

Monitoring severity of *Lophodermium* sp. in pine forest with satellite images Sentinel 2

Monitoreo de la severidad de *Lophodermium* sp. en bosque de pino con imágenes satelitales Sentinel 2

José Antonio Molina-Serrano¹, Marja Liza Fajardo-Franco*, Martín Aguilar-Tlatelpa, Ingeniería Forestal Comunitaria¹, Posgrado en Manejo Sustentable de Recursos Naturales. Universidad Intercultural del Estado de Puebla. Calle principal a Lipuntahuaca S/N. 73475, Lipuntahuaca, Huehuetla, Puebla; Arturo Castañeda-Mendoza¹. *Autor para correspondencia: azilmar@gmail.com

Recibido: 31 de Julio, 2019.

Aceptado: 15 de Noviembre, 2019.

Molina-Serrano JA, Fajardo-Franco ML, Aguilar-Tlatelpa M and Castañeda-Mendoza A. 2020. Monitoring severity of *Lophodermium* sp. in pine forest with satellite images Sentinel 2. Mexican Journal of Phytopathology 38(1).

DOI: 10.18781/R.MEX.FIT.1907-3

Primera publicación DOI: 24 de Noviembre, 2019.

First DOI publication: November 24, 2019.

Resumen. En el presente estudio se estimó la severidad causada por el tizón de los pinos (*Lophodermium* sp.) en rodales de pino mediante imágenes provenientes del satélite Sentinel 2 y evaluaciones de campo. Para tal efecto, se utilizaron tres índices: a) Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), b) Índice de Estrés de Humedad (MSI) y el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI); obtenidos de la combinación de bandas satelitales adquiridas mensualmente durante febrero a julio del 2017. Los valores obtenidos por los índices se correlacionaron con la severidad del tizón de los pinos, estimada en 24 sitios de muestreo. Los

Abstract. In this paper, we evaluated satellite images from Sentinel 2 to estimate the severity of needle cast in pine and field evaluations. Three indexes were used: a) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), b) Moisture Stress Index (MSI), and c) Soil-adjusted Vegetation Index (SAVI). These indexes were obtained from the combination of satellite bands acquired monthly during February to July 2017. The values obtained by the indexes were correlated with the severity of needle cast of pine, estimated in 24 sampling sites. The values obtained from MSI correlated positively with the observed values of severity (0.70783, $p < 0.0001$), the values obtained from NDVI had a moderate positive correlation with severity (0.53316, $p < 0.0001$). Nevertheless, the data obtained from SAVI had a low positive correlation with severity (0.24844, $p = 0.0062$). The results showed that the use of satellite images from Sentinel 2 and MSI can be used like a tool for monitoring the severity of *Lophodermium* sp. in pine forest.

Key words: Needle, NDVI, MSI, SAVI, *Pinus* sp.

datos obtenidos mediante el MSI tuvieron una alta correlación positiva con los valores observados de la severidad (0.70783, $p < 0.0001$), mientras que los valores estimados mediante el NDVI y el SAVI tuvieron una moderada (0.53316, $p < 0.0001$) y baja correlación positiva (0.24844, $p = 0.0062$), respectivamente. Los resultados mostraron que el uso de imágenes satelitales Sentinel 2 y el MSI tienen potencial para ser utilizados como una herramienta en el monitoreo de *Lophodermium* sp. en bosque de pino.

Palabras clave: Tizón, NDVI, MSI, SAVI, *Pinus* sp.

Lophodermium sp. es un hongo endófito que pertenece a la familia Rhytismataceae (Rhytismatales, Ascomycota). Se desarrolla intercelularmente entre la epidermis y la hipodermis en las acículas de los pinos, produciendo clorosis que pasa a formar pequeños cuerpos fructíferos tipo apotecio, estos se producen bajo el tejido epidermal de las acículas. El cuerpo fructífero presenta una abertura longitudinal, dentro del cual se encuentran ascosporas sin septos, filiformes y hialinas (Ortiz-García *et al.*, 2003; Cibrián *et al.*, 2007). Este patógeno causa defoliación y disminuye la productividad de los árboles infectados ya que inhibe la fotosíntesis, lo que origina pérdidas a nivel de vivero y bajo condiciones de campo. En Asia, Estados Unidos, Suecia e India, las detecciones e investigaciones se han dirigido hacia la mitigación del impacto de este patógeno en los bosques (Stenström y Ihrmark, 2005; Ahanger *et al.*, 2017; Neimane *et al.*, 2018).

En México *Lophodermium* sp. ha causado daños en bosques afectando varias especies de pino que muestran susceptibilidad como *Pinus oaxacana*, *P. patula*, *P. montezumae*, *P. teocote*, *P. pseudostrobus* y *P. leiophylla* (CONAFOR, 2018). En el 2015 la enfermedad afectó zonas forestales en los

Lophodermium sp. is an endophytic fungus belonging to the Rhytismataceae family (Rhytismatales, Ascomycota). It grows intracellularly between the epidermis and hypodermis of pine needles and produces chlorosis, which then forms apothecium-type small fruitful bodies beneath the epidermal tissue of the needles. The fruitful bodies have a longitudinal opening where filiform and hyaline ascospores with no septa are stored (Ortiz-García *et al.*, 2003; Cibrián *et al.*, 2007). This pathogen causes defoliation and reduces the productivity of infected trees because it inhibits photosynthesis, which causes losses both in the greenhouse and under field conditions. In Asia, the United States, Sweden and India, detection and research have focused on mitigating the impact of the pathogen in forests (Stenström and Ihrmark, 2005; Ahanger *et al.*, 2017; Neimane *et al.*, 2018).

In Mexico, *Lophodermium* sp. has caused damage in forests by affecting several susceptible pine species such as *Pinus oaxacana*, *P. patula*, *P. montezumae*, *P. teocote*, *P. pseudostrobus* and *P. leiophylla* (CONAFOR, 2018). In 2015, the disease affected forests in the states of Tlaxcala and Hidalgo, and at least 3,000 hectares sown to pines in the Sierra Norte de Puebla (Claudio *et al.*, 2012; Reséndiz *et al.*, 2015; Pérez *et al.*, 2016). It is estimated that, due to climate change, the pathogen could find favorable conditions for a wider distribution in Mexico (Pérez *et al.*, 2016). For this reason, research must be conducted to monitor and predict the disease in order to minimize the loss of forest production and ecosystem services (Sacristán, 2006; Sturrock *et al.*, 2011; Millar and Stephenson, 2015; Seidl *et al.*, 2017). In view of this challenge, the use of satellite images is an alternative for monitoring and evaluating the epidemiology of *Lophodermium*, since their viability is based on the biophysical and biochemical changes that occur in the plant cover during the

estados de Tlaxcala e Hidalgo, así como al menos 3,000 hectáreas de pino en la Sierra Norte de Puebla (Claudio *et al.*, 2012; Reséndiz *et al.*, 2015; Pérez *et al.*, 2016). Se estima que ante los escenarios de cambio climático este patógeno podría encontrar condiciones favorables para una mayor distribución en México (Pérez *et al.*, 2016). Por tal motivo, es necesario realizar investigaciones enfocadas al monitoreo y predicción de la enfermedad que contribuyan a minimizar la pérdida de la producción forestal y de sus servicios ecosistémicos (Sacristán, 2006; Sturrock *et al.*, 2011; Millar y Stephenson, 2015; Seidl *et al.*, 2017). Ante esta problemática, el uso de imágenes satelitales es una alternativa para el monitoreo y evaluación epidemiológica de *Lophodermium*, su viabilidad está fundamentada en los cambios biofísicos y bioquímicos que sufre la cubierta vegetal durante el desarrollo epidémico de la enfermedad, así como en alteraciones en los pigmentos que absorben la luz, en la estructura interna de la hoja y en el contenido de humedad a nivel celular, que se reflejan en la respuesta espectral (Chuvieco, 1996; Peña y Altmann, 2009; Rullan-Silva *et al.*, 2013; Alizadeh *et al.*, 2017). Estos cambios pueden ser identificados mediante la combinación de bandas satelitales proveniente del satélite Sentinel-2 y el uso de índices de vegetación como el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y el índice de estrés de humedad (MSI), principalmente con bandas en el rango del infrarrojo cercano (NIR) y el infrarrojo medio o de onda corta (SWIR) (James *et al.*, 2013; Houborg *et al.*, 2015; Rullan-Silva *et al.*, 2013; Yu *et al.*, 2018).

Cano *et al.* (2005), utilizaron imágenes multiespectrales del sensor IKONOS e índices de vegetación para estudiar el proceso de decaimiento en masas de *Quercus suber* en el sur de España afectadas por *Phytophthora cinnamomi*. De igual forma, Navarro-Cerrillo *et al.* (2007) se apoyaron de las imágenes del satélite ASTER y del NDVI

epidemic development of the disease, as well as on the alterations in the pigments that absorb the light, the internal structure of the leaf and the moisture content at the cellular level, which are reflected in the spectral response (Chuvieco, 1996; Peña and Altmann, 2009; Rullan-Silva *et al.*, 2013; Alizadeh *et al.*, 2017). These changes can be identified by combining the satellite bands from the Sentinel-2 satellite and using vegetation indexes such as the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the Moisture Stress Index, mainly with bands ranging from near-infrared (NIR) and mid-infrared, or short-wave infrared (SWIR) (James *et al.*, 2013; Houborg *et al.*, 2015; Rullan-Silva *et al.*, 2013; Yu *et al.*, 2018).

Cano *et al.* (2005) used multispectral images from the IKONOS sensor and vegetation indexes to study the mass decay process in *Quercus suber* affected by *Phytophthora cinnamomi* in southern Spain. Similarly, Navarro-Cerrillo *et al.* (2007) used images from the ASTER satellite and NDVI to map defoliation caused by mass decay of *Pinus sylvestris* and *P. nigra* in Sierra de los Filabres in Spain. Yu *et al.* (2018) identified infection spots and, using NDVI, Normalized Difference Moisture Index (NDMI) and MSI, estimated the severity of the damage caused by *Tomicus yunnanensis* and *Tomicus minor* in *Pinus yunnanensis*, while Sangüesa-Barrera *et al.* (2014) studied the level of severity caused by *Thaumetopoea pityocampa* in pine forests using vegetation indexes including MSI, NDVI and SAVI. Therefore, the objective of this study was to evaluate the use of satellite images from Sentinel 2 to estimate the level of severity caused by needle cast of pine (*Lophodermium* sp.) using vegetation indexes.

The study was conducted in the ejido lands of Xonocuautila, Tlatlauquitepec, located in the northeast area of the state of Puebla, Mexico, coordinates 19.731326 and -97.5494835, at 2,530 masl, from

para cartografiar la defoliación causada por el decaimiento de masa de *Pinus sylvestris* y *P. nigra* en la Sierra de los Filabres en España. Yu *et al.* (2018) identificaron focos de infección y estimaron la severidad del daño ocasionado por *Tomicus yunnanensis* y *Tomicus minor* en *Pinus yunnanensis* mediante el NDVI, el Índice Normalizado de la Diferencia de Humedad (NDMI) y el MSI. Mientras que Sangüesa-Barrera *et al.* (2014) estudiaron la severidad de *Thaumetopoea pityocampa* en bosques de pino mediante índices de vegetación como el MSI, NDVI y SAVI. Por lo tanto, el objetivo del presente estudio fue evaluar la utilidad de las imágenes satelitales Sentinel 2 para estimar la severidad causada por el tizón de los pinos (*Lophodermium* sp.), mediante índices de vegetación.

La investigación se realizó al noreste del estado de Puebla, México en el ejido de Xonocuatla, Tlatlauquitepec, a una altitud de 2,530 msnm, en las coordenadas 19.731326 y -97.5494835, durante febrero a julio del 2017 en 303 ha de uso forestal donde crecen especies de pino (*Pinus patula*, *P. montezumae*) susceptibles a *Lophodermium* sp. (CONAFOR, 2018). Se definieron 24 sitios de muestreo, los cuales estuvieron georreferenciados y distribuidos al azar. Cada sitio correspondió a parcelas circulares con un radio de 4.9 m, y un área de 75.4 m², donde se evaluó la incidencia estimando la proporción de árboles enfermos. Mientras que la severidad se estimó considerando el porcentaje de copa en cada árbol ubicado dentro de la circunferencia, para lo cual se usó una escala de severidad donde 0=sin observación de síntomas, 1=clorosis del follaje >0-5%, 2=clorosis del follaje >5-25%, 3= clorosis y necrosis del follaje moderado >25-50%, 4=clorosis y necrosis del follaje grave >50-75% y 5=follaje con necrosis >75-100% (Campbell y Neher, 1994; Cayuela *et al.*, 2014). En total se evaluaron 221 árboles. La identidad de *Lophodermium* sp. fue corroborada mediante observaciones al

February to July 2017, in 303 ha of forest where pine species grow (*Pinus patula*, *P. montezumae*) that are susceptible to *Lophodermium* sp. (CONAFOR, 2018). Samples were taken in 24 sites that were georeferenced and randomly distributed. Each site corresponded to circular plots with a radius of 4.9 m and an area of 75.4 m², where the disease incidence was evaluated by estimating the ratio of infected trees. The disease severity was estimated by determining the percentage of canopy in each tree inside the circumference; this was done by using a 0-5 severity scale, where 0=no symptoms observed; 1=canopy chlorosis >0-5%; 2=canopy chlorosis >5-25%; 3= moderate canopy chlorosis and necrosis >25-50%, 4=severe canopy chlorosis and necrosis >50-75%; and 5=necrotic canopy >75-100% (Campbell and Neher, 1994; Cayuela *et al.*, 2014). A total of 221 trees were evaluated. The identity of *Lophodermium* sp. was corroborated through observations under a compound and dissecting microscope (Ortiz-García *et al.*, 2003; Herrera and Ulloa, 2013; Koukol *et al.*, 2015). The evaluations were conducted on February 23, March 18, April 16, May 14, June 3, June 23, and July 13, 2017; on those same days, satellite images were obtained. Additionally, from the National Phytosanitary Epidemiological Reference Laboratory, data on the temperature, relative humidity and dew point (minimum, average and maximum) in the municipality of Tlatlauquitepec during the study period were consulted (LANREF-DGSV, 2019).

At the same time, five images from the Sentinel 2 satellite were downloaded from the official Sentinel platform (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>); the images were selected because they were cloudless and coincided with the dates on which the disease was evaluated in the field. The images corresponded to the following dates: February 23, May 14, June 3, June 23 and July 13, 2017. These

microscopio de disección y compuesto (Ortiz-García *et al.*, 2003; Herrera y Ulloa, 2013; Koukol *et al.*, 2015). Las evaluaciones se realizaron los días 23 de febrero, 18 de marzo, 16 de abril, 14 mayo, 3 de junio, 23 de junio y el 13 de julio del 2017, lo cual coincidió con la obtención de imágenes satelitales. Adicionalmente, se consultaron datos del Laboratorio Nacional de Referencia Epidemiológica Fitosanitaria relacionados con temperatura, humedad relativa y punto de rocío (mínimas, medias y máximas) del municipio de Tlatlauquitepec correspondientes al periodo de estudio (LANREF-DGSV, 2019).

Paralelamente, se obtuvieron cinco imágenes emitidas por el satélite Sentinel 2, descargadas desde la plataforma oficial de Sentinel: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>, las cuales fueron elegidas por estar libres de nubosidad y corresponder con las fechas de evaluación de la enfermedad en campo. Las imágenes correspondieron a los días: 23 de febrero, 14 mayo, 3 de junio, 23 de junio y 13 de julio del 2017. Éstas fueron utilizadas debido al potencial de sus características, especialmente de las bandas infrarrojas (NIR), las cuales permiten diferenciar la reflectancia entre biomasa sana y enferma en ecosistemas forestales (ESA, 2015; Chemura *et al.*, 2017; Zarco-Tejada *et al.*, 2019).

Cada una de las imágenes satelitales fueron procesadas para convertir los números digitales (ND) a reflectancia TOA (top-of-atmosphere), para lo cual, este valor se dividió entre el factor de escala 10,000 (Gascon *et al.*, 2016). Posteriormente, cada imagen fue sometida a un proceso de corrección atmosférica mediante el módulo ATCOR, el cual está basado en el modelo MODTRAN (Moderate Resolution Atmospheric Transmission), que modela las condiciones atmosféricas imperantes al momento de paso de la plataforma por un área dada (Peña y Altmann, 2009). Estos procesos fueron realizados mediante el software Geomatica 2017 y ArcGis

images were used because of the potential of their characteristics, especially the infrared bands (NIR) that make it possible to differentiate the reflectance between healthy and infected biomass in forest ecosystems (ESA, 2015; Chemura *et al.*, 2017; Zarco-Tejada *et al.*, 2019).

Each satellite image was processed to convert the digital numbers (DN) to top-of-atmosphere (TOA) reflectance, for which this value was divided by a 10,000-scale factor (Gascon *et al.*, 2016). Each image was later submitted to an atmospheric correction process using the ATCOR module, which is based on the MODTRAN model (Moderate Resolution Atmospheric Transmission) that models the prevailing atmospheric conditions at the time the platform passes over a given area (Peña and Altmann, 2009). These processes were carried out using Geomatica 2017 and ArcGis 10.2 software. The NDVI, MSI and SAVI indexes were estimated using the corrected multispectral data (Rouse *et al.*, 1974; Rock *et al.*, 1986; Huete, 1988). The results of each estimated index were re-scaled and indexes at the 0 to 1 levels were obtained, where, in the case of NDVI and SAVI, 1 corresponded to 100% severity, and in the case of MSI, 1 corresponded to absence of the disease (Sangüesa *et al.*, 2014). The vegetation indexes were estimated by processing satellite images using ArcGis 10.2 software. The climatic variables were analyzed to determine their correlation with the incidence and severity. The values of disease severity caused by *Lophodermium* sp. that were obtained in the field and the values obtained from the indexes by processing the satellite images were subjected to an analysis of correlation using the R statistical software (Cano *et al.*, 2005).

The incidence of *Lophodermium* sp. was moderate-to-high (64-98%) with low-to-moderate severity (< 33%). In February, the average severity reached 7.1%, while in March the severity increased

10.2. Con los datos multispectrales corregidos se estimó el NDVI, el MSI y el SAVI (Rouse *et al.*, 1974; Rock *et al.*, 1986; Huete, 1988). Los resultados de cada uno de los índices estimados fueron re-escalados y se obtuvieron índices en niveles de cero a uno, donde uno correspondió a una severidad de 100% para el caso del índice NDVI y SAVI, mientras que para el MSI un valor de uno correspondió a la ausencia de la enfermedad (Sangüesa *et al.*, 2014). Los índices de vegetación se estimaron mediante el procesamiento de las imágenes satelitales en el software ArcGis 10.2. Las variables climáticas se sometieron a análisis de correlación con la incidencia y severidad. Los valores de la severidad de *Lophodermium* sp. obtenidos en campo y los valores arrojados por los índices obtenidos mediante el procesamiento de las imágenes satelitales se sometieron a un análisis de correlación mediante el paquete estadístico R (Cano *et al.*, 2005).

La incidencia de *Lophodermium* sp. fue moderada a alta (64 - 98%) con severidades bajas a moderadas (< 33 %). En el mes de febrero se observó una severidad promedio de 7.1%, en el mes de marzo la severidad incrementó y alcanzó un valor de 13.8%. Sin embargo, en el mes de abril y mayo se observó un decremento en la severidad (11.9% y 10.6% respectivamente), esto pudo deberse a la caída de acículas enfermas. Durante los primeros días del mes de junio la severidad incrementó (13.0%) y continuó con esta tendencia durante la siguiente evaluación (25.7%). Finalmente, para el mes de julio la severidad alcanzó un valor de 32.8% (Figura 1A). Durante este periodo, la humedad relativa fue alta (61.0 - 99.6%) con temperaturas medias entre 15.7 y 24.5 °C (Figura 1B).

Estas condiciones son favorables para el desarrollo de *Lophodermium*, ya que se ha reportado que una alta humedad relativa con temperaturas entre 14 y 22 °C son óptimas para su desarrollo, aunque sobrevive a temperaturas mínimas entre -2

and reached a value of 13.8%. However, in April and May, the severity decreased (11.9% and 10.6%, respectively), which could be due to the fall of infected needles. During the first days of June, the severity increased (13.0%) and continued to grow during the following evaluation (25.7%). Finally, in July, the severity reached a value of 32.8% (Figure 1A). During this period, the relative humidity was high (61.0-99.6%) with average temperatures between 15.7 and 24.5 °C (Figure 1B).

These conditions are favorable for the development of *Lophodermium* since it has been reported that high relative humidity with temperatures between 14 and 22 °C are optimum for the pathogen to develop, although it can survive at minimum temperatures of -2 to 1 °C, and maximum temperatures of 25 to 35 °C (Ahanger *et al.*, 2016; Polmanis *et al.*, 2017).

Disease severity was moderately correlated with climatic variables, mainly with relative humidity (0.50938, $p=0.2429$). However, the incidence had a positive correlation with the average relative humidity (0.8611, $p=0.0128$) and with the average dew point (0.8415, $p=0.0175$). These results are in agreement with those reported by Ahanger *et al.* (2016) and Polmanis *et al.* (2017), who indicated that the combination of optimum temperatures with high relative humidity influences *Lophodermium* sp. expression and spread.

The correlation analysis using the data estimated by MSI and the observed values indicated a correlation of 0.70783, $p<0.0001$; the estimation of severity using this index is shown in Figure 2. The MSI has been used to evaluate defoliation in pine forests because of its sensitivity to detecting changes in water content in vegetation, a fact that is closely related to the weakness or vulnerability of pine trees to pest and disease attacks (Townsend *et al.*, 2012; Sangüesa *et al.*, 2014; Rullán *et al.*, 2015).

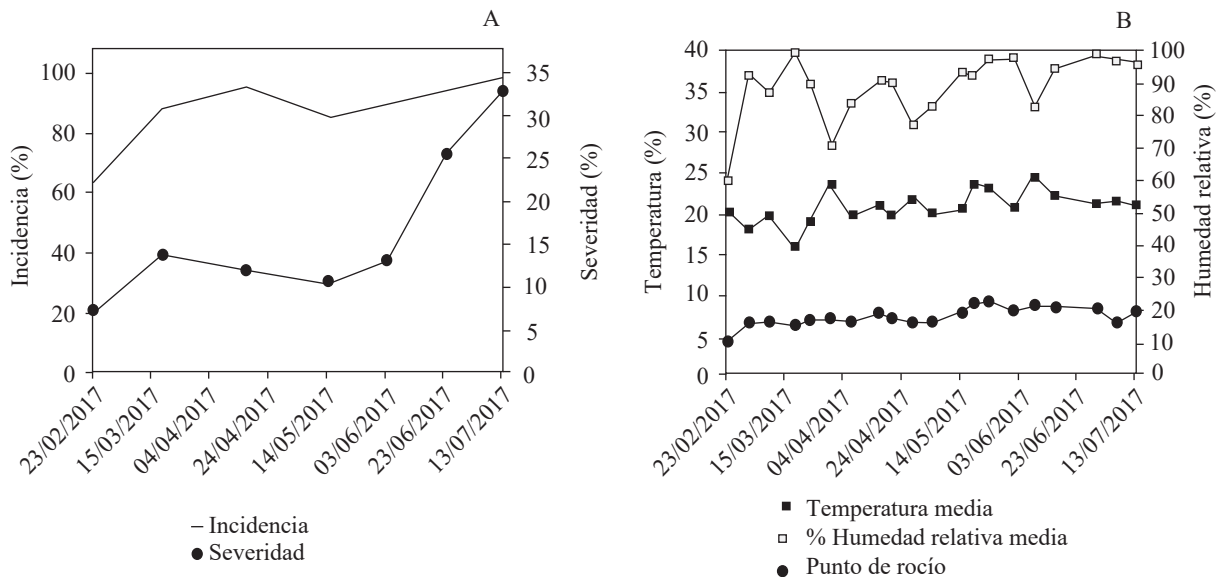


Figura 1. Incidencia y severidad de *Lophodermium* sp. en bosque de pino en Xonocuatla, Tlatlauquitepec y su relación con variables climáticas. A) Desarrollo del tizón de los pinos. B) Variables climáticas. Cada punto representa la media.
Figure 1. Incidence and severity of the damage caused by *Lophodermium* sp. in pine forests in Xonocuatla, Tlatlauquitepec, and their relationship with climatic variables. A) Development of needle cast of pine. B) Climatic variables. Each point represents the mean.

a 1 °C y máximas de 25 a 35 °C (Ahanger *et al.*, 2016; Polmanis *et al.*, 2017).

La severidad mostró una correlación moderada con las variables climáticas, principalmente con la humedad relativa (0.50938, $p=0.2429$). Mientras que la incidencia tuvo una correlación positiva con la humedad relativa media (0.8611, $p=0.0128$) y con el punto de rocío medio (0.8415, $p=0.0175$). Estos resultados coinciden con lo reportado por Ahanger *et al.* (2016) y Polmanis *et al.* (2017) quienes indicaron que la combinación de temperaturas óptimas con alta humedad relativa influye en la expresión y dispersión de *Lophodermium* sp.

El análisis de correlación realizado con los datos estimados por el MSI y los valores observados indicó una correlación de 0.70783, $p<0.0001$; la estimación de la severidad con este índice se muestra en la Figura 2. El MSI se ha utilizado en la evaluación de la defoliación de bosques de pino debido a su sensibilidad para detectar los cambios

On the other hand, data estimated using NDVI and the data observed had a correlation of 0.53316, $p<0.0001$; the values estimated using NDVI are shown in Figure 3. James *et al.* (2013) and Zarco-Tejada *et al.* (2018) demonstrated that the NDVI obtained using images from the Sentinel 2 satellite had adequate capacity to evaluate the chlorophyll content. MSI and NDVI are indexes that are highly related with the chlorophyll and water content in trees and have been used to evaluate forest mass decay caused by foliar pests and diseases (Peña and Altmann, 2009; Olsson *et al.*, 2016).

These results are in agreement with those reported by Yu *et al.* (2018), where MSI was more precise when estimating *Tomicus* sp. severity in *Pinus yunnanensis* compared to NDVI and the Normalized Difference Moisture Index (NDMI).

The estimated severity using SAVI had a low correlation with the observed severity (0.24844, $p=0.0062$), which could be due an overestimation

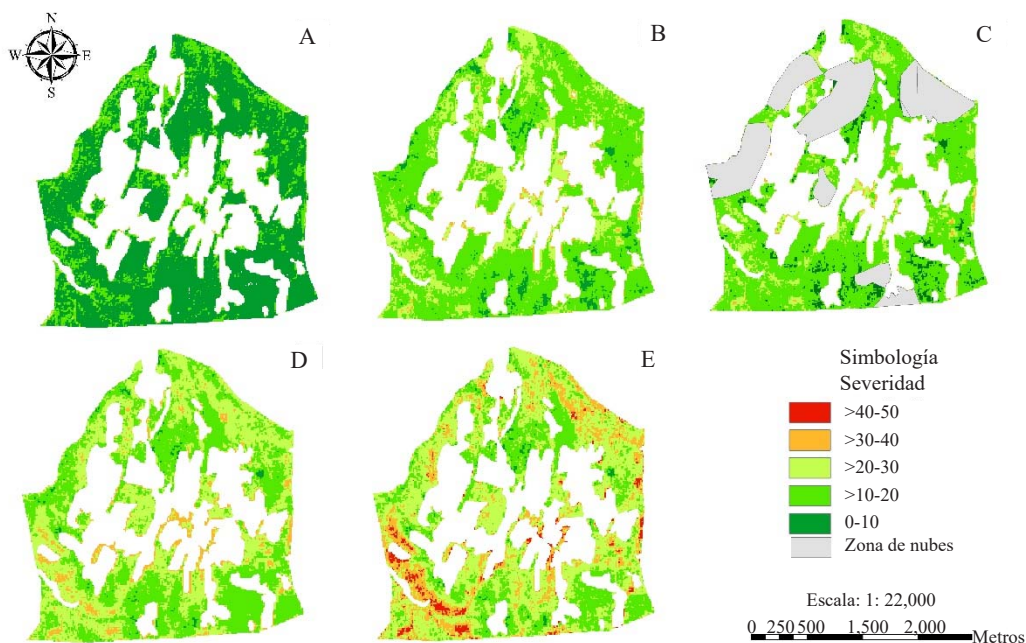


Figura 2. Severidad de *Lophodermium* sp. en Xonocuatla, Tlatlauquitepec, estimada mediante el Índice de Estrés de Humedad (MSI) obtenido de imágenes satelitales Sentinel 2 en el año 2017: A) 23 febrero, B) 14 de mayo, C) 03 de junio, D) 23 de junio, E) 13 julio. Las zonas blancas en cada mapa corresponden a áreas de cultivo.
Figure 2. Severity of damage caused by *Lophodermium* sp. in Xonocuatla, Tlatlauquitepec, estimated using the Moisture Stress Index (MSI) obtained using images from the Sentinel 2 satellite in 2017: A) February 23; B) May 14; C) June 03; D) June 23; E) July 13. The white areas on each map indicate cropping regions.

en el contenido del agua en la vegetación lo cual está estrechamente relacionado con la debilidad o vulnerabilidad del pino ante el ataque de plagas y enfermedades (Townsend *et al.*, 2012; Sangüesa *et al.*, 2014; Rullán *et al.*, 2015).

Por otra parte, los datos estimados por el NDVI y los observados tuvieron una correlación de 0.53316, $p < 0.0001$; los valores estimados por este índice se presentan en la Figura 3. James *et al.* (2013) y Zarco-Tejada *et al.* (2018), probaron que el NDVI obtenido a partir de imágenes Sentinel 2, tuvieron una adecuada capacidad para evaluar el contenido de clorofila. El MSI y el NDVI son índices que están fuertemente relacionados al contenido de clorofila y agua que tienen los árboles, y han

of that variable, along with the effect soil has on the reflectance (Figure 4). Sangüesa *et al.* (2014) used SAVI to study defoliation in pine trees caused by *Thaumetopoea pityocampa*, but the index had limitations when distinguishing changes in plant cover.

The analysis allowed detecting differences in the sensitivity of each index to evaluate changes in plant canopy health. MSI had a positive and higher correlation compared to NDVI and SAVI. Therefore, the results obtained suggest that satellite images from Sentinel 2 and MSI can be used as a tool to monitor the severity of needle cast of pine. These results provide information about the space-time behavior of *Lophodermium* sp. in pine forests

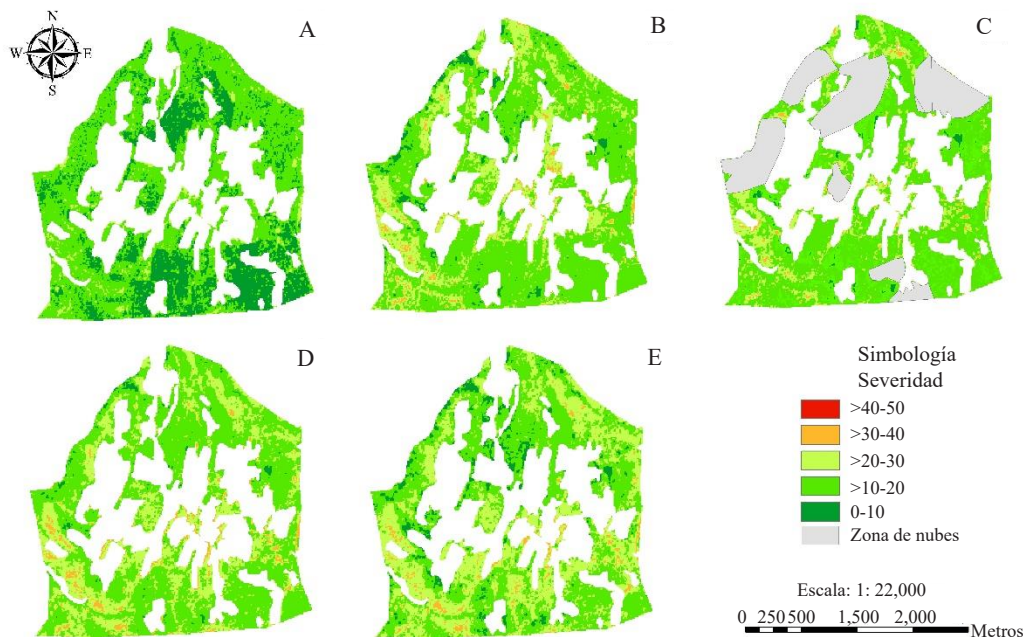


Figura 3. Severidad de *Lophodermium* sp. estimada en Xonocuatla, Tlatlauquitepec, mediante el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) obtenido de imágenes satelitales Sentinel 2 en el año 2017: A) 23 febrero, B) 14 de mayo, C) 03 de junio, D) 23 de junio, E) 13 julio. Las zonas blancas en cada mapa corresponden a áreas de cultivo.

Figure 3. Severity of damage caused by *Lophodermium* sp. in Xonocuatla, Tlatlauquitepec, estimated using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) obtained using images from the Sentinel 2 satellite in 2017: A) February 23; B) May 14; C) June 03; D) June 23; E) July 13. The white areas on each map indicate cropping regions.

sido utilizados en la evaluación del decaimiento de las masas forestales a causa de plagas o enfermedades foliares (Peña y Altmann, 2009; Olsson *et al.*, 2016).

Estos resultados coinciden con lo reportado por Yu *et al.* (2018), donde el MSI tuvo una mayor precisión para estimar la severidad de *Tomicus* sp. en *Pinus yunnanensis*, en comparación con el NDVI y el Índice Normalizado de la Diferencia de Humedad (NDMI).

La severidad estimada mediante el índice SAVI tuvo una baja correlación con la severidad observada (0.24844, $p=0.0062$), lo que implicó una sobreestimación de dicha variable, aunado al efecto

in Mexico, which, once they are validated through further studies, can be used in forest management programs.

~~~~~ End of the English version ~~~~~

del suelo sobre la reflectancia (Figura 4). Sangüesa *et al.* (2014), utilizaron el índice SAVI para estudiar la defoliación en bosques de pino causada por *Thaumetopoea pityocampa* sin embargo, este índice mostró limitaciones para distinguir los cambios en la cobertura vegetal.

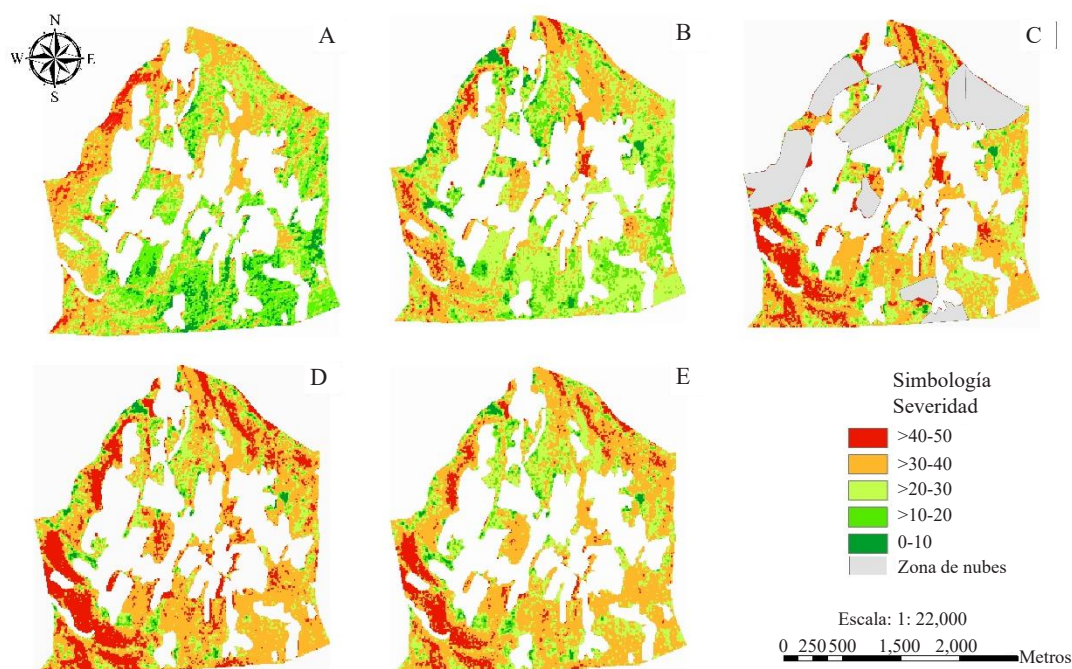


Figura 4. Severidad de *Lophodermium* sp. estimada en Xonocuautila, Tlatlauquitepec, mediante el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI) obtenido de imágenes satelitales Sentinel 2 en el año 2017: A) 23 febrero, B) 14 de mayo, C) 03 de junio, D) 23 de junio, E) 13 julio. Las zonas blancas en cada mapa corresponden a áreas de cultivo.

Figure 4. Severity of damage caused by *Lophodermium* sp. in Xonocuautila, Tlatlauquitepec, estimated using the Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) obtained using images from the Sentinel 2 satellite in 2017: A) February 23; B) May 14; C) June 03; D) June 23; E) July 13. The white areas on each map indicate the cropping regions.

El análisis permitió detectar diferencias en la sensibilidad de cada índice para evaluar los cambios en la sanidad del dosel vegetal. El índice MSI tuvo una correlación positiva y superior en comparación a los índices NDVI y SAVI. Por lo tanto, los resultados sugieren que las imágenes satelitales Sentinel 2 y el índice MSI pueden ser utilizados como una herramienta en el monitoreo de la severidad del tizón de los pinos; estos resultados proveen información sobre el comportamiento espacio-temporal de *Lophodermium* sp. en bosques de pino en México, que previa validación con estudios de mayor duración, pueden ser utilizados en programas de manejo forestal.

## LITERATURA CITADA

- Ahanger FA, Dar GH, Beig MA, Sofi TA, and Ganie SA. 2016. Effect of weather parameters on Blue pine (*Pinus wallichiana* J.) needle blight and ascospore release of *Lophodermium pinastri* in India. *International Journal of Agricultural Technology* 12:1099-1112. [http://www.ijat-aatsea.com/past\\_v12\\_n6.html](http://www.ijat-aatsea.com/past_v12_n6.html)
- Ahanger FA, Hassan DG, Being MA, Sofi TA, Shah MD and Ganaie SA. 2017. *In vitro* evaluation of fungicides against *Lophodermium pinastri* causing needle blight disease of blue pine in Kashmir (India). *SKUAST Journal of Research* 19:66-71. <http://www.indianjournals.com/ijor.aspx?target=ijor:skuastjr&volume=19&issue=1&article=007>
- Alizadeh M, Moharrami M and Rasouli AA. 2017. Geographic Information System (GIS) as a Tool in the Epidemiological Assessment of Wetwood Disease on elm Trees in Tabriz City, Iran. *Cercetari Agronomice in Moldova* 50:91-100. <https://doi.org/10.1515/cerce-2017-0018>

- Campbell CL and Neher DA. 1994. Estimating Disease Severity and Incidence. Pp. 117-147. In: Campbell CL y Benson DM (eds.). *Epidemiology and Management of Root Diseases*. Springer, Berlin, Heidelberg. 344 p. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-85063-9\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-642-85063-9_5)
- Cano F, Navarro RM, García A, y Sánchez De La Orden M. 2005. Evaluación de la defoliación mediante imágenes IKONOS en masas de *Quercus suber* L. en el sur de España. *Investigaciones Agrarias: Sistemas y Recursos Forestales* 14:242-252. <https://recyt.fecyt.es/index.php/IA/article/view/2280/1687>
- Cayuela L, Hernández R, Hódar JA, Sánchez G and Zamora R. 2014. Tree damage and population density relationships for the pine processionary moth: Prospects for ecological research and pest management. *Forest Ecology and Management* 328:319-325. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.05.051>
- Chemura A, Mutanga O and Dube T. 2017. Separability of coffee leaf rust infection levels with machine learning methods at Sentinel-2 MSI spectral resolutions. *Precision Agriculture* 18:859-881. <https://doi.org/10.1007/s11119-016-9495-0>
- Chuvienco E. 1996. *Fundamentos de Teledetección espacial*. Editorial Rialp. Madrid. 568 p.
- Cibrián TD, García DS, Alvarado RD, Colomo GI, Palacios HG, Meléndez HF y Sámano MJ. 2007. En: Cibrián TD, Alvarado RD, García DS. 2007. *Enfermedades Forestales en México*. 1ra. Ed. Universidad Autónoma de Chapingo. Estado de México, México. 585 p.
- Claudio GL, Góngora RF, Toledo GS, Jaime GR y García QE. 2012. Evaluación de daños por patógenos fúngicos en *Pinus* y *Quercus* del Área de Protección de Flora y Fauna "La Primavera" Jalisco, México. *Acta Universitaria* 22:5-12. <http://www.actauniversitaria.ugto.mx/index.php/acta/article/view/397>
- CONAFOR. 2018. Diagnóstico fitosanitario del estado de Puebla. Comisión Nacional Forestal. Gerencia Estatal Puebla. México. 25 p. <http://sivicoff.cnf.gob.mx/firmProgramasde-trabajoanuales.aspx>
- ESA. 2015. Sentinel-2 User handbook. Standar document. European Space Agency. Issue 1, Review 2. 64 p.
- Gascon F, Thépaut O, Jung M, Francesconi B, Louis J, Lonjou V, Lafrance B, Massera S, Gaudel-Vacaresse A, Languille F, Alhammoud B, Viallefont F, Pflug B, Bieniarz J, Clerc S, Pessiot L, Trémas T, Cadau E, De Bonis R, Isola C, Martimort P and Fernandez V. 2016. Copernicus Sentinel-2 Calibration and Products Validation Status. *Remote Sensing* 9:584. <https://doi.org/10.3390/rs9060584>
- Herrera T y Ulloa M. 2013. El reino de los hongos. *Micología básica aplicada*. Segunda Reimpresión. UNAM. Fondo de Cultura Económica. México, D.F. 551 p.
- Houborg R, Fisher JB and Skidmore AK. 2015. Advances in remote sensing of vegetation function and traits. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 43:1-6. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2015.06.001>
- Huete A. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25:295-309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)
- James FW, Dash J, Watmough G and James ME. 2013. Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 82: 83-92. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.04.007>
- Koukol O, Pusz W and Minter D. 2015. A new species of *Lophodermium* on needles of mountain pine (*Pinus mugo*) from the Giant Mountains in Poland. *Mycological Progress* 14:1-13. <https://doi.org/10.1007/s11557-015-1038-y>
- LANREF-DGSV. 2019. Datos climáticos. Laboratorio Nacional de Referencia Fitosanitaria-Dirección General de Sanidad Vegetal. [www.royacafe.lanref.org.mx](http://www.royacafe.lanref.org.mx) (Consulta, octubre 2019).
- Millar CI and Stephenson NL. 2015. Temperate forest health in an era of emerging megadisturbance. *Science* 349:823-826. <https://doi.org/10.1126/science.aaa9933>
- Navarro-Cerrillo RM, Varo MA, Lanjeri S, y Hernández-Clemente R. 2007. Cartografía de defoliación en los pinares de pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) y pino salgareño (*Pinus nigra* Arnold.) en la Sierra de los Filabres. *Ecosistemas* 16: 163-171. <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/download/464/445>
- Neimane U, Polmnis K, Zaluma A, Klavina D, Gaitnieks T and Jansons A. 2018. Damage caused by *Lophodermium* needle cast in open-pollinated and control-crossed progeny trials of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *The Forestry Chronicle* 94:155-161. <https://doi.org/10.5558/tfc2018-024>
- Olsson PO, Lindström J and Eklundh L. 2016. Near real-time monitoring of insect induced defoliation in subalpine birch forests with MODIS derived NDVI. *Remote Sensing of Environment* 181:42-53. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.03.040>
- Ortiz-García S, Germandt DS, Stone JK, Johnston PR, Chape-la IR, Salas LR and Alvarez BE. 2003. Phylogenetics of *Lophodermium* from pine. *Mycologia* 95:846-859. <https://doi.org/10.1080/15572536.2004.11833044>
- Peña MA y Altmann SH. 2009. Reconocimiento del efecto de *Cinara cupressi* (Hemiptera: Aphididae) en el estado sanitario de *Austrocedrus chilensis* mediante imágenes multiespectrales. *Bosque* 30:151-158. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002009000300005>
- Pérez MR, Romero SM, González HA, Pérez SE y Arriola PJ. 2016. Distribución Potencial de *Lophodermium* sp. en Bosques de Coníferas de Puebla y Estados Próximos, con Escenarios de Cambio Climático. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 7:81-97. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v7i36.61>
- Polmanis K, Gaitnieks T, Beļeviĉam V, Rungis D and Bauma-ne A. 2017. Occurrence of *Lophodermium* spp. in young scots pine stands in Latvia. *Forestry and Wood Processing* 1:1-20.
- Reséndiz MJ, Guzmán DL, Muñoz VA, De Pascual PC y Olvera CL. 2015. Enfermedades foliares del arbolado en el Parque Cultural y Recreativo Tezozómoc, Azcapotzalco, D.F. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 6:106-123. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v6i30.211>
- Rock BN, Vogelmann, JE, Williams DL, Vogehmann AF and Hoshizaki T. 1986. Remote detection of forest

- damage. *Ecology from Space* 36:439-445. <https://doi.org/10.2307/1310339>
- Rouse JW, Haas RH, Schell JA and Deering DW. 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Pp. 309-317. In: Freden SC, Mercanti EP, Becker MA. (eds.). *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*, Washington DC. 1008 p. <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19740022614>
- Rullán-Silva CD, Olthoff AE, Delgado de la Mata JA and Pajares-Alonso JA. 2013. Remote monitoring of forest insect defoliation. A review. *Forest Systems* 22:377-391. <https://doi.org/10.5424/fs/2013223-04417>
- Rullán-Silva C, Olthoff AE, Pando V, Pajares JA and Delgado JA. 2015. Remote monitoring of defoliation by the beech leaf-mining weevil *Rhynchaenus fagi* in northern Spain. *Forest Ecology and Management* 347:200-208. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.03.005>
- Sacristán RF. 2006. La Teledetección satelital y los sistemas de protección Ambiental. Universidad Complutense de Madrid. *Aqua TIC* 24:13-41. <https://doi.org/10.22518/16578953.701>
- Sangüesa BG, Camarero JJ, García MA, Hernández R and 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* 320:171-181. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.03.008>
- Seidl R, Thom D, Kautz M, Martín BD, Peltoniemi M, Vacchiano G, Wild J, Ascoli D, Petr M, Honkaniemi J, Lexer M, Trotsiuk V, Mairota P, Svoboda M, Fabrika M, A. Nagel T and Reyer C. 2017. Forest disturbances under climate change. *Nature Climate Change* 7:395-402. <https://doi.org/10.1038/nclimate3303>
- Stenström BE and Ihrmark K. 2005. Identification of *Lophodermium seditiosum* and *L. pinastri* in Swedish forest nurseries using species-specific PCR primers from the ribosomal ITS region. *Forest Pathology* 35:163-172. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0329.2005.00398.x>
- Sturrock RN, Frankel SJ, Brown AV, Hennon PE, Kliejunas JT, Lewis KJ, Worrall JJ and Woods AJ. 2011. Climate change and forest diseases. *Plant Pathology* 60:133-149. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2010.02406.x>
- Townsend PA, Singh A, Foster JR, Rehberg NJ, Kingdon CC, Eshleman KN and Seagle SW. 2012. A general Landsat model to predict canopy defoliation in broadleaf deciduous forests. *Remote Sensing of Environment* 119:255-265. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.12.023>
- Yu L, Huang J, Zong S, Huang H, and Luo Y. 2018. Detecting shoot beetle damage on yunnan pine using landsat time-series data. *Forests* 9:2-14. <https://doi.org/10.3390/f9010039>
- Zarco-Tejada PJ, Hornero A, Becka PSA, Kattenbornd T, Kempeneers P and Hernández-Clemente R. 2019. Chlorophyll content estimation in an open-canopy conifer forest with Sentinel-2A and hyperspectral imagery in the context of forest decline. *Remote Sensing of Environment* 223:320-335. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.031>
- Zarco-Tejada PJ, Hornero A, Hernández-Clemente R and Beck PS. 2018. Understanding the temporal dimension of the red-edge spectral region for forest decline detection using high-resolution hyperspectral and Sentinel-2a imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 137:134-148. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.01.017>