

La teledetección, herramienta imprescindible para la localización de áreas forestales debilitadas

María José Manzano Serrano
Ramón Folgueiras González

Estudios Medioambientales S.L. (ESMA)

El episodio de extrema sequía sufrido en el sur y suroeste de la península ibérica en el verano de 2019 quedó reflejado en los montes por el deterioro del estado de vitalidad de la vegetación allí asentada que, en algunos casos, incluso llegó a provocar la muerte (Figura 1) de especies arbóreas típicas del monte mediterráneo (AIEF, 2019). Este debilitamiento de las masas forestales fue muy patente en el extremo suroeste de la Comunidad de Madrid, lugar elegido para realizar un análisis de las imágenes multiespectrales obtenidas por satélite con el objetivo de identificar las áreas forestales afectadas e investigar su evolución desde 2018 hasta 2020. La teledetección es la técnica de adquisición de datos de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales. La interacción electromagnética entre el terreno y el sensor genera una serie de datos que son procesados posteriormente para obtener información interpretable de la Tierra (IGN, 2018).

Figura 1. Daños en encina por estrés hídrico.



ANTECEDENTES

En general, el año hidrológico 2018-2019 se caracterizó por resultar muy cálido y muy seco en gran parte del país. Las temperaturas máximas diarias se situaron en promedio 1,2 °C por encima del valor normal, resultando 2019 el tercer año con la temperatura media de las máximas más alta desde el comienzo de la serie (1965). Con respecto a las precipitaciones, el invierno de 2018-2019 fue muy seco en la mayor parte de la Comunidad de Madrid, con registros que apenas alcanzaron el 25 % de los valores normales para la estación. La primavera de 2019, por su parte, resultó muy seca en el tercio oeste de la Comunidad y seca en el resto, y durante el verano apenas se registraron un 50% de las precipitaciones normales para la estación en la Comunidad (AEMET, 2020).

Esta situación provocó un estrés fisiológico en la vegetación que se manifestó en forma de pérdida de biomasa foliar, llegando incluso a ocasionar la muerte del estrato arbóreo y de matorral en aquellos suelos con peores condiciones para la retención de agua.

El año hidrológico 2019-2020, por el contrario, tuvo un carácter húmedo en gran parte del país. En la Comunidad de Madrid, el otoño de 2019 y el invierno 2019-2020 presentaron valores normales de precipitación. La primavera tuvo un carácter entre húmedo y muy húmedo según zonas, llegándose a registrar valores superiores al 50 % respecto a los normales. El verano resultó algo seco en el oeste de la Comunidad, recogiendo un 25 % menos de precipitación que la normal para esta estación.

METODOLOGÍA

El estrés fisiológico detectado en las masas forestales del oeste de la comunidad, como consecuencia de las condiciones climatológicas que caracterizaron al año hidrológico 2018-2019, fue motivo de preocupación por la pérdida de vitalidad que supuso en el arbolado. Zonificar las masas afectadas en función del grado de daño es una labor previa indispensable para priorizar las áreas en las que actuar o estudiar su evolución frente



Figura 2. Localización de la zona de estudio.

a organismos oportunistas que deterioren aún más su estado fitosanitario.

Sin embargo, la gran extensión afectada y el difícil acceso a muchas masas para evaluar su estado complican sobremanera la opción de llevar a cabo este estudio sobre el terreno. Afortunadamente, mediante el oportuno procesamiento y análisis de imágenes multiespectrales proporcionadas por satélites, es posible obtener índices de vegetación, los cuales, a partir del comportamiento espectral de la vegetación, aportan información sobre su actividad fotosintética.

Trabajando con imágenes tomadas en diferentes momentos se logra determinar la evolución que presenta un índice de vegetación concreto en una zona determinada. Esto permite establecer qué masas forestales han experimentado un decaimiento con respecto al momento en el que se tomó la imagen más antigua y el grado de decaimiento padecido.

De tal manera, sin necesidad de realizar un inventario de daños sobre el terreno, se puede priorizar las masas sobre las que interesa centrar la atención, por ser en las que en mayor medida ha disminuido la actividad fotosintética.

La zona de estudio (Figura 2) se circunscribe al tercio oeste de la Comunidad de Madrid, quedando limitada por el norte por la cota de 1500 m, ya que los principales daños se han localizado por debajo de dicha altitud. Por el oeste y por el sur el contorno lo marca el propio límite de la Comunidad de Madrid y por el este el río Guadarrama.

La superficie total de la zona contemplada en este estudio es de 164.523 ha. Se trata de una extensión elevada para prospectar exclusivamente mediante trabajos de campo la totalidad de las masas que muestran un acusado estrés fisiológico. La teledetección se convierte, por lo tanto, en la mejor herramienta a utilizar para los objetivos de este trabajo.

El estudio de la variación interanual que el estrés hídrico produce en un índice de vegetación se debe realizar para el mismo momento del año, que se corresponde con aquel en el que la sequía fisiológica adquiere mayor entidad. Se hace necesario, por tanto, determinar cuál es ese momento dentro del año, lo que obliga a llevar a cabo un estudio previo del clima.

La zona de análisis se encuadra dentro de los subtipos fitoclimáticos

nemoromediterráneos genuinos VI(IV)1, VI(IV)2 y mediterráneos genuinos IV3 y IV4 según la clasificación desarrollada por Allué-Andrade (1990). Estas regiones se caracterizan por presentar un clima mediterráneo continentalizado, de veranos bastante cálidos, acusada sequía estival e inviernos fríos. En estos subtipos fitoclimáticos la vegetación tiende a padecer el momento de mayor de estrés hídrico al final del verano, antes de que bajen lo suficiente las temperaturas, comiencen las lluvias otoñales y las especies caducifolias empiecen a perder superficie foliar por la proximidad del periodo frío. Es este momento en el que se alcanza el mínimo de actividad fotosintética por parte de la vegetación dentro del periodo vegetativo, que será tanto menor cuanto mayor sea el estrés que sufra la planta. Se trata, por lo tanto, del mejor momento para evaluar la variación de la actividad fotosintética entre dos años distintos.

Para este estudio se ha trabajado con imágenes Landsat 8 OLI/TIRS. El programa Landsat, gestionado de forma conjunta por la NASA y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), se encuentra actualmente en su octava fase, llamada Landsat Data Continuity Mission (LDCM), conociéndose el equipo compuesto por satélite y sensores como Landsat 8 OLI/TIRS (USGS, 2019). El equipo de detección remota instalado en la LDCM incluye un radiómetro de barrido multicanal OLI (Operational Land Imager) y un radiómetro infrarrojo de dos canales TIRS (Thermal Infrared Sensor). El instrumento OLI opera en nueve longitudes de onda en el rango de 0.433-2.300 μm y proporciona imágenes con una resolución máxima de 30 m para las bandas multispectrales utilizando avanzadas tecnologías de imágenes espaciales (EOS, 2013).

Las imágenes utilizadas fueron tomadas en el mes de septiembre de los años 2018, 2019 y 2020, eligiéndose aquellas que eran lo más próximas entre sí dentro del mes y que menor porcentaje de suelo y escena presentaban cubierto por nubes.

Las imágenes se han sometido a una fase de pre-procesamiento para obtener la reflectividad en superficie,

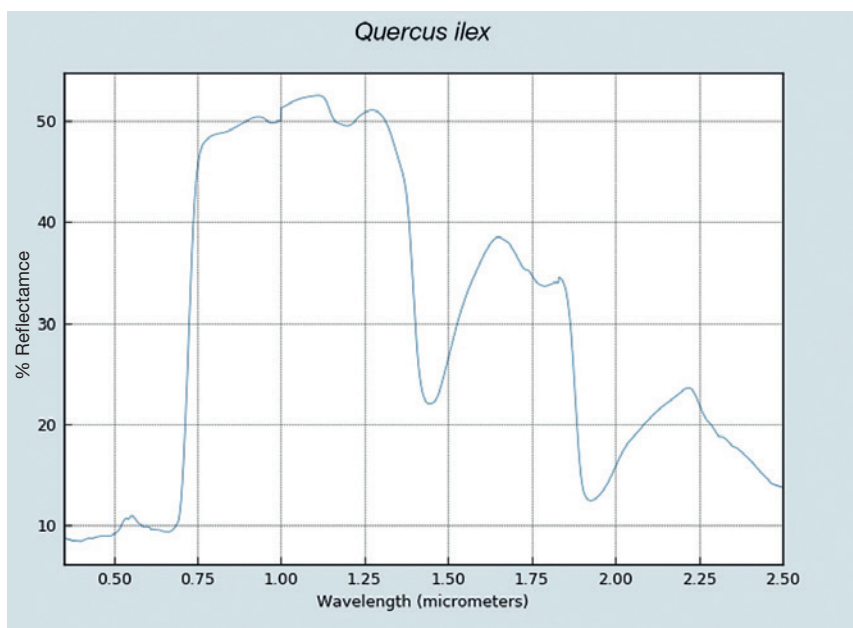


Figura 3. Firma espectral de hojas de encina con buen estado sanitario (Fuente: Ecstress Spectral Library, NASA)

corrigiendo así los efectos de la dispersión atmosférica (WULDER, 2009). Para ello se utiliza el método DOS1 (Dark Object Subtraction), el cual asume que el pixel más oscuro de cada banda no debe reflejar luz, por lo que cualquier valor mayor que cero de ese pixel es consecuencia de la dispersión atmosférica. Dicha dispersión se elimina restando este valor a cada pixel de la banda (Chavez, 1988).

La imagen obtenida tras llevar a cabo la corrección atmosférica puede ser mejorada realizando a su vez una corrección topográfica. Para ello se utiliza un modelo digital de elevaciones con una malla de 5 m y los datos de la elevación del sol y su azimut en el momento en el que el satélite capturó la imagen. Esta corrección topográfica permite compensar las diferencias de iluminación solar debidas a la variación altitudinal del terreno, de forma que homogeniza la variabilidad espectral, reduciendo el porcentaje de sombras.

Tras la corrección atmosférica y topográfica se obtiene el índice de vegetación. Un Índice de Vegetación puede ser definido como un parámetro calculado a partir de los valores de la reflectividad a distintas longitudes de onda, y que es particularmente sensible a la cubierta vegetal. En efecto, la vegetación sana tiende a presentar una elevada reflectancia

a partir de una longitud de onda próxima a los 0,7 μm y hasta 1,3 μm (Sacha, 2010). Esto se puede observar en la llamada firma espectral de *Quercus ilex* (Figura 3). Este rango de longitud de onda coincide con el del infrarrojo cercano (NIR), mostrado por la banda 5 de las imágenes Landsat 8 OLI/TIRS.

En el resultado de estos índices se encuentra perfeccionada la discriminación entre el suelo y la vegetación reduciendo el efecto del relieve en la caracterización espectral de las diferentes cubiertas. Los valores bajos de los índices de vegetación se refieren a vegetación poco vigorosa, mientras que los valores altos indican vegetación muy vigorosa.

Al hablar de índices nos estamos refiriendo a un conjunto de operaciones algebraicas efectuadas sobre los valores numéricos de los píxeles, usando dos o más bandas pertenecientes a la misma escena. En la actualidad, existen múltiples índices de vegetación para determinar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación. La elección del más adecuado para un estudio concreto es una cuestión sensible en la que influyen varios de factores.

En nuestro caso, el estudio se centra en masas forestales arboladas, las cuales tienen como característica común presentar un alto contenido en

biomasa. Un índice que responde muy bien en estas condiciones es el conocido como EVI (Enhanced Vegetation Index). Este índice es similar al NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) pero con ciertas mejoras: reducción de los efectos adversos por factores ambientales como son las condiciones atmosféricas y el suelo, sin tener en cuenta el efecto topográfico y optimizando la señal de la vegetación con sensibilidad para altas densidades de biomasa, lográndose con esto separar la señal proveniente de la vegetación y de la influencia atmosférica (USGS, 2020). El índice EVI viene definido por la siguiente expresión algebraica:

$$G \cdot \frac{NIR - RED}{NIR + C_1 \cdot RED - C_2 \cdot BLUE + L}$$

Donde:

- G: Factor de ganancia, que toma como valor 2,5 (EOS, 2020).
- NIR: Banda 5.
- RED: Banda 4.
- C1 y C2: Coeficientes dependientes de condiciones atmosféricas que toma como valor 6 y 7,5 respectivamente (EOS, 2020).
- BLUE: Banda 2.
- L: Corrector del efecto suelo que toma como valor 1 (EOS, 2020).

La expresión final queda por tanto así:

$$2,5 \cdot \frac{NIR - RED}{NIR + 6 \cdot RED - 7,5 \cdot BLUE + 1}$$

Obtenidos los índices EVI de cada uno de los tres años de estudio, para cuantificar la variación experimentada por este índice, se procede a realizar la diferencia entre el índice EVI más actual y el más antiguo. Se generan así, como resultado (Figura 4), tres nuevos rásteres (evolución EVI 2018-2019, evolución EVI 2019-2020 y evolución EVI 2018-2020) que se reclasifica para valores negativos y positivos, correspondiendo los valores negativos a zonas donde el índice EVI ha disminuido y los positivos donde ha aumentado.

Se realiza entonces una zonificación de los montes que en su mayor superficie presentan una reducción

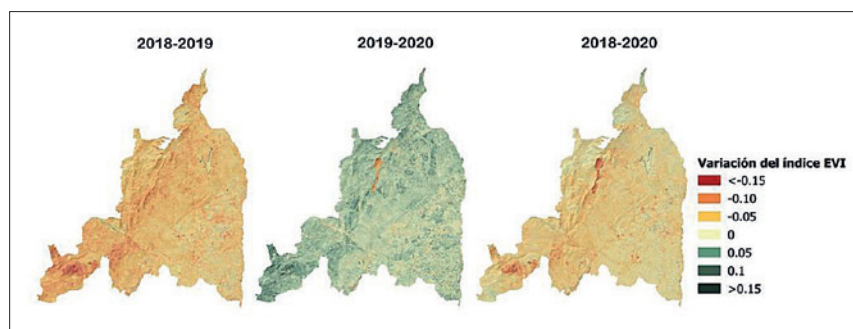


Figura 4. Variación del índice EVI entre 2018-2019, 2019-2020 y 2018-2020

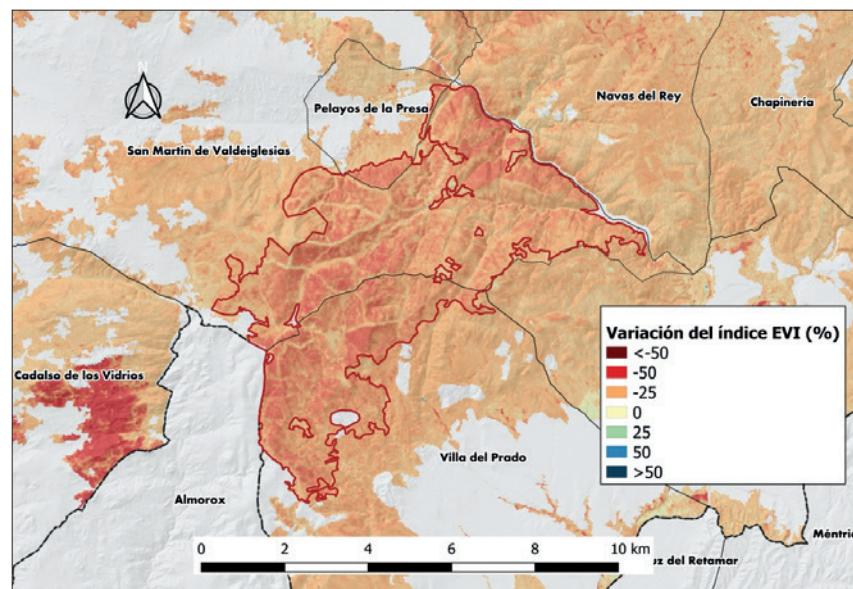


Figura 5. Zonificación según variación EVI 2018-2019

del índice EVI superior o igual al 25% entre los años 2018 y 2019. De cada zona, se obtiene su superficie, la reducción media del índice EVI y las masas forestales que lo componen cruzándolo con el Mapa Vegetal Continuo de la Comunidad de Madrid. Un ejemplo de esa zonificación se presenta en la figura 5. Posteriormente se estudia su evolución entre 2019 y 2020 para comprobar si existe recuperación.

Además, se comparan los valores del índice EVI entre 2018 y 2020 con el fin de determinar si la recuperación del último año llega a compensar la pérdida de vitalidad sufrida en 2019.

RESULTADOS

El índice de vegetación EVI para la zona de estudio revela una pérdida del vigor de la vegetación en 2019 con respecto a 2018. Así pues, el valor medio obtenido para este valor en 2018 es de 0,2868, mientras que para 2019 es de 0,2313. Si reducimos el ámbito

de estudio a las masas forestales arboladas de la zona, gracias a aplicar la máscara del Mapa vegetal Continuo de la comunidad, la diferencia se incrementa, obteniéndose un valor medio del índice EVI para 2018 de 0,3079 y para 2019 de 0,2482. En 2020, tanto para la zona de estudio como reduciéndolo a las zonas arboladas, se observa un mayor valor de este índice con respecto a 2019, pero sin llegar a las cifras alcanzadas en 2018.

Los polígonos obtenidos de la vectorización de zonas correspondientes a masas forestales que tuvieron una reducción del índice EVI igual o superior al 25% entre 2018 y 2019 muestran de forma general una mejoría de este índice en 2020. No obstante, los valores alcanzados en el último año son inferiores a los de 2018, lo que se interpreta como un empeoramiento del estado de vitalidad de estas masas con respecto al primer año de referencia.

	EVI 2018	EVI 2019	EVI 2020	DIFERENCIA (2019-2018)	DIFERENCIA (2020-2019)	DIFERENCIA (2020-2018)
Zona de estudio	0,2868	0,2313	0,2527	-0,0555	0,0214	-0,0341
Masas forestales arboladas de la zona de estudio	0,3079	0,2482	0,2716	-0,0597	0,0234	-0,0363

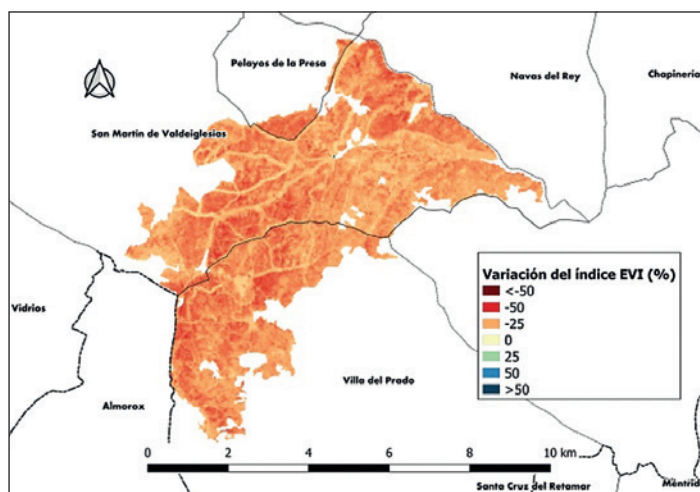


Figura 6. Variación del EVI 2018-2019 en Zona 1

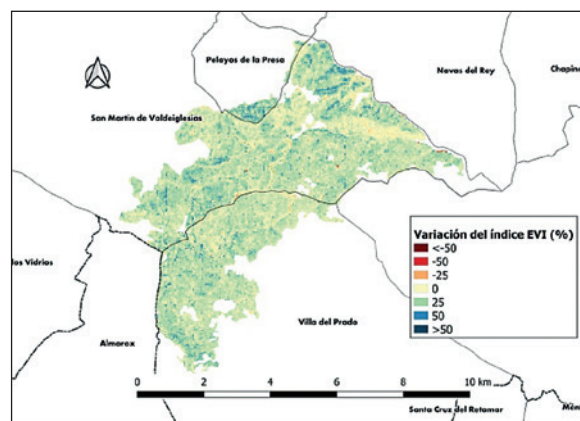


Figura 7. Variación del EVI 2019-2020 en Zona 1

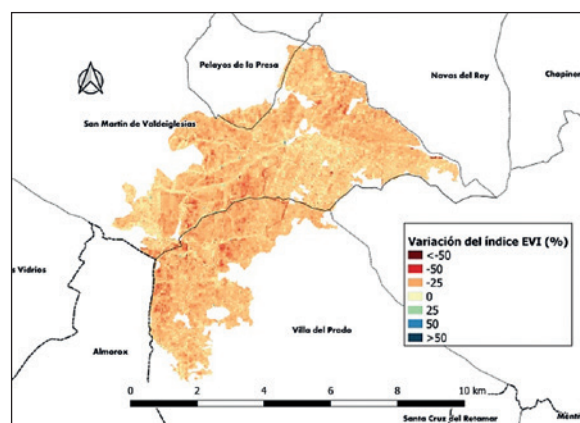


Figura 8. Variación del EVI 2018-2020 en Zona 1

El índice de vegetación EVI para la zona de estudio revela una pérdida del vigor de la vegetación en 2019 con respecto a 2018

Un ejemplo de ello es el área observada en el polígono digitalizado (zona 1) entre los términos municipales de San Martín de Valdeiglesias, Pelayos de la Presa y Villa del Prado. Incluye gran parte del monte conocido como “Navapozas, Fuenfría, Valdeyerno y Valcaliente”, así como la totalidad del conocido como “Cuartel del Norte” (Figuras 6, 7 y 8). La zona afectada cuenta con 3.664,85 ha de superficie, pobladas en su mayoría con encinares y pinares de pino piñonero, en algunas zonas formando masas mixtas de ambas especies junto con pino resinero.

ZONA 1: Navapozas, Fuenfría, Valdeyerno y Valcaliente, Cuartel del Norte			
Superficie (ha)	EVI medio 2018	EVI medio 2019	EVI medio 2020
3.664,85	0,3412	0,2432	0,2811

CONCLUSIONES

Gracias a la teledetección, se demuestra que la zona de estudio ha experimentado una significativa reducción de la actividad fotosintética entre los años 2018 y 2019 para recuperarse parcialmente en 2020, aunque sin llegar a alcanzar los niveles de actividad iniciales. Por lo tanto, la masa forestal allí instalada ha perdido vitalidad en ese periodo de tiempo y hasta la fecha de estudio.

El tratamiento y posterior análisis de imágenes de satélite multiespectrales se revela como una herramienta

muy eficaz para identificar procesos de estrés o de disminución de la actividad fotosintética en las masas forestales.

Esta tecnología permite llevar a cabo estudios de pérdida de vigor de la vegetación a gran escala (Cheng, 2016), con un evidente ahorro de recursos, pues no requiere el desplazamiento de técnicos expertos por toda la zona afectada para describir de visu el estado de salud de dichas áreas. De igual manera, permite identificar el debilitamiento de aquellas masas que se encuentran en zonas de difícil

acceso que, de otro modo, tendrían altas probabilidades de ser excluidas del estudio.

Gracias a la visión y posterior tratamiento que ofrecen las imágenes multiespectrales se puede priorizar sobre aquellas áreas que requieren una mayor atención y seguimiento por presentar una pérdida de actividad fotosintética más acusada; es decir: centrar los esfuerzos en las áreas más afectadas o establecer prioridades de actuación según los grados identificados. Además, la respuesta de la vegetación



a una perturbación también puede ser captada por las imágenes multiespectrales antes incluso de que la vegetación empiecen a mostrar síntomas visibles (Stone, 2017), lo que permite datar en el tiempo el comienzo del decaimiento con mayor precisión.

La frecuencia de pasada (con captura de información) de una misma

zona por parte de los satélites facilita la descarga de imágenes del área de estudio con una regularidad tal que se pueden llevar a cabo análisis multitemporales con 16 días de diferencia (Landsat 8), y de hasta 5 días con los datos proporcionados por Sentinel 2. Esto es de gran utilidad para estudiar la evolución de masas con distinto

intervalo temporal, siendo de especial interés para estudios fenológicos o para analizar cómo evolucionan dichas superficies arboladas tras perturbaciones producidas por eventos tales como incendios, inundaciones, vendavales, nieve o explosiones poblacionales de insectos defoliadores y otras plagas o enfermedades.

Por otro lado, mediante el empleo conjunto de software de sistemas de información geográfica con imágenes multiespectrales, es posible llevar a cabo la digitalización y planimetría de las áreas con menor actividad fotosintética. El cruce de este resultado con otras capas geográficas, como pueden ser las de orientación, pendiente, suelos o de temperatura en superficie, usando en este caso la banda 10 térmica de Landsat 8 (USGS, 2019), permite la realización de análisis multivariantes de gran interés, que aportan mucha más información acerca de la caracterización de las superficies afectadas, ayudando al conocimiento de patrones de comportamiento en el caso, por ejemplo, de afecciones por enfermedades y plagas forestales.

No obstante, el empleo de imágenes multiespectrales para estudios avanzados de debilitamiento causado por la acción de agentes



patógenos presenta ciertas limitaciones. Los índices de vegetación obtenidos a partir de imágenes multiespectrales no aportan información sobre el agente nocivo causante del decaimiento, por lo que, si bien reduce sensiblemente el trabajo de campo, no exime de visitas al monte para determinar la causa del deterioro observado, en caso de no tener la certeza del origen.

A pesar de ello, el uso de la teledetección para analizar el estado de vitalidad de las masas forestales aporta evidentes ventajas, siendo una herramienta que cuenta cada vez con mayor implementación en estudios de sanidad vegetal, tanto en entornos agrícolas como forestales.

AGRADECIMIENTOS

A Francisco Javier Blasco Fernández. Responsable de la Sección de Defensa Fitosanitaria de la Subdirección General de Recursos Naturales. Dirección General de Recursos Naturales y Sostenibilidad. Consejería de Medio Ambiente, Ordenación del Territorio y Sostenibilidad.

BIBLIOGRAFÍA

- AEMET. 2020. Resúmenes estacionales climáticos. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/vigilancia_clima/resumenes?w=0&datos=1 (1.).
- ALIEF. 2019. *Informe de resultados sobre la vitalidad del arbolado a nivel nacional. Tomo II. Red Integrada de Seguimiento del Estado de los Montes*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- Allué JL. 1990. *Atlas fitoclimático de España*. INIA-MAPA, Madrid.
- Chavez PS. 1988. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction for multispectral data. *Remote Sens. Environ.* 24: 459–479.
- Cheng G, Meentemeyer R. 2016. Remote sensing of forest damage by diseases and insects. En: Weng, Q. (Ed.) *Remote sensing for sustainability*. CRC Press.
- EOS. 2013. Land Viewer. Satellites. Landsat 8. En: *Earth Observing Systems*. <https://eos.com/es/landsat-8/> (1.2021).
- EOS. 2020. 6 índices (no NDVI) para un mejor análisis del campo. *Earth Observing Systems* <https://eos.com/es/blog/indices-de-vegetacion/> (1.2021).
- IGN. 2018. Teledetección. Centro Nacional de Información Geográfica. <https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/OBS-Teledeteccion.pdf> (11.2020).
- Sancho EF. 2010. El estudio de los índices de vegetación como base para conocer las relaciones entre la vegetación y el clima. En: Ojeda J, Pita MF, Vallejo I. (Eds.) *Tecnologías de la información geográfica: la información geográfica al servicio de los ciudadanos*, pp. 1095–1108. Universidad de Sevilla.
- Stone C, Mohammed C. 2017. Application of remote sensing technologies for assessing planted forest damaged by insect pest and fungal pathogens: A review. *Curr. For. Rep.* 3(2): 75–92.
- USGS. 2019. Landsat 8 (L8). Data users handbook. Version 5.0.
- USGS. 2020. Landsat surface reflectance-derived spectral indices. Landsat enhanced vegetation index. https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-enhanced-vegetation-index?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con (1.2021).
- Wulder MA, White NC, Coops S et al. 2009. Remote sensing for studies of vegetation condition: theory and application. En: Warner TA, Nellis MD, Foody GM (Eds.) *The SAGE handbook of remote sensing*, pp. 357–367. SAGE Publications, London.