

Etxebeste, I.; Blazquez Casado, Á.; Remeses, T.; Agullo, J. Declive de los "Pinos Padre" de *Pinus canariensis* en la vertiente sur del Teide: Análisis basado en LiDAR multitemporal y estrés hidro-climático

Declive de los "Pinos Padre" de *Pinus canariensis* en la vertiente sur del Teide: Análisis basado en LiDAR multitemporal y estrés hidro-climático

Etxebeste, Iñaki¹ **Blazquez Casado, Ángela**¹ **Remeses, Tomas**² **Agullo, Juan**²

¹ Cesefor, España

² Cabildo de Tenerife, España

ORCID: Etxebeste [0000-0002-9295-878X](https://orcid.org/0000-0002-9295-878X) Blazquez Casado [0000-0003-2611-9176](https://orcid.org/0000-0003-2611-9176)

Correspondencia: inaki.etxebeste@cesefor.com angela.blazquez@cesefor.com tomasr@tenerife.es JAgullo@tenerife.es

RESUMEN

Este estudio evalúa el estado fitosanitario y estructural de los ejemplares del pino canario conocidos como "Pinos padre" (*Pinus canariensis*) en la vertiente sur del Teide, ejemplares centenarios de alto valor ecológico. Se empleó una comparativa multitemporal de nubes de puntos LiDAR ALS de 2009 (PNOA1), 2012, 2014, 2019 y 2023 (PNOA3). La segmentación de individuos se realizó mediante el algoritmo Dalponte, seleccionado por su alta fiabilidad en rodales complejos. Los resultados indican un declive severo de la muestra, con pérdidas de área de copa y un aumento de la mortalidad. Se identificó una correlación crítica entre este deterioro, valores negativos del índice SPEI-12 y la recurrencia de incendios forestales en 2018 y 2021.

Palabras clave: *Pinus canariensis*, LiDAR ALS, estrés hídrico, Pinos Padre, Teide

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 18 febrero 2026

Declive de los "Pinos Padre" de *Pinus canariensis* en la vertiente sur del Teide: Análisis basado en LiDAR multitemporal y estrés hidro-climático

Etxebeste, Iñaki ⁽¹⁾, Blazquez Casado, Ángela ⁽¹⁾, Remeses, Tomas ⁽²⁾, Agullo, Juan ⁽²⁾

⁽¹⁾ Cesefor, España.

 0000-0002-9295-878X, inaki.etxebeste@cesefor.com ;  0000-0003-2611-9176, angela.blazquez@cesefor.com.

⁽²⁾ Cabildo de Tenerife, España.

tomasr@tenerife.es ; jagullo@tenerife.es.

Resumen: Este estudio evalúa el estado fitosanitario y estructural de los ejemplares del pino canario conocidos como "Pinos padre" (*Pinus canariensis*) en la vertiente sur del Teide, ejemplares centenarios de alto valor ecológico. Se empleó una comparativa multitemporal de nubes de puntos LiDAR ALS de 2009 (PNOA1), 2012, 2014, 2019 y 2023 (PNOA3). La segmentación de individuos se realizó mediante el algoritmo Dalponte, seleccionado por su alta fiabilidad en rodales complejos. Los resultados indican un declive severo de la muestra, con pérdidas de área de copa y un aumento de la mortalidad. Se identificó una correlación crítica entre este deterioro, valores negativos del índice SPEI-12 y la recurrencia de incendios forestales en 2018 y 2021.

Palabras clave: *Pinus canariensis*, LiDAR ALS, estrés hídrico, Pinos padre, Teide

Decline of the 'Pinos padre' (Pinus canariensis) on the southern slope of Mount Teide: Analysis based on multi-temporal LiDAR and hydro-climatic stress

Abstract: This study evaluates the phytosanitary and structural status of Canary Island pine (*Pinus canariensis*) specimens known as "Pinos padre" on the southern slopes of Mount Teide. These centuries-old trees are of high ecological value. A multi-temporal comparison of ALS LiDAR point clouds from 2009 (PNOA1), 2012, 2014, 2019, and 2023 (PNOA3) was used. Individual segmentation was performed using the Dalponte algorithm, selected for its high reliability in complex stands. The results indicate a severe decline in the sample, with losses in crown area and increased mortality. A critical correlation was identified between this deterioration, drought related SPEI-12 index, and the recurrence of forest fires in 2018 and 2021.

Keywords: *Pinus canariensis*, LiDAR ALS, water stress, Pinos padre, Teide

1. INTRODUCCIÓN

El pino canario (*Pinus canariensis*) representa la piedra angular de la biodiversidad macaronésica, actuando como un regulador hidrológico crítico y sumidero de carbono en ecosistemas insulares volcánicos (Climent *et al.*, 2004). En el actual contexto del Antropoceno, la intensificación de las anomalías térmicas y el cambio en los regímenes de precipitación exigen un monitoreo preciso de su salud estructural. El pino canario constituye un paradigma de resiliencia ante perturbaciones estocásticas. Los "Pinos padre", ejemplares que pueden superar los 800 años de longevidad, representan un baluarte biológico cuya supervivencia depende de la formación de "tea" (duramen resinoso), caracterizada por una durabilidad excepcional con pérdidas de masa por ataque fúngico inferiores al 1%, frente al 25-38% de otras coníferas (Lopez *et al.*, 2016).

El crecimiento radial de *P. canariensis* está dictado por una compleja interacción entre factores climáticoets

locales y patrones de circulación de gran escala, específicamente la Oscilación del Atlántico Norte (NAO). El impacto de la NAO es particularmente dominante en la vertiente de sotavento, donde la fase de esta oscilación dicta la precipitación anual y, por ende, el crecimiento basimétrico (Rozas *et al.*, 2013). En contraste, la vertiente de barlovento se encuentra amortiguada por la influencia de los vientos alisios, aunque su crecimiento se ve limitado por una paradoja radiactiva: la nubosidad persistente reduce la radiación fotosintéticamente activa, limitando la asimilación de carbohidratos a pesar de la disponibilidad hídrica.

Sin embargo, el incremento de la aridez y el aumento del Déficit de Presión de Vapor (VPD) plantean un escenario crítico. La arquitectura hidráulica de la especie, aunque adaptada a condiciones xéricas mediante estrategias isohídricas, se enfrenta al agotamiento de sus márgenes de seguridad. En la vertiente sur de Tenerife, la sinergia entre sequías prolongadas y el daño térmico de incendios recientes amenaza la integridad de estos pinos relictos. El objetivo de este trabajo es cuantificar el

declive estructural de los “Pinos Padre” mediante métricas LiDAR multitemporales e imágenes de satélite y validar dicho deterioro mediante indicadores ecofisiológicos.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio y datos LiDAR

El área de estudio se localiza en la vertiente sur del Teide (Tenerife, Islas Canarias), en el entorno de los pinares de *Pinus canariensis* situados a aproximadamente 1.500 m de altitud en el término municipal de Arico. La zona alberga individuos relictos denominados "Pinos padre", con alturas próximas a los 40 m y edades estimadas en torno a los 700 años, afectados por los incendios de 2018 y 2021.

Se utilizaron datos ALS correspondientes a cinco vuelos: 2009 (2,3 pts/m²), 2012 (1,9 pts/m²), 2014 (1,7 pts/m²), 2019 (2,1 pts/m²) y 2023 (9,9 pts/m²), proporcionados por el Cabildo de Tenerife. Los datos se homogeneizaron al sistema ETRS89 / UTM zona 28N (EPSG:25828). Se verificó la clasificación del suelo, la densidad de puntos y la disponibilidad de atributos espectrales (intensidad, RGB y NIR) en cada época; la banda NIR únicamente estuvo disponible en el vuelo de 2023.

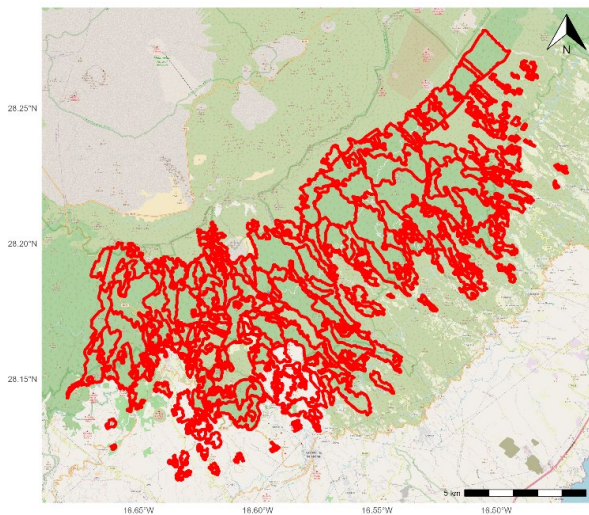


Figura 1. Área de estudio.

2.2. Procesamiento LiDAR y detección individual de árboles

El procesamiento se realizó en R (v 4.5.2, R Core Team, 2025) mediante el paquete lidR (Roussel *et al.*, 2020). Para cada una de las cinco épocas se siguió la misma cadena de análisis. En primer lugar, se generó un modelo digital del terreno (MDT) a 0,5 m de resolución mediante interpolación TIN. A continuación, se normalizaron las alturas respecto al MDT. Sobre la nube normalizada se generó un modelo digital de copas (CHM) a 0,5 m con el algoritmo pit-free (Khosravipour *et al.*, 2014), aplicando un filtro de media 3×3.

La detección de copas individuales se realizó en dos etapas. Primero se localizaron los ápices de los árboles mediante un filtro de máximos locales (LMF) con una función de ventana variable basada en la alometría de *P.*

canariensis (diámetro de copa $\approx 0,35 \times$ altura, acotado entre 3 y 15 m), estableciendo una altura mínima de detección de 10 m. Seguidamente se delimitaron las copas mediante segmentación por cuenca controlada por marcadores según el algoritmo de Dalponte y Coomes (2016). Se retuvieron únicamente los árboles con una superficie de copa superior a 100 m².

2.3. Métricas estructurales y seguimiento multitemporal

Para cada árbol detectado se calcularon métricas estructurales a partir de la nube de puntos contenida en su polígono de copa: altura máxima, media y percentiles (P25, P50, P75, P95), coeficiente de variación de la altura, cobertura de dosel (proporción de retornos por encima de 2 m), ratio de relieve de la cubierta (CRR) e intensidad media cuando estaba disponible. Las estadísticas zonales del CHM por copa se obtuvieron con el paquete exactextractr.

El seguimiento multitemporal se basó en el emparejamiento espacial de árboles entre épocas, utilizando la época de 2009 como referencia. Se estableció una distancia máxima de emparejamiento de 5 m entre centroides de copa. Se identificaron los árboles persistentes, presentes en las cinco épocas, y se construyó una serie temporal de métricas por individuo. A partir de las diferencias se calcularon indicadores de cambio para tres periodos clave: pre-incendio (2009–2014), primer incendio (2014–2019, que captura el evento de 2018) y segundo incendio (2019–2023, que captura el de 2021). Los árboles se clasificaron en cuatro categorías de estado sanitario en función del cambio porcentual acumulado en superficie de copa y altura: declive severo, descenso de 50% o más; moderado; descenso entre 25 y 50%, estable: descenso entre el 10 y el 25% y mejora, en el resto de los casos.

2.4. Estimación índice NDVI a partir del LiDAR de 2023

El vuelo ALS de 2023 incorporó un canal NIR que permitió calcular el NDVI a nivel de copa individual a partir de las intensidades CIR registradas por el propio sensor. Para cada segmento de copa identificado mediante la segmentación individual de árboles, se extrajo el valor medio de NDVI como indicador del vigor fotosintético. Este índice se empleó para caracterizar el estado fisiológico de los candidatos a "Pinos padre" en el momento más reciente del análisis, complementando las métricas estructurales derivadas de la nube de puntos.

2.5. Datos climáticos locales

Se recopilaron series mensuales de temperatura media, precipitación acumulada y déficit de presión de vapor medio diario FAO-56 (VPD) para el periodo 2003–2023 a partir de la red de estaciones agroclimáticas del Cabildo de Tenerife (AgroCabildo). Se seleccionaron las estaciones más próximas al área de estudio, los registros anómalos se eliminaron y los vacíos se dejaron como NA. Se calcularon indicadores de estrés hídrico acumulado: meses consecutivos con precipitación inferior a 20 mm, VPD medio estival (junio–septiembre) y anomalías térmicas respecto al periodo de referencia 2003–2012.

Se evaluaron tendencias mediante regresión lineal y se representaron como series temporales superpuestas con los eventos de incendio, contextualizando la respuesta fisiológica observada en los datos LiDAR (Allen *et al.*, 2010).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Contexto climático: dos décadas de estrés hídrico

Las series del índice SPEI-12 calculadas para las estaciones de la vertiente sur del Teide muestran una tendencia sostenida hacia condiciones de sequía desde mediados de la década de 2010 (Fig. 2). Todas las estaciones analizadas (Abejarucos, Arico, Izaña, Granadilla, Chimiche, El Escobonal, Icod y Tegueste-Anaga) presentan periodos prolongados con SPEI-12 negativo, siendo especialmente acusados entre 2015 y 2023. Los episodios de sequía más intensos (SPEI-12 < -1,5) coinciden temporalmente con los años previos a los incendios de 2018 y 2021, lo que sugiere una predisposición fisiológica del arbolado al estrés antes de la perturbación por fuego. Esta sequía crónica es coherente con las tendencias de aridificación descritas para Canarias y la cuenca mediterránea (Vicente-Serrano *et al.*, 2010).

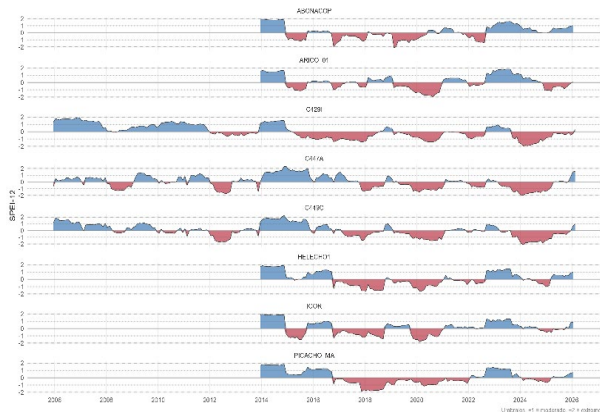


Figura 2. Índice SPEI-12 calculado a partir de estaciones cercanas al área de estudio.

3.2. Detección individual de árboles y estructura del pinar

El análisis LiDAR de una tesela representativa de 99,5 ha en la vertiente sur (rango altitudinal 1.420 –1.798 m s.n.m.) permitió detectar 6.803 árboles con altura superior a 10 m, de los cuales 154 cumplieron los criterios de árbol significativo (>10 m de altura y >20 m² de copa) (Tabla 1). La densidad de puntos del vuelo de 2023 fue de 9,9 pts/m², suficiente para la detección individual a nivel de copa en un pinar abierto como el de *P. canariensis*.

Tabla 1. Resumen del análisis de una tesela de ejemplo.

Métrica	Valor
Superficie de la tesela (ha)	99,5
Densidad de puntos (pts/m ²)	2
Rango altitudinal (m s.n.m.)	1.420 – 1.798
Árboles detectados (>10 m)	6.803
Árboles significativos (>10 m, >20 m ²)	154
Candidatos a "Pinos padre" (≥25 m, ≥100 m ²)	98
Altura media (m)	26,5
Altura máxima (m)	37,9
Superficie media de copa (m ²)	168,3
Superficie máxima de copa (m ²)	208,4

Se identificaron 98 candidatos a "Pinos padre" (altura ≥25 m y superficie de copa ≥100 m²). Estos individuos presentaron una altura media de 26,5 m y una altura máxima de 37,9 m, con superficies medias y máximas de copa de 168,3 m² y 208,4 m², respectivamente. La distribución espacial de estos árboles (Fig. 3) revela una concentración en la franja altitudinal entre 1.450 y 1.650 m, coincidiendo con la zona de pinar maduro descrita históricamente en esta vertiente.

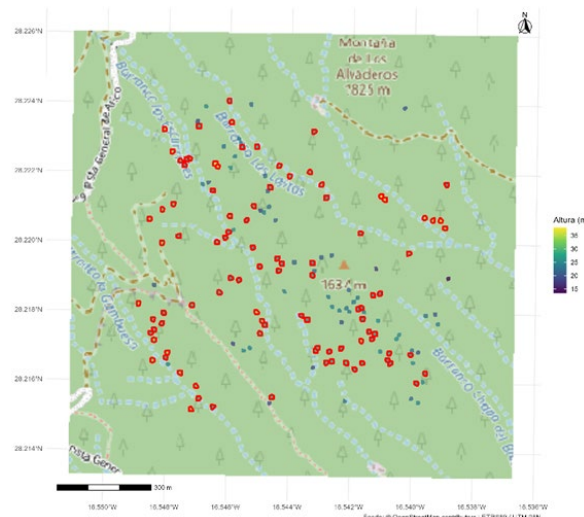


Figura 3. Copas de árboles detectados, selección "Pinos padre" en rojo, y las alturas de la copa.

3.3. Estado fisiológico a partir del NDVI LIDAR

El vuelo de 2023, equipado con banda NIR, permitió calcular el NDVI medio por copa a partir de la información CIR (color infrarrojo) del propio LiDAR (Fig. 4). Los valores de NDVI observados en los candidatos a "Pinos padre" fueron notablemente bajos, con una media de 0,12 y valores mínimos próximos a 0,05 en varios individuos. Estos valores están muy por debajo de los rangos típicos para *P. canariensis* en buen estado vegetativo (NDVI > 0,4), e indican una pérdida severa de verdor y actividad fotosintética. Los árboles con NDVI más bajo se concentraron en la zona central de la tesela, coincidiendo con las áreas más afectadas por los incendios recientes y con las condiciones de sequía más persistentes según el SPEI-12.

La combinación de valores bajos de NDVI con copas de gran extensión, pero estructura degradada (CRR bajo, elevado coeficiente de variación de la altura) apunta a un proceso de defoliación progresiva en individuos que aún mantienen parte de su esqueleto de ramas pero han perdido gran parte de su follaje funcional. Este patrón es compatible con la mortalidad inducida por sequía descrita en coníferas mediterráneas, donde el colapso hidráulico precede a la pérdida total de copa (McDowell *et al.*, 2008).

4. CONCLUSIONES

Los resultados confirman que los "Pinos padre" de la vertiente sur del Teide se encuentran en un estado de declive avanzado, condicionado por más de dos décadas de sequía persistente y agravado por la recurrencia de incendios. La detección de 98 candidatos en una sola tesela sugiere que la población de árboles excepcionales es más amplia de lo recogido en este trabajo, pero también que su exposición al estrés es generalizada. El bajo NDVI generalizado indica que la capacidad de rebrote epicórmico, habitualmente eficaz en *P. canariensis*, puede ser insuficiente cuando la sequía crónica ha comprometido las reservas de carbohidratos del árbol. Estos hallazgos refuerzan la necesidad de implementar estrategias de conservación específicas para este material genético singular.

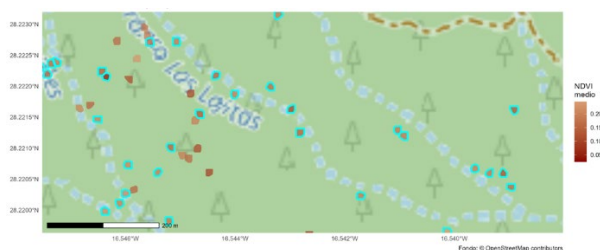


Figura 4. NDVI medio por copas de árboles detectados y sus alturas.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Cabildo de Tenerife y GRAFCAN por la provisión de datos LiDAR, a la AEMET por la provisión de datos meteorológicos fundamentales para este análisis.

6. REFERENCIAS

- Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D. D., Hogg, E. H., Gonzalez, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., Lim, J.-H., Allard, G., Running, S. W., Semerci, A., & Cobb, N. (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259(4), 660–684. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.001>
- Appel, M., & Pebesma, E. (2019). On-demand processing of data cubes from satellite image collections with the gdalcubes library. *Data*, 4(3), 92.
- Climent, J., Tapias, R., Pardos, J. A., & Gil, L. (2004). Fire adaptations in the Canary Islands pine (*Pinus canariensis*). *Plant Ecology*, 171, 185–196.
- Dalponte, M., & Coomes, D. A. (2016). Tree-centric mapping of forest carbon density from airborne laser scanning and hyperspectral data. *Methods in Ecology and Evolution*, 7(10), 1236–1245.
- Khosravipour, A., Skidmore, A. K., Isenburg, M., Wang, T., & Hussin, Y. A. (2014). Generating pit-free canopy height models from airborne lidar. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 80(9), 863–872. <https://doi.org/10.14358/PERS.80.9.863>
- Lopez, R., Cano, F. J., Choat, B., Cochard, H., & Gil, L. (2016). Plasticity in Vulnerability to Cavitation of *Pinus canariensis* Occurs Only at the Driest End of an Aridity Gradient. *Front Plant Sci*, 7, 769. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00769>
- McDowell, N., Pockman, W. T., Allen, C. D., Breshears, D. D., Cobb, N., Kolb, T., Plaut, J., Sperry, J., West, A., Williams, D. G., & Yepez, E. A. (2008). Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought? *New Phytologist*, 178(4), 719–739. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02436.x>
- R Core Team. (2025). R: A Language and Environment for Statistical Computing. In R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Roussel, J.-R., Auty, D., Coops, N. C., Tompalski, P., Goodbody, T. R. H., Meador, A. S., Bourdon, J.-F., de Boissieu, F., & Achim, A. (2020). lidR: An R package for analysis of Airborne Laser Scanning (ALS) data. *Remote Sensing of Environment*, 251, 112061. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112061>
- Rozas, V., García-González, I., Pérez-de-Lis, G., & Arévalo, J. R. (2013). Local and large-scale climatic factors controlling tree-ring growth of *Pinus canariensis* on an oceanic island. *Climate Research*, 56, 197–207.
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>