se puede observar que se sigue sin mostrar resultados acordes, por lo que se aplicara de forma generalizada al conjunto de variables el test de Krusal Wallis y el test de Dunn a nuestros datos

Tras aplicar Krusal Wallis y el test de Dunn en el caso de la variable de diferencia de defoliación (abril de 2023) se han determinado un total de 18 métricas (asociadas a fechas de adquisición) que muestran diferencias estadísticamente significativas entre las clases de defoliación determinadas, las cuales incluyen a los índices NDVI y GNDVI para fechas desde diciembre del año 2022 a enero del año 2024 (tabla 11).

Tabla 11: Krusal Wallis. Resultados para la variable diferencia de defoliación.

| Métrica             | Krusal Wallis (p-valor) | Test de Dunn      |                   |                   |
|---------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                     |                         | Clase 0-1 (P.adj) | Clase 1-2 (P.adj) | Clase 0-2 (P.adj) |
| Dron_GNDVI_27_12_22 | 0.048                   | 0.210             | 0.176             | <b>0.042</b>      |
| Dron_GNDVI_1_6_23   | 0.031                   | 0.114             | 0.215             | <b>0.027</b>      |
| Dron_GNDVI_2_3_23   | 0.001                   | 0.101             | 0.137             | <b>0.000</b>      |
| Dron_GNDVI_27_6_23  | 0.046                   | 0.229             | 0.155             | <b>0.044</b>      |
| Dron_GNDVI_8_9_23   | 0.037                   | 0.065             | 0.622             | 0.066             |
| Dron_NDVI_01_06_23  | 0.010                   | 0.103             | 0.087             | <b>0.008</b>      |
| Dron_NDVI_02_03_23  | 0.005                   | 0.102             | <b>0.046</b>      | <b>0.003</b>      |
| Dron_NDVI_08_09_23  | 0.010                   | 0.019             | 0.584             | 0.252             |
| Dron_NDVI_24_04_23  | 0.028                   | 0.109             | 0.200             | <b>0.030</b>      |
| Dron_NDVI_27_06_23  | 0.009                   | 0.086             | 0.091             | <b>0.007</b>      |
| Dron_NDVI_31_10_23  | 0.019                   | 0.082             | 0.191             | <b>0.022</b>      |
| S2_GNDVI_15_6       | 0.047                   | 0.146             | 0.246             | 0.054             |
| S2_GNDVI_27_6       | 0.047                   | 0.144             | 0.101             | 0.762             |
| S2_GNDVI_311        | 0.013                   | <b>0.016</b>      | 0.882             | 0.058             |
| S2_GNDVI_13_9_2023  | 0.040                   | <b>0.045</b>      | 0.096             | 0.133             |
| S2_GNDVI_15_6_2023  | 0.035                   | 0.098             | 0.272             | <b>0.044</b>      |
| S2_GNDVI_17_12_2023 | 0.001                   | <b>0.019</b>      | <b>0.004</b>      | 0.323             |
| S2_GNDVI_27_6_2023  | 0.041                   | <b>0.047</b>      | 0.949             | 0.134             |

Por último, se realizan gráficas de variables que muestran diferencias estadísticamente significativas en base a las variables que mostraban diferencias estadísticamente significativas en Kruskal Wallis y en el test de Dunn para al menos un par de clases.

Siguiendo la tendencia presentada en la fecha postdefoliación, el mayor valor de GNDVI para junio de 2023 corresponde a la clase 1 (defoliación media) seguido de la clase 0

(defoliación baja) y por último de la clase 2 (defoliación alta) (figura 55), permitiendo distinguir entre la clase de defoliación baja frente a defoliación alta pero no así la defoliación media.

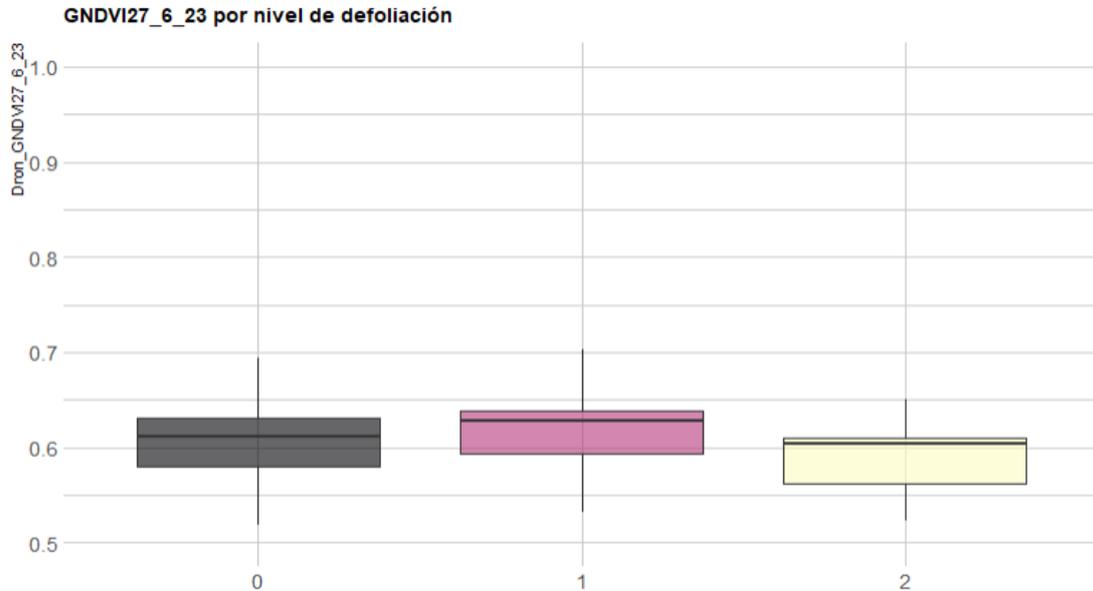


Figura 55: Grafica de las clases de defoliación de GNDVI27\_6\_23

En este caso podemos observar una distribución distinta al resto de fechas, en la cual el valor de GNDVI de Sentinel-2 en junio de 2023 se presenta menor la clase 0 y va ascendiendo en las distintas clases, siendo la clase con valor más alto la clase 2 (figura 56).

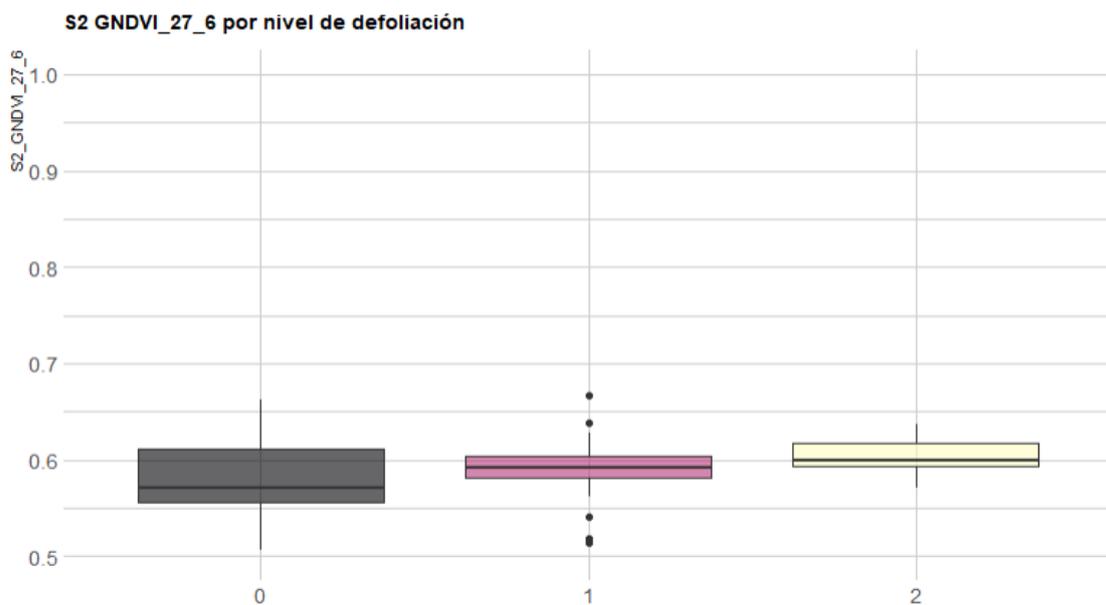


Figura 56: Grafica de las clases de defoliación de S2\_GNDVI27\_6

### 6.3.3 Evolución de valores promedio de los índices espectrales para las clases de defoliación identificadas en la fecha postdefoliación

En este apartado se describe gráficamente la evolución de los valores de los índices espectrales para las clases de defoliación identificadas en la fecha postdefoliación. Concretamente, contamos, de los 73 píxeles analizados, con un total de 45 en la clase 0 (defoliación baja), 31 en la clase 1 (defoliación media) y 19 en la clase 2 (defoliación alta). A partir de estos datos extraemos una serie de gráficos respecto el promedio de los índices espectrales de ambos sensores (Sentinel-2 y dron).

En la figura 57 podemos observar una tendencia similar para las tres clases, pero podemos observar que la defoliación media presenta los valores más altos y la defoliación alta es la que más variabilidad presenta, con valores y tendencias muy similar a los casos anteriores. (figura 57).

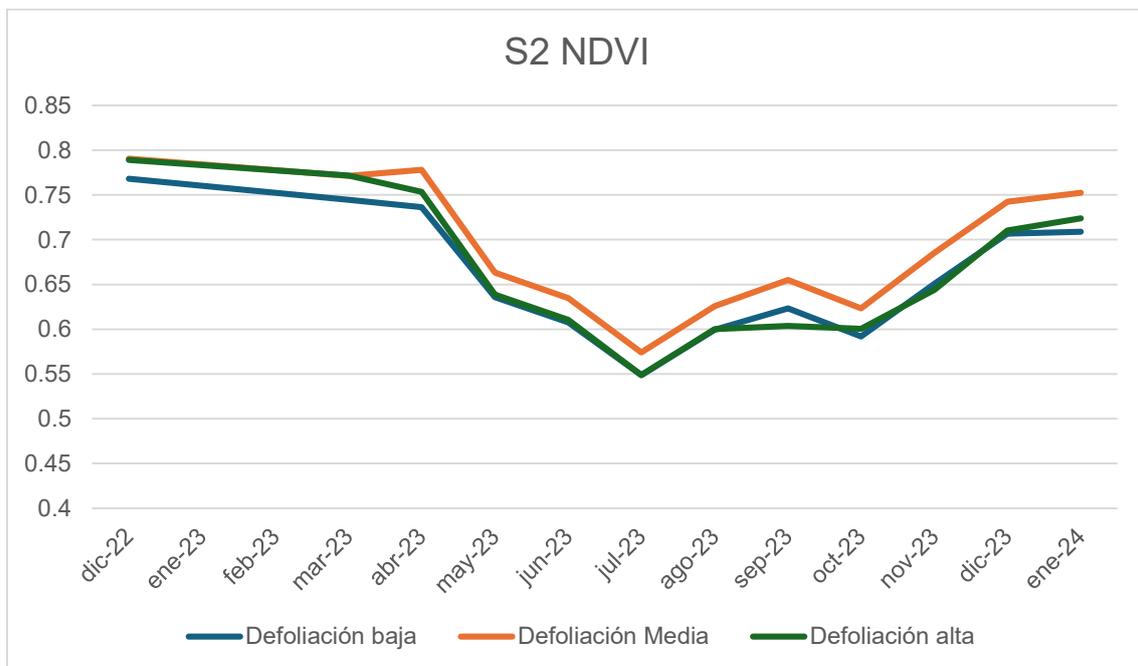


Figura 57: Grafica promedios S2 (NDVI)

En la figura 58 podemos observar que el valor más alto de GNDVI una tendencia similar al NDVI con valores de defoliación media que suelen ser superiores a las otras dos clases definidas.

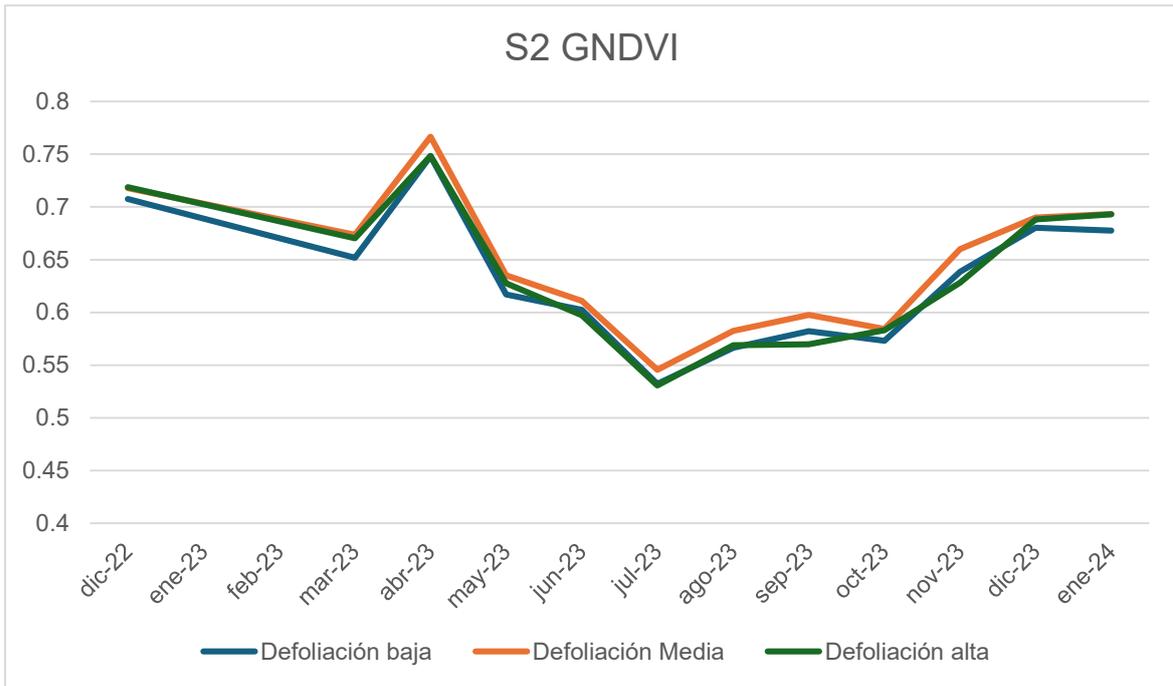


Figura 58: Grafica promedio S2 (GNDVI)

En la figura 59 se observan los valores del NDVI capturado con dron. Las clases presentan diferencias más claras entre clases de defoliación. Si bien, observamos una tendencia similar a la capturada con Sentinel-2 en la que los valores de la clase defoliación media son más elevados que las restantes (figura 59).

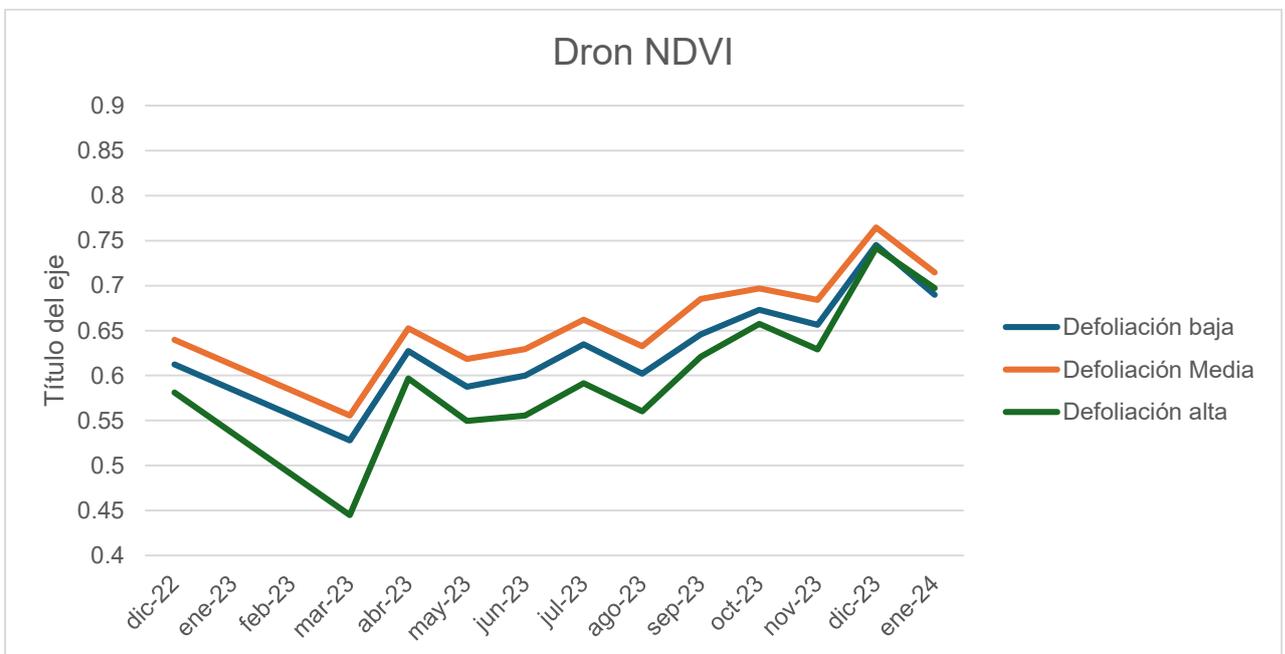


Figura 59: Grafico promedio dron (NDVI)

En la figura 60 también observamos que los valores más altos de GNDVI capturados con dron corresponden a la clase de defoliación media y los más bajos a la clase de defoliación alta, donde el valor más bajo es 0.40 en el mes de marzo y el pico más alto en el mes de diciembre. (Figura 59)

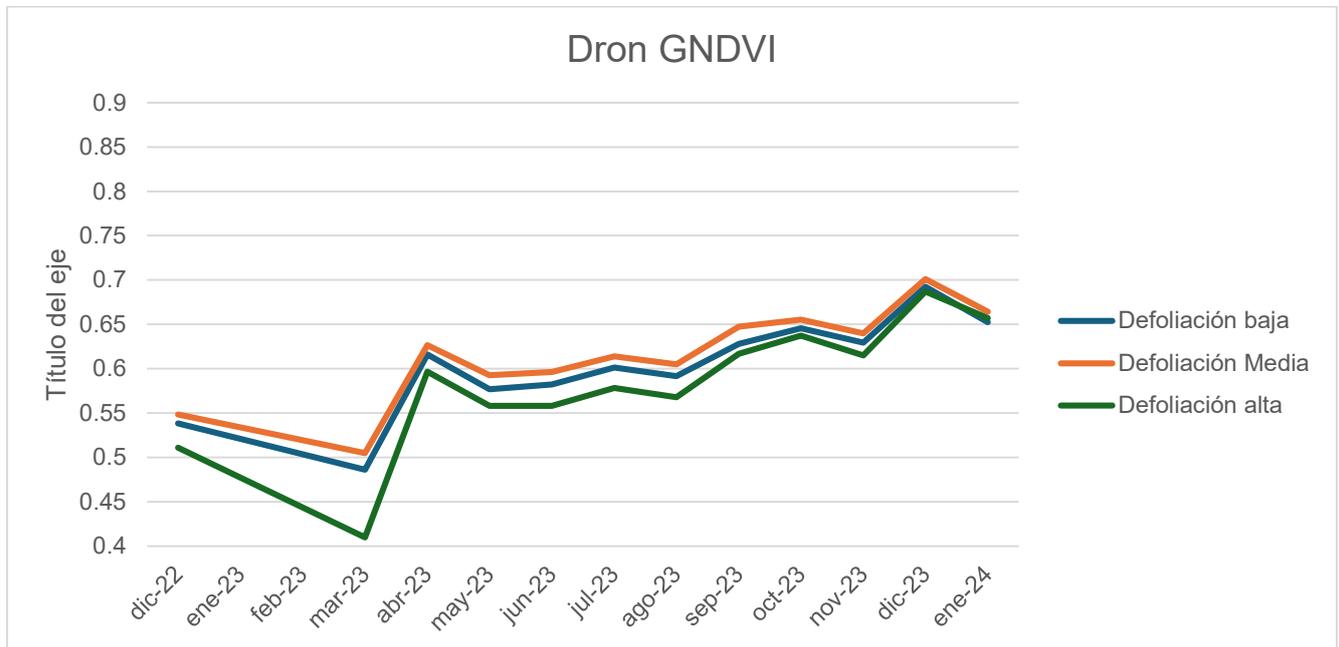


Figura 60: Grafico promedio dron (GNDVI)

Viendo estas 4 graficas podemos sacar la conclusión de que se observa un descenso paulatino del vigor de la vegetación entre diciembre y marzo que puede estar asociado a la defoliación por procesionaria. Por su parte, los valores más altos los encontramos en los meses de noviembre y diciembre.

## 7. Discusión

## 7. Discusión

En este estudio hemos comprobado la utilidad de las herramientas de teledetección empleadas, datos multispectrales adquiridos con dron y satélite Sentinel-2, para el análisis de la incidencia de la procesionaria en pinares situados en la provincia de Soria.

*Pinus nigra* es una especie de conífera ampliamente distribuida en Europa y Asia, especialmente en zonas montañosas. *Pinus nigra* es susceptible a varias plagas, en particular a la procesionaria del pino. Entre las especies de pino en España, el pino laricio es el hospedador preferido por la procesionaria, debido a, las características de sus acículas, su abundancia y las condiciones de su hábitat. Las parcelas 1 y 2 del experimento en Sta. María de las Hoyas reúnen las condiciones ambientales y de estructura de la masa adecuadas convirtiéndolas en un lugar favorable para hospedar poblaciones abundantes de procesionaria. Al realizar la selección aleatoria de píxeles para nuestro análisis estadístico, en esos píxeles el rango de defoliación va de 0% a 70% más amplio que en otros estudios que muestran valores entre el 20% y el 70%, si bien este estudio (Gabriel Sangüesa-Barreda, 2014) se ha realizado a escala de rodal.

En los gráficos comparativos podemos observar que los valores (máximo, mínimo y promedio) de ambas herramientas presentan tendencias similares con pequeñas variaciones entre ellos, pero en ambos casos al comparar ambos promedios se puede verificar que la herramienta Sentinel-2 muestra un promedio más alto que los datos captados por dron para ambas parcelas.

Una vez analizados los valores obtenidos en ambas parcelas se han determinado tres clases de defoliación basándose en literatura científica y la distribución de valores observados, clase 1 de 0-20% (defoliación baja) clase 2 de 20-40% (defoliación media) y clase 3 > 40% (defoliación alta). El número de clases de defoliación varía entre estudios. Por ejemplo, Domingo et al., (2024) diferenciaron dos clases: no defoliados con nieles de defoliación menores a 15% y defoliados para los valores más altos, concluyendo que un umbral del 20% sería el óptimo para reconocer árboles defoliados. Sin embargo, Cardil et al., (2019) distinguió tres clases de defoliación denominadas: árboles no defoliados, parcialmente defoliados y completamente defoliados al presentar una defoliación (< 15%, entre 15% y 85%, y > 85%).

Se hizo un análisis estadístico para identificar las variables espectrales con mayor capacidad para discriminar las clases de defoliación. Tras aplicar la prueba de Kruskal Wallis y el test de Dunn en ambas parcelas se observa que los índices GNDVI y NDVI para los meses de marzo y abril son óptimos para diferenciar entre defoliación baja y alta. La mayor resolución espacial se considera óptima para caracterizar la defoliación por PPM.

Por último, en nuestras gráficas comparativas se observa una clara tendencia en las tres clases de defoliación. La clase 1, que corresponde a la defoliación media, muestra una mayor incidencia en comparación con las otras clases, tanto en los datos obtenidos por el dron como en los de Sentinel-2. Por otro lado, la clase de defoliación alta es la que presenta la menor incidencia en ambos casos.

La teledetección es una herramienta muy útil para el seguimiento de plagas forestales, ya que facilita la identificación de brotes de insectos en extensas áreas, tanto a nivel espacial como temporal, con gran detalle (McDowell et al., 2015; Trumbore et al., 2015). Asimismo, permite detectar cambios en la cobertura de los bosques y en la cantidad de hojas, lo que posibilita una detección temprana y un seguimiento constante.

## 8. Conclusión

## 8. Conclusión

El presente estudio tiene como objetivo el análisis de la defoliación ocasionada por la procesionaria del pino en dos parcelas experimentales de *P. nigra* en la provincia de Soria mediante información de teledetección multi-sensor (satélite y dron). Este estudio nos ha permitido determinar qué índices espectrales, fechas y sensores son óptimos para determinar hasta tres clases de defoliación.

Los resultados obtenidos indican que los valores de defoliación media en los píxeles seleccionados son aproximadamente del 26% en la parcela 1 y del 25% en la parcela 2. Los valores absolutos de Sentinel-2 y dron presentan tendencias similares para los dos índices espectrales analizados con un descenso paulatino entre diciembre y abril. Sentinel-2 muestra los valores más bajos de NDVI en julio, mientras que los datos de dron muestran los valores más bajos en marzo. Si bien, los meses de febrero a abril presentan también valores bajos registrados con el dron tanto para el índice NDVI como el GNDVI. Ambos sensores nos proporcionan información de utilidad difiriendo la resolución espacial lo que posibilita la realización de análisis multi-escala.

El análisis de los datos obtenidos con estas herramientas permite clasificar la defoliación en tres categorías. Se observan diferencias estadísticamente significativas entre la categoría de defoliación baja y la de defoliación alta en las métricas derivadas de dron, lo que indica que la mejor resolución espacial es idónea para determinar la defoliación por procesionaria. Los índices de NDVI y GNDVI de dron para los meses de marzo y abril son óptimos para la caracterización de las áreas defoliadas.

Los gráficos comparativos revelan que la defoliación alta se relaciona con valores de vigor (NDVI, GNDVI) inferiores en comparación con la clase de defoliación baja. No obstante, los valores espectrales asociados con la clase de defoliación media no son coherentes, lo que impide una estimación precisa de esta categoría.

El uso de la teledetección para el seguimiento de la procesionaria del pino a diversas escalas es de interés para el seguimiento y gestión forestal sostenible. Su capacidad para proporcionar datos espacialmente explícitos y en tiempo casi-real, así como la posibilidad de cubrir grandes áreas mediante sensores de satélite puede ser de utilidad para detectar infestaciones tempranas y facilitar el análisis temporal y la modelización de las afecciones por procesionaria.



## 9. Referencias bibliográficas

- Azcárate, F. Seoane, J. Silvestre, M. 2023. Factors affecting pine processionary moth (*Thaumetopoea pityocampa*) incidence in Mediterranean pine stands: A multiscale approach. *Forest Ecology and Management*. 529: 120728 <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120728>
- Cardil, A. Otsu, K. Pla, M. Silva, C. A. Brotons, L. 2019. Quantifying pine processionary moth defoliation in a pine-oak mixed forest using unmanned aerial systems and multispectral imagery. *Plos One*. 14(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213027>
- Cardil, A. Vepakomma, U. Brotons, L. 2017. Assessing Pine Processionary Moth Defoliation Using Unmanned Aerial Systems. *Forests*. 8 (10). <https://doi.org/10.3390/f8100402>
- Domingo, D. Vicente-Serrano, S. Gómez, C. Olano, J, M. Sangüesa-Barreda, G. 2024. Summer heat waves could counterbalance the increasing incidence of pine processionary due to warmer winters in Mediterranean pine forests. *Forest Ecology and Management*. 555: 121695. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.121695>
- Duarte, A. Borralho, N., Cabral, P. Caetano, M. 2022. Recent Advances in Forest Insect Pests and Diseases Monitoring Using UAV-Based Data: A Systematic Review. *Forests*. 13(6), 911; <https://doi.org/10.3390/f13060911>
- Gálvez, J, A. 2023. Los riesgos de la procesionaria del pino. Colegio territorial administradores de fincas. Recuperado el 10 de septiembre de 2024, de <https://www.cafmalaga.es/los-riesgos-de-la-procesionaria-del-pino/>
- Gazol, A. Hernandez-Alonso, R. Camarero, J. 2019. Patterns and Drivers of Pine Processionary Moth Defoliation in Mediterranean Mountain Forests. *Frontiers*. 10. <https://doi.org/10.3389/fevo.2019.00458>
- Hódar, J, A. Zamora, R. 2022. Herbivory and climatic warming: a Mediterranean outbreaking caterpillar attacks a relict, boreal pine species. *Biodiversity & Conservation*. 493.
- Mossoll, G. 2024. El curioso ciclo de vida de la procesionaria del pino. CREAM el blog. Recuperado el 10 de septiembre de 2024, de <https://blog.creaf.cat/es/noticias/ciclo-procesionaria-del-pino/#:~:text=La%20procesionaria%20del%20pino%20es,mariposa%20nocturna%20aut%C3%B3ctona%20en%20Catalu%C3%B1a>
- Otsu, K, Pla, M. Vayreda, J. Brotons, L. 2018. Calibrating the Severity of Forest Defoliation by Pine Processionary Moth with Landsat and UAV Imagery. *Sensors*. 18(10), 3278; <https://doi.org/10.3390/s18103278>
- Otsu, K. Pla, M. Duane, A. Cardil, A. Brotons, L. 2019. Estimating the Threshold of Detection on Tree Crown Defoliation Using Vegetation Indices from UAS Multispectral Imagery. *Drones*. 3(4), 80; <https://doi.org/10.3390/drones3040080>
- Pla, M. Bota, G. Duane, A. Balagué, J. Curcó, A. Gutiérrez, R. Lluís Brotons. 2019. Calibrating Sentinel-2 Imagery with Multispectral UAV Derived Information to Quantify

Damages in Mediterranean Rice Crops Caused by Western Swamphen (*Porphyrio porphyrio*). *Drones*. 3(2), 45; <https://doi.org/10.3390/drones3020045>

Sangüesa-Barreda, G. Camarero, J. García-Martín, A. Hernández, R. de la 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*. 320: 0378-1127 <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.03.008>

Senf, C. Seidl, R. Hostert, P. 2017. Remote sensing of forest insect disturbances: Current state and future directions. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*.60. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.04.004>

Stahl, A. Andrus, R. Hicke, J. Hudak, A. Bright, B. Meddens, A. 2023. Automated attribution of forest disturbance types from remote sensing data: A synthesis. *Remote Sensing of Environment*. 285. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113416>

## 10. Anexos

## 10. Anexos

### PARCELA 1

Tabla 1. Valores de NDVI adquiridos por Sentinel-2 para la serie temporal analizada.

| Fecha    | 4-12-2022 | 31-1-2024 | 27-12-2023 | 3-1-2023 | 27-6-2023 | 20-7-2023 | 18-4-2023 | 21-4-2023 |
|----------|-----------|-----------|------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Promedio | 0.787     | 0.763     | 0.764      | 0.654    | 0.627     | 0.564     | 0.615     | 0.635     |
| Mínimo   | 0.521     | 0.514     | 0.425      | 0.377    | 0.356     | 0.326     | 0.348     | 0.397     |
| Máximo   | 0.882     | 0.886     | 0.918      | 0.783    | 0.781     | 0.667     | 0.723     | 0.770     |

| Fecha    | 10-10-2023 | 13-9-2023 | 6-4-2023 | 17-12-2023 | 4-3-2023 | 15-6-2023 | 31-5-2023 |
|----------|------------|-----------|----------|------------|----------|-----------|-----------|
| Promedio | 0.609      | 0.670     | 0.726    | 0.733      | 0.852    | 0.856     | 0.615     |
| Mínimo   | 0.402      | 0.373     | 0.438    | 0.465      | 0.615    | 0.623     | 0.436     |
| Máximo   | 0.743      | 0.833     | 0.849    | 0.825      | 0.955    | 0.950     | 0.701     |

Tabla 2. Valores de GNDVI adquiridos por Sentinel-2 para la serie temporal analizada.

| Fecha    | 4-12-2022 | 31-1-2024 | 27-12-2023 | 3-1-2023 | 27-6-2023 | 20-7-2023 | 18-4-2023 | 4-12-2022 |
|----------|-----------|-----------|------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Promedio | 0.719     | 0.666     | 0.760      | 0.630    | 0.611     | 0.540     | 0.576     | 0.589     |
| Mínimo   | 0.552     | 0.536     | 0.532      | 0.460    | 0.450     | 0.407     | 0.429     | 0.457     |
| Máximo   | 0.818     | 0.810     | 0.907      | 0.745    | 0.709     | 0.600     | 0.655     | 0.662     |

| Fecha    | 10-10-2023 | 13-9-2023 | 6-4-2023 | 17-12-2023 | 4-3-2023 | 15-6-2023 | 10-10-2023 | 13-9-2023 |
|----------|------------|-----------|----------|------------|----------|-----------|------------|-----------|
| Promedio | 0.581      | 0.649     | 0.689    | 0.689      | 0.806    | 0.819     | 0.572      | 0.581     |
| Mínimo   | 0.452      | 0.443     | 0.508    | 0.485      | 0.662    | 0.645     | 0.485      | 0.452     |
| Máximo   | 0.667      | 0.731     | 0.769    | 0.782      | 0.935    | 0.946     | 0.627      | 0.667     |

Tabla 3. Valores de NDVI adquiridos por Dron para la serie temporal analizada

| Fecha    | 27-12-2022 | 02-03-2023 | 06-04-2023 | 24-04-2023 | 01-06-2023 | 27-06-2023 | 24-07-2023 |
|----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Promedio | 0.615      | 0.525      | 0.636      | 0.597      | 0.606      | 0.640      | 0.611      |
| Mínimo   | 0.331      | 0.153      | 0.307      | 0.313      | 0.307      | 0.320      | 0.273      |
| Máximo   | 0.725      | 0.684      | 0.772      | 0.743      | 0.735      | 0.776      | 0.743      |

| Fecha    | 08-09-2023 | 09-10-2023 | 31-10-2023 | 03-12-2023 | 03-01-2024 |
|----------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Promedio | 0.660      | 0.683      | 0.664      | 0.754      | 0.704      |
| Mínimo   | 0.342      | 0.313      | 0.382      | 0.462      | 0.405      |
| Máximo   | 0.762      | 0.771      | 0.753      | 0.830      | 0.787      |

Tabla 4. Valores de GNDVI adquiridos por Dron para la serie temporal analizada

|          |            |            |            |            |            |            |            |
|----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Fecha    | 27-12-2022 | 02-03-2023 | 06-04-2023 | 24-04-2023 | 01-06-2023 | 27-06-2023 | 24-07-2023 |
| Promedio | 0.536      | 0.481      | 0.620      | 0.582      | 0.586      | 0.603      | 0.596      |
| Mínimo   | 0.409      | 0.137      | 0.441      | 0.423      | 0.423      | 0.446      | 0.412      |
| Máximo   | 0.610      | 0.613      | 0.734      | 0.665      | 0.667      | 0.702      | 0.692      |

|          |            |            |            |            |            |       |
|----------|------------|------------|------------|------------|------------|-------|
| Fecha    | 08-09-2023 | 09-10-2023 | 31-10-2023 | 03-12-2023 | 03-01-2024 | Fecha |
| Promedio | 0.636      | 0.651      | 0.632      | 0.696      | 0.660      | 0.636 |
| Mínimo   | 0.467      | 0.429      | 0.473      | 0.531      | 0.496      | 0.467 |
| Máximo   | 0.698      | 0.724      | 0.681      | 0.753      | 0.729      | 0.698 |

## PARCELA 2

Tabla 5: Valores de NDVI adquiridos por Sentinel-2 para la serie temporal analizada

|          |               |                |                |                |                |                |                |                |
|----------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Fechas   | 4_12_20<br>22 | 03_01_20<br>23 | 04_03_20<br>23 | 06_04_20<br>23 | 18_04_20<br>23 | 21_04_20<br>23 | 31_05_20<br>23 | 15_06_20<br>23 |
| Promedio | 0.776         | 0.750          | 0.756          | 0.636          | 0.607          | 0.544          | 0.575          | 0.599          |
| Mínimo   | 0.417         | 0.449          | 0.372          | 0.286          | 0.246          | 0.250          | 0.228          | 0.252          |
| Máximo   | 0.902         | 0.880          | 0.955          | 0.774          | 0.763          | 0.673          | 0.745          | 0.760          |

|          |                |                |                |                |                |                |                |
|----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Fechas   | 27_06_202<br>3 | 20_07_202<br>3 | 13_09_202<br>3 | 10_10_202<br>3 | 17_12_202<br>3 | 27_12_202<br>3 | 31_01_202<br>4 |
| Promedio | 0.591          | 0.635          | 0.715          | 0.724          | 0.836          | 0.844          | 0.590          |
| Mínimo   | 0.316          | 0.252          | 0.243          | 0.302          | 0.496          | 0.431          | 0.391          |
| Máximo   | 0.723          | 0.804          | 1.000          | 0.877          | 1.000          | 1.000          | 0.692          |

Tabla 6: Valores de GNDVI adquiridos por Sentinel-2 para la serie temporal analizada

|          |               |                |                |                |                |                |                |                |
|----------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Fechas   | 4_12_20<br>22 | 03_01_20<br>23 | 04_03_20<br>23 | 06_04_20<br>23 | 18_04_20<br>23 | 21_04_20<br>23 | 31_05_20<br>23 | 15_06_20<br>23 |
| Promedio | 0.708         | 0.651          | 0.740          | 0.612          | 0.595          | 0.519          | 0.546          | 0.558          |
| Mínimo   | 0.463         | 0.460          | 0.465          | 0.400          | 0.379          | 0.333          | 0.333          | 0.375          |
| Máximo   | 0.871         | 0.774          | 0.900          | 0.733          | 0.741          | 0.619          | 0.655          | 0.660          |

Evaluación de la sanidad forestal en pinares mediterráneos mediante datos satelitales y datos de dron

|          |            |            |            |            |            |            |            |
|----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Fechas   | 27_06_2023 | 20_07_2023 | 13_09_2023 | 10_10_2023 | 17_12_2023 | 27_12_2023 | 31_01_2024 |
|          | 3          | 3          | 3          | 3          | 3          | 3          | 4          |
| Promedio | 0.563      | 0.618      | 0.673      | 0.678      | 0.786      | 0.800      | 0.544      |
| Mínimo   | 0.385      | 0.360      | 0.333      | 0.424      | 0.483      | 0.456      | 0.412      |
| Máximo   | 0.647      | 0.765      | 1.000      | 0.796      | 0.949      | 0.950      | 0.621      |

Tabla 7: Valores de NDVI adquiridos por Dron para la serie temporal analizada

|          |            |            |            |            |            |            |
|----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Fechas   | 02_03_2023 | 06_04_2023 | 24_04_2023 | 01_06_2023 | 27_06_2023 | 24_07_2023 |
| Promedio | 0.488      | 0.633      | 0.580      | 0.577      | 0.597      | 0.552      |
| Mínimo   | 0.180      | 0.243      | 0.230      | 0.206      | 0.218      | 0.164      |
| Máximo   | 0.667      | 0.774      | 0.712      | 0.711      | 0.728      | 0.719      |

|          |            |            |            |            |            |            |
|----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Fechas   |            |            |            |            |            | 30_01_2024 |
|          | 09_09_2023 | 09_10_2023 | 31_10_2023 | 03_12_2023 | 27_12_2023 |            |
| Promedio | 0.605      | 0.670      | 0.634      | 0.711      | 0.713      | 0.684      |
| Mínimo   | 0.219      | 0.225      | 0.260      | 0.370      | 0.347      | 0.319      |
| Máximo   | 0.765      | 0.796      | 0.753      | 0.818      | 0.812      | 0.790      |

Tabla 8: Valores de GNDVI adquiridos por Dron para la serie temporal analizada

|          |            |            |            |            |            |            |
|----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Fechas   | 02_03_2023 | 06_04_2023 | 24_04_2023 | 01_06_2023 | 27_06_2023 | 24_07_2023 |
| Promedio | 0.442      | 0.612      | 0.568      | 0.357      | 0.577      | 0.541      |
| Mínimo   | 0.198      | 0.372      | 0.357      | 0.251      | 0.332      | 0.308      |
| Máximo   | 0.589      | 0.707      | 0.656      | 0.404      | 0.683      | 0.639      |

|          |            |            |            |            |            |            |
|----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Fechas   |            |            |            |            |            | 30_01_2024 |
|          | 09_09_2023 | 09_10_2023 | 31_10_2023 | 03_12_2023 | 27_12_2023 |            |
| Promedio | 0.598      | 0.633      | 0.600      | 0.655      | 0.657      | 0.633      |
| Mínimo   | 0.353      | 0.343      | 0.351      | 0.408      | 0.412      | 0.406      |
| Máximo   | 0.703      | 0.739      | 0.682      | 0.783      | 0.745      | 0.710      |

Tabla 9: Tabla dinámica de los promedios de Sentinel-2 y Dron tanto de NDVI y GNDVI

| Etiquetas de fila    | Promedio de S2_NDVI_4_12_2022 | Promedio de S2_NDVI_31_1_2024 | Promedio de S2_NDVI_27_12_2023 |  |
|----------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--|
| 0                    | 0.768100667                   | 0.603432667                   | 0.835279111                    |  |
| 1                    | 0.79072129                    | 0.619825161                   | 0.86314129                     |  |
| 2                    | 0.789044737                   | 0.612423684                   | 0.868697895                    |  |
| <b>Total general</b> | <b>0.779670947</b>            | <b>0.61058</b>                | <b>0.851054737</b>             |  |

| Promedio de S2_NDVI_3_1_2023 | Promedio de S2_NDVI_27_6_2023 | Promedio de S2_NDVI_20_7_2023 | Promedio de S2_NDVI_18_ |
|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| 0.744432222                  | 0.591764222                   | 0.650889111                   | 0.607                   |
| 0.771304839                  | 0.623334194                   | 0.685340645                   | 0.634                   |
| 0.771792632                  | 0.600302105                   | 0.643868421                   | 0.610                   |
| <b>0.758673263</b>           | <b>0.603773579</b>            | <b>0.660727053</b>            | <b>0.617</b>            |

| Promedio de S2_NDVI_21_4_2023 | Promedio de S2_NDVI_10_10_2023 | Promedio de S2_NDVI_13_9_2023 | Promedio de S2_NDVI_6_4_2023 |
|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| 0.548596                      | 0.708915333                    | 0.706730444                   | 0.635628444                  |
| 0.574217097                   | 0.752321613                    | 0.742535161                   | 0.66331871                   |
| 0.548632632                   | 0.723825789                    | 0.710312105                   | 0.638716316                  |
| <b>0.556963895</b>            | <b>0.726061579</b>             | <b>0.719130421</b>            | <b>0.645281789</b>           |

| Promedio de S2_NDVI_17_12_2023 | Promedio de S2_NDVI_4_3_2023 | Promedio de S2_NDVI_15_6_2023 | Promedio de S2_NDVI_31_5_2023 |
|--------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 0.829164222                    | 0.736314222                  | 0.62326                       | 0.599385333                   |
| 0.861498387                    | 0.778037097                  | 0.654917419                   | 0.625868387                   |
| 0.870425789                    | 0.753586842                  | 0.603707368                   | 0.600002632                   |
| <b>0.847967684</b>             | <b>0.753383579</b>           | <b>0.629679789</b>            | <b>0.608150632</b>            |

| Promedio de S2_GNDVI_4_12_2022 | Promedio de S2_GNDVI_31_1_2024 | Promedio de S2_GNDVI_27_12_2023 | Promedio de S2_GNDVI_3_1_2023 | Promedio de S2_GNDVI_27_6_2023 | Promedio de S2_GNDVI_20_7_2023 |
|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 0.707427778                    | 0.566327556                    | 0.810633778                     | 0.651893333                   | 0.573193556                    | 0.6385                         |
| 0.717992258                    | 0.575138387                    | 0.815836774                     | 0.673615161                   | 0.584307419                    | 0.659866452                    |
| 0.718802105                    | 0.567767368                    | 0.826081053                     | 0.670255789                   | 0.583187895                    | 0.628244737                    |
| <b>0.71315</b>                 | <b>0.569490632</b>             | <b>0.815421053</b>              | <b>0.662654</b>               | <b>0.578819053</b>             | <b>0.643421158</b>             |

| Promedio de S2_GNDVI_21_4_2023 | Promedio de S2_GNDVI_18_4_2023 | Promedio de S2_GNDVI_10_1_2023 | Promedio de S2_GNDVI_13_9_2023 |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 0.532082                       | 0.602583111                    | 0.677490889                    | 0.680283333                    |
| 0.54543871                     | 0.611081613                    | 0.693406129                    | 0.689933548                    |
| 0.530742105                    | 0.597208421                    | 0.693080526                    | 0.688117895                    |
| <b>0.536172526</b>             | <b>0.604281368</b>             | <b>0.685802211</b>             | <b>0.684999263</b>             |

| Promedio de S2_GNDVI_6_4_2023 | Promedio de S2_GNDVI_4_3_2023 | Promedio de S2_GNDVI_15_6_2023 | Promedio de S2_GNDVI_31_5_2023 | Promedio de Dron_NDVI_27_12_2023 |
|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| 0.616936222                   | 0.748171111                   | 0.566298222                    | 0.582196889                    | 0.612252451                      |
| 0.635320968                   | 0.766569677                   | 0.582465806                    | 0.597591935                    | 0.639750472                      |
| 0.627508947                   | 0.748517895                   | 0.568799474                    | 0.569864211                    | 0.581102169                      |
| <b>0.62505</b>                | <b>0.754244211</b>            | <b>0.572074211</b>             | <b>0.584754</b>                | <b>0.614995433</b>               |

| Promedio de Dron_NDVI_02_03_23 | Promedio de Dron_NDVI_06_04_23 | Promedio de Dron_NDVI_24_04_23 | Promedio de Dron_NDVI_01_06_23 | Promedio de Dron_NDVI_27_06_23 |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 0.527973389                    | 0.627462276                    | 0.587573987                    | 0.600117227                    | 0.634905607                    |
| 0.55564992                     | 0.652469649                    | 0.618484153                    | 0.629413817                    | 0.662070929                    |
| 0.444874627                    | 0.596622968                    | 0.549746839                    | 0.555773844                    | 0.591615546                    |
| <b>0.520384926</b>             | <b>0.629454715</b>             | <b>0.590095033</b>             | <b>0.600808491</b>             | <b>0.635112068</b>             |

| Promedio de Dron_NDVI_24_07_23 | Promedio de Dron_NDVI_08_09_23 | Promedio de Dron_NDVI_09_10_23 | Promedio de Dron_NDVI_31_10_23 | Promedio de Dron_NDVI_3_12_23 |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| 0.602039034                    | 0.64586531                     | 0.673182773                    | 0.656464231                    | 0.745148359                   |
| 0.63255162                     | 0.685217167                    | 0.696993423                    | 0.684061463                    | 0.764763771                   |
| 0.56033373                     | 0.621048067                    | 0.657651747                    | 0.628963189                    | 0.741986602                   |
| <b>0.603654712</b>             | <b>0.653742994</b>             | <b>0.677846359</b>             | <b>0.659969435</b>             | <b>0.750916826</b>            |

Evaluación de la sanidad forestal en pinares mediterráneos mediante datos satelitales y datos de dron

| Promedio de Dron_NDVI_03_01_24 | Promedio de Dron_GNDVI_27_12_22 | Promedio de Dron_GNDVI2_3_23 | Promedio de Dron_GNDVI6_4_23 | Promedio de Dron_GNDVI4_4_23 |
|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 0.689940791                    | 0.538263886                     | 0.486012704                  | 0.616087821                  | 0.576690095                  |
| 0.714568003                    | 0.548439359                     | 0.504911329                  | 0.626418026                  | 0.592507242                  |
| 0.697296706                    | 0.510750826                     | 0.409660036                  | 0.596681797                  | 0.558015251                  |
| <b>0.699448222</b>             | <b>0.536081691</b>              | <b>0.47690909</b>            | <b>0.615577525</b>           | <b>0.578116511</b>           |

| Promedio de Dron_GNDVI1_6_23 | Promedio de Dron_GNDVI27_6_23 | Promedio de Dron_GNDVI24_7_23 | Promedio de Dron_GNDVI8_9_23 | Promedio de Dron_GNDVI9_10_23 |
|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| 0.58234226                   | 0.601173866                   | 0.591461484                   | 0.627934262                  | 0.645682472                   |
| 0.596280047                  | 0.61373232                    | 0.604908298                   | 0.647315579                  | 0.655144791                   |
| 0.558167539                  | 0.57839945                    | 0.567698239                   | 0.616778328                  | 0.637410133                   |
| <b>0.582055436</b>           | <b>0.600717005</b>            | <b>0.591096743</b>            | <b>0.632027505</b>           | <b>0.647115708</b>            |

| Promedio de Dron_GNDVI31_10_23 | Promedio de Dron_GNDVI3_12_23 | Promedio de Dron_GNDVI3_1_24 |
|--------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| 0.629247713                    | 0.692404422                   | 0.652411628                  |
| 0.639710165                    | 0.700971793                   | 0.664456459                  |
| 0.615054343                    | 0.686965287                   | 0.656995532                  |
| <b>0.629823102</b>             | <b>0.694112263</b>            | <b>0.657258827</b>           |