



9CFE-2043

Actas del Noveno Congreso Forestal Español
Edita: **Sociedad Española de Ciencias Forestales. 2025.**
ISBN: 978-84-941695-7-1

Organiza





En primera línea de lava: lecciones sobre el pino canario aprendidas en dos erupciones de La Palma.

MIRANDA, J.C. (1), GUERRERO-CAMPOS, M. (2,3,4), DOMÍNGUEZ-FLORES, T. (5), MEDINA, F.M. (6), NOGALES, M. (4), MARRERO, P. (2), SALOMÓN, R.L. (1), LÓPEZ, R. (1), RODRÍGUEZ-CALCERRADA, J. (1), GIL, L. (7), CHANO, V. (5)

(1) Grupo de Investigación FORESCENT, Departamento de Sistemas y Recursos Naturales, Universidad Politécnica de Madrid, 28040 Madrid.

(2) Gesplan S.A. 38005 Santa Cruz de Tenerife.

(3) Universidad de Málaga, 29016 Málaga

(4) Instituto de Productos Naturales y Agrobiología

(5) University of Göttingen, 37073 Göttingen

(6) Cabildo Insular de La Palma, 38700 Santa Cruz de La Palma

(7) ETSIMFMN Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes Forestal y del Medio Natural. Universidad Politécnica de Madrid, 28040 Madrid.

Resumen

El pino canario (*Pinus canariensis*) ha convivido con el volcanismo en las Islas Canarias desde hace al menos 13 millones de años. Las erupciones suponen un compendio de agentes abióticos que, a su vez, generan una diversidad de daños a la vegetación, entre otros: flujos de lava (mortalidad); emisiones de piroclastos y deposición de cenizas (defoliación, daños mecánicos y enterramiento); emisiones de gases y metales pesados (daños fisiológicos y por corrosión). Además, la intensidad de los daños por volcanismo varían en cada evento eruptivo. El pino canario posee varias características que atenúan dichos daños: talla alta, dimorfismo foliar, conos serótinicos, corteza gruesa, raíz profunda y el rebrote epicórmico. En el presente trabajo se comparan los daños y las respuestas de los pinares afectados por las erupciones históricas de Hoyo Negro 1949 y Tajogaite 2021. Mediciones fisiológicas y anatómicas *in situ*, así como análisis de vuelos fotogramétricos e imágenes satelitales de ambos pinares, junto con experimentos fisiológicos *ex situ*, nos han permitido comprender las respuestas de esta especie a grandes perturbaciones, así como evaluar la distinta evolución post-volcánica que han tenido los pinares afectados por dos erupciones distanciadas 4 km y 72 años.

Palabras clave

Adaptaciones, agentes abióticos, grandes perturbaciones, *Pinus canariensis*, volcanismo.

1. Introducción

Las perturbaciones son los principales agentes modeladores de los ecosistemas, incluidos los forestales (Dale et al. 2001; Grime 1977; Pan et al. 2013; Swanson et al. 2011). Estas alteran la estructura forestal y sus procesos funcionales, como la



composición de especies, las estructuras de edad de la masa forestal, la cantidad de biomasa y los procesos biogeoquímicos (Dale et al. 2001). Como resultado, se genera una configuración dinámica en los bosques de todo el mundo en términos de sucesiones naturales y desarrollo estructural (Swanson et al. 2011).

Existen diversas perturbaciones abióticas naturales, como pueden ser tornados, huracanes, inundaciones, avalanchas, deslizamientos de tierra, incendios, volcanes, terremotos y meteoritos. Cada tipo de perturbación presenta rangos de duración, periodo de retorno, y forma y tamaño del área afectada diferentes (Foster et al. 1998). Entre ellas, las erupciones volcánicas son una de las más complejas. Al no depender del clima, carecen de estacionalidad y, en general, no tienen una duración ni un periodo de retorno predecibles. Las erupciones son una combinación de agentes dañinos (flujos de lava, explosiones, emisiones de piroclastos, gases y sólidos tóxicos, altas temperaturas), que generan áreas afectadas con formas muy diversas (desde lineales hasta isodiamétricas y en mosaico), con una intensidad de afección variable en cada zona, no necesariamente decreciente con la distancia al foco de energía, pudiendo afectar incluso a todo el globo (Briffa et al. 1998).

A pesar de la heterogeneidad espacial y temporal de los daños, existen estrategias que permiten a las especies forestales adaptarse a entornos volcánicos. Las islas oceánicas, donde este tipo de perturbaciones han sido las principales modeladoras de los ecosistemas, constituyen un laboratorio natural para estudiar las respuestas de los árboles a las erupciones. En las Islas Canarias, el pino canario (*Pinus canariensis*) es la principal especie forestal (58.35%, IFN4), y actualmente se encuentra en las islas más jóvenes y con mayor frecuencia de actividad volcánica. Sin embargo, en el pasado tuvo una distribución paleogeográfica euroasiática (Kasaplıgil 1977; Klaus 1980; Morla et al. 2002).

El pino canario posee características que le han permitido adaptarse a los diversos tipos de daños causados por las erupciones. La principal es su capacidad de rebrote epicórmico a lo largo de toda su vida, lo que le permite restaurar la copa incluso si queda reducido a un tronco desramado y con heridas. Su gruesa corteza protege contra los impactos menores de piroclastos, y la duraminización de las heridas ayuda a cerrar las lesiones provocadas por impactos mayores. Su altura previene el enterramiento bajo los depósitos de cenizas volcánicas. El dimorfismo foliar, con acículas juveniles y de rebrote con yema de crecimiento libre, facilita su adaptación a los estadios de recuperación. Además de estas estrategias individuales de supervivencia, el pino canario también cuenta con mecanismos a nivel de especie, como los conos serótimos (banco de semillas aéreo) y los piñones con alas adnatas, que favorecen la dispersión, similares a los del pino macho “saltador de islas” (*Pinus caribaea*) (Climent et al. 2007).

El volcanismo reciente en Canarias se caracteriza por erupciones estrombolianas y, con frecuencia, freatomagmáticas. Estas erupciones tienen una emisión relativamente baja de material y baja intensidad, y están asociadas a la interacción del magma con los niveles freáticos de agua en las islas, lo que genera pulsos de presión y explosiones derivados no solo del magma, sino también de la



evaporación del agua. El archipiélago canario ha experimentado 16 erupciones históricas subaéreas, y La Palma ha sufrido la mitad de ellas. Las erupciones más recientes, las de Tajogaite en 2021 y las de 1949 (Hoyo Negro, Duraznero y Llano del Banco), ocurrieron en zonas de pinar sin causar una mortalidad masiva en toda la masa circundante, como sí sucedió en 1971 con el Teneguía.

Nuestro grupo estudió los daños y la recuperación de la erupción de Hoyo Negro en la década de 2010 a través de un proyecto de fin de carrera y una tesis doctoral, en los cuales se analizaron las adaptaciones del pino canario frente a los daños volcánicos (Miranda 2012; Miranda 2017). De las tres bocas abiertas durante la erupción de 1949, la de Hoyo Negro fue la que solo emitió piroclastos de diferentes tamaños, sin flujos de lava. La reciente erupción de Tajogaite, ubicada a solo 4 km del cráter de Hoyo Negro, nos permitió contrastar nuestras hipótesis sobre los efectos de la erupción en los árboles de Hoyo Negro en los primeros momentos tras cesar la actividad. Sin embargo, para nuestra sorpresa, las respuestas del pinar en esta ocasión fueron muy diferentes, debido a la heterogeneidad de las perturbaciones.

2. Objetivos

Los objetivos de este trabajo son tres:

1. hacer una revisión de los conocimientos adquiridos en los estudios de la masa de pinar afectada por la erupción de Hoyo Negro (1949),
2. aportar los primeros resultados obtenidos del estudio de los pies afectados por la erupción de Tajogaite (2021) y
3. hacer una comparación de las respuestas del pinar a ambas erupciones, que ayude a comprender mejor la ecología de esta especie y a entender el futuro que le espera a la masa de pinar por la erupción más reciente

3. Metodología

3.1 Especie y localización de estudio

Este trabajo se basa en estudios realizados sobre en el pino canario (*Pinus canariensis* C. Sm. ex DC. in Buch). El área de estudio abarca las zonas afectadas por dos erupciones volcánicas: la de Hoyo Negro en 1949 y la de Tajogaite en 2021.

El cráter de Hoyo Negro está ubicado en la dorsal de Cumbre Vieja (28° 34' 54.88" N, 17° 50' 20.02" W). Las parcelas de estudio (figura 1) se encuentran a una altitud de entre 1500 y 1931 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.). Las condiciones climáticas son relativamente secas, con una temperatura media anual de 12.7 °C y una precipitación media de 418.7 mm. El aporte de agua para la vegetación se ve incrementado por las precipitaciones horizontales originadas por las nieblas producidas por los vientos alisios. La mayor parte del suelo está compuesto por



estratos de diversas granulometrías de cenizas y piroclastos provenientes de las erupciones ocurridas durante el Holoceno (Carracedo et al. 2001). Las condiciones climáticas adversas y los daños causados por las erupciones recientes han originado un paisaje dominado por pinares claros de baja densidad y claros en las zonas con suelos más pobres, donde aparecen matorrales dispersos.

El cráter de Tajogaite se encuentra en la falda oeste de Cumbre Vieja (28° 36' 48.12" N, 17° 51' 58.67" W), a 4 km al NO del cráter de Hoyo Negro. Las parcelas de estudio abarcan una altitud de entre 650 y 1250 m.s.n.m. Las condiciones climáticas son similares a las de Hoyo Negro en las zonas más altas, pero la temperatura aumenta y la precipitación descende en las zonas de menor altitud, alcanzando los 21.8 °C y los 188 mm de precipitación. La ladera oeste queda a la sombra de los vientos alisios, por lo que la vegetación no se beneficia de las precipitaciones horizontales. Los suelos son similares a los de la zona de Hoyo Negro. Las masas de pinar se van aclarando y haciendo más dispersas a medida que se descende en altitud, debido a la aridificación del clima.

3.2 Estudios de Hoyo Negro

La mayor parte de lo referido a análisis de Hoyo Negro se tratan de una compilación de los estudios realizados en el pasado que nos ayudan a entender las respuestas de los individuos y la masa de pinar afectados por dicha erupción. En esta sección de materiales y métodos se indica la relación de los estudios en el orden en el que se abordan en las secciones posteriores.

Miranda et al. 2017 - El pino canario y las erupciones de cumbre vieja (1949, La Palma). Adaptación al volcanismo

Miranda et al. 2020 - Carbohydrate dynamics in a resprouting species after severe aboveground perturbations

Chano et al. 2015 - Proliferation of axial parenchymatic xylem cells is a key step in wound closure of girdled stems in *Pinus canariensis*.

Chano et al. 2017 - Transcriptomic analysis of wound xylem formation in *Pinus canariensis*.

Chano et al. 2023 - Differential gene expression analysis of the resprouting process in *Pinus canariensis* provides new insights into a rare trait in conifers.

Rodriguez et al. 2013 - Volcanic mercury in *Pinus canariensis*

Miranda et al. 2012 - El pino canario y las erupciones de cumbre vieja (1949, La Palma). Adaptación al volcanismo.

También se incluye un dato no publicado anteriormente: el conteo de árboles realizado en los vuelos fotogramétricos de 1963 y en las ortofotografías aéreas de 1983 y 2009. Estas imágenes fueron obtenidas del servicio de la empresa pública GRAFCAN (Cartográfica de Canarias S.L.). El conteo de árboles se llevó a cabo en el área cubierta por las cuatro imágenes del vuelo de 1963, que rodeaban el cráter de Hoyo Negro.





Figura 1: Localización de los cráteres de Tajogaite y Hoyo Negro, así como de las parcelas de estudio y los elementos geológicos principales.

3.3 Mediciones de campo y teledetección en Tajogaite

A partir del análisis de los datos recopilados y la experiencia previa del equipo de trabajo, se establecieron ocho parcelas de estudio en campo (figura 1). Estas parcelas seguían un gradiente de distancias al volcán, desde 100 hasta 2500 metros, que corresponden a las zonas con mayor frecuencia y volumen de elementos sólidos, generando mayores daños a medida que se reduce la distancia al cráter. El radio de 2500 metros se corresponde con la distancia en la que los depósitos de cenizas eran menores de 10 cm (Bonadonna et al. 2022).

En las parcelas de estudio, se anotaron los daños y la mortalidad observada en visitas repetidas cada seis meses durante los primeros dos años y medio tras la erupción. Además, se evaluaron varios parámetros fisiológicos para estudiar el estado del pinar en julio de 2023, dos años y medio después de la erupción. Para ello, se seleccionaron seis árboles por parcela para realizar una serie de mediciones que se indican a continuación. Las mediciones y muestras de acículas se tomaron de manera representativa de la copa, a una misma altura y orientación sur.

Conductancia estomática (gs): Se midió con un porómetro SC-1 Leaf Porometer (Meter Group, EE. UU.) en un grupo de acículas representativas de la copa del árbol.

SPAD: Se tomaron mediciones con un medidor de fotón único (SPAD 502 Plus, Minolta, Japón), que mide el verdor de las muestras como indicador relativo de la cantidad de clorofila en las hojas de los árboles.

Potencial hídrico en acículas (Ψ): Se midió el potencial hídrico de las hojas al mediodía. Las acículas se recogieron entre las 12:00 y las 15:00 y se almacenaron en bolsas zip junto con papel húmedo para evitar que se desecaran. Las bolsas se mantuvieron frías en una nevera de campo, y la medición se realizó con una cámara de presión de Scholander (PMS Instrument Company, EE. UU.).

Para realizar un monitoreo fisiológico continuo, se recurrió a datos obtenidos mediante teledetección, específicamente al índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés). El NDVI se calcula comparando las bandas espectrales reflejadas en el rojo visible (665 nm) y en el infrarrojo cercano (833 nm): $NDVI = (IRC - ROJO) / (IRC + ROJO)$. Se recopilieron datos de NDVI desde agosto de 2013 hasta diciembre de 2023, utilizando imágenes del satélite Landsat-8 a través de Google Earth Engine, con una máscara para eliminar las imágenes de meses con alta presencia de nubes. Las ocho parcelas inicialmente seleccionadas fueron las mismas utilizadas para el muestreo en campo.

4. Resultados

4.1 Cronología erupción 1949:

El evento volcánico de 1949 comenzó a las 8:30 del 24 de junio en Duraznero (800 m al sur de Hoyo Negro) con una débil actividad explosiva, precedida de terremotos. La erupción inicial produjo una columna de gases y ceniza que, a lo largo de los días, alcanzó los 6000 m. El 8 de julio se abrió una fisura en Llano del Banco (2.7 km al NNO de Hoyo Negro) que emitió lavas durante 19 días. El 12 de julio comenzó su actividad la boca abierta en Hoyo Negro, que finalizó junto con la de Duraznero el 30 de julio. La erupción de Hoyo Negro fue eminentemente freatomagmática, sin emisión de lavas, produciendo una columna eruptiva y expulsando abundantes cenizas y bombas, acompañada de seísmos y la apertura de grandes grietas, lo que aumentó el cráter. Hoyo Negro llegó a expulsar bombas de hasta 1 m de diámetro a más de 1 km.

4.2 Descripción de daños detectados en la masa de pinar de Hoyo Negro:

Tipología de daños según su causa:

Cenizas volcánicas: Las cenizas volcánicas fueron el agente eruptivo que mayor superficie afectó. El daño fue homogéneo, con un gradiente de intensidad que disminuyó con la distancia al cráter, dependiendo también de la dirección y velocidad de los vientos dominantes. Pudieron generar defoliación al interrumpir el intercambio gaseoso en las hojas, así como daños mecánicos por acumulación en ramas. El daño más significativo fue por enterramiento al acumularse en grandes cantidades (depósitos de varios metros). Esta deposición también aportó nuevos minerales al suelo, incluyendo metales pesados tóxicos como el mercurio. Además, los nuevos suelos de cenizas y piroclastos resultan fácilmente erosionables, redistribuyéndose las cenizas y aumentando el espesor de las zonas de acumulación, dificultando la instalación de nuevas plántulas en ambos casos.

Piroclastos: En Hoyo Negro, se encontraron bombas de hasta 1 m de diámetro a 1 km de distancia del cráter. A diferencia de las cenizas volcánicas, los daños no fueron homogéneos, pero la intensidad también disminuyó con la distancia al cráter. Se observaron daños mecánicos por impactos, que produjeron roturas de ramas, guías terminales y heridas en los troncos, e incluso rotura completa del tronco (figura 2).

Formación del cráter: El cráter de Hoyo Negro existía desde una erupción anterior. Los temblores y explosiones generaron el colapso de algunas zonas que probablemente enterraron al pinar en la pared oeste del cráter.



Figura 3: Fotografía de Martel San Gil días después de la erupción de Hoyo Negro; base de pino enterrada medio metro en Hoyo Negro; daños visibles de la erupción de 1969 en un pino; herida aún abierta en una de las secciones muestreadas en Hoyo Negro; árboles muertos y rebrotando tras la erupción de Tajogaite, pino dañado en el lateral de una colada de Tajogaite.

4.3 Principales resultados de la erupción de 1949:

Los primeros resultados sobre las respuestas del pino canario a los daños de la erupción de Hoyo Negro se obtuvieron mediante el análisis de secciones de tallo muestreadas en 5 individuos cerca del cráter en 2010 y 2013 (Miranda 2017). Las secciones se tomaron a distintas alturas, desde la base hasta el ápice. Cuatro de los árboles eran anteriores a la erupción (entre 1826 y 1930). La mitad de las secciones presentaba heridas por impactos de piroclastos. Aunque la mayoría de las heridas se habían cerrado, algunas grandes heridas en zonas basales y pequeñas cerca del ápice permanecían abiertas, con una capa profunda de duraminización.

El análisis dendrocronológico mostró un cese del crecimiento radial en los 4 árboles durante un mínimo de 3 años y un máximo de 17 (Miranda 2017). Este resultado fue confirmado por un estudio *ex situ* (Miranda et al. 2022), en el que se simularon daños volcánicos en pinos canarios para comprender cómo utilizaban las reservas tras la perturbación y cómo los nuevos fotoasimilados favorecían los rebrotes. Los dendrómetros instalados en los árboles dañados indicaron un cese del crecimiento radial durante algunos meses. Además, se desarrolló un cronograma detallado sobre el uso de carbohidratos en distintas fases de recuperación, basado en el análisis combinado de intercambio gaseoso y concentración de carbohidratos no estructurales. El esquema del estudio fue el siguiente:

1. Cese del crecimiento radial (tras 2 semanas) y movilización de las reservas de todos los tejidos para rebrotar, destacando las reservas de carbohidratos en las raíces.
2. Una vez los rebrotes fueron funcionales, las reservas de carbohidratos se invirtieron en la generación de nuevos rebrotes, al igual que los fotoasimilados.
3. En fases avanzadas de recuperación, los fotoasimilados también se destinaron al crecimiento radial y a la restauración de las reservas de carbohidratos.

También se estudiaron las respuestas anatómicas y de expresión génica a daños mecánicos y al rebrote. En Chano et al (2015) se realizaron daños mecánicos en corteza y cambium bascular de pinos canarios. Observamos una alta capacidad de cicatrización desde el tejido cambial en los márgenes laterales de la herida, con una alta proliferación de células parenquimáticas en primer lugar, y eventualmente restaurando el tejido vascular con un alto número de canales resiníferos. Posteriormente, en Chano et al (2017), analizamos las bases genéticas



de este xilema traumático, encontrando una alta expresión de genes asociados al desarrollo de madera temprana, que conlleva un menor coste energético comparado con la madera tardía, y de crecimiento más rápido. Y finalmente en Chano et al (2023) analizamos también las bases genéticas de otro proceso característico de esta especie, el rebrote, encontrando factores de transcripción implicados principalmente en el crecimiento de órganos laterales en angiospermas.

En cuanto a los daños por elementos tóxicos, se analizaron las concentraciones de mercurio en tejidos generados antes y después de la erupción en las secciones de tallo (Rodríguez Martín et al. 2013). Los valores fueron bajos en el xilema pre y post-eruptivo ($2.30 \mu\text{g kg}^{-1}$ de tejido), pero las heridas duraminizadas presentaron valores 10 veces mayores ($22.36 \mu\text{g kg}^{-1}$). Esto, junto a valores de floema y corteza más elevados que los del xilema ($> 6 \mu\text{g kg}^{-1}$), podrían indicar algún tipo de movilización del mercurio.

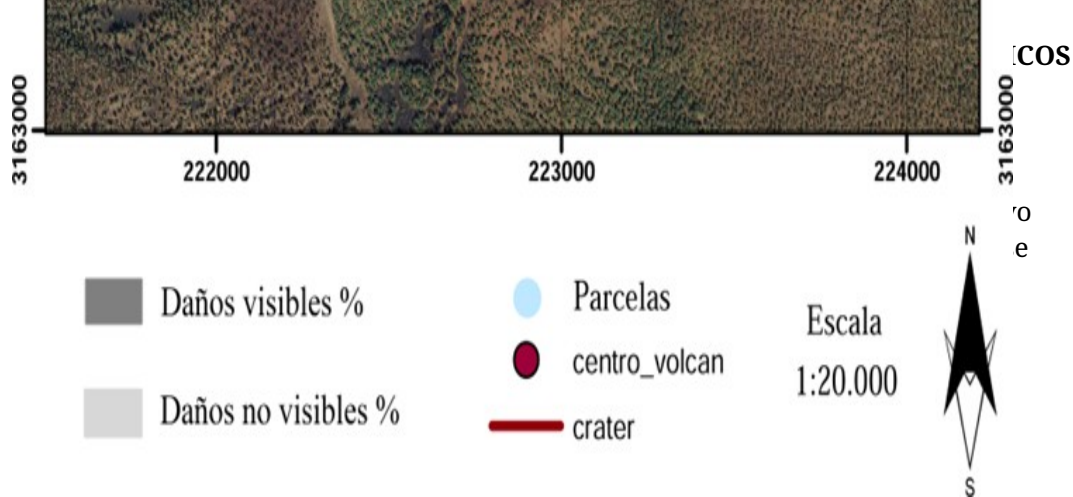
A nivel poblacional, se observaron diferencias en las distribuciones diamétricas de las localizaciones cercanas al volcán ($< 1 \text{ km}$) comparadas con las más alejadas ($> 1 \text{ km}$) (Miranda 2012). En 2011, se realizaron mediciones dendrométricas en 10 parcelas alrededor del cráter. Las parcelas más alejadas (menos afectadas) mostraron una distribución diamétrica normal (en torno a 40 cm de media), pero las parcelas cercanas al volcán presentaron una abundancia mayor de las clases diamétricas inferiores de 10 y 20 cm. Esto mostraba que existían árboles supervivientes, y que la mortalidad estaba siendo reemplazada por nuevas incorporaciones, al menos hasta cierto punto.

El análisis del primer vuelo fotogramétrico de la zona en 1963 (14 años después de la erupción) mostró una gran cantidad de árboles supervivientes. Sin embargo, debido a la baja resolución de la imagen, no se esperaban observar incorporadas tras la erupción en ese vuelo. Los valores de conteo de copas en los vuelos de 1963, 1983 y 2009 indicaron cómo nuevos pies se incorporaron al área tras la erupción.

Tabla 1. Conteo de pies en los sucesivos vuelos fotogramétricos u ortofotografías.

Vuelo 1963	Ortofotografía 1983		Ortofotografía 2009	
	Conteo de pies	10461	11520	19216





El 19 de septiembre de 2021 comenzó la erupción en Tajogaite (Nogales et al. 2022). La fisura inicial se desarrolló en dirección NO-SE, asociada a las fallas originadas en la erupción de 1949. En esta fisura se abrieron varias bocas, formando el cono de cenizas actual. Las bocas al SE emitieron piroclastos y cenizas, mientras que las bocas al NO emitieron flujos de lava. La erupción duró 85 días, siendo la más larga de las históricas en La Palma. Se emitieron $2 \times 10^7 \text{ m}^3$ de cenizas volcánicas y aproximadamente 1 Mt de dióxido de azufre.

4.5 Descripción de daños detectados en la masa de pinar de Tajogaite:

Tipología de daños según su causa:

Cenizas volcánicas: Al igual que en la erupción de Hoyo Negro, las cenizas causaron un daño amplio y homogéneo, disminuyendo con la distancia al cráter. La deposición no generó defoliación ni acumulaciones significativas que causaran daños mecánicos. Sin embargo, las zonas afectadas no mostraron nuevas plántulas de pino ni la formación de piñas.

Piroclastos: Los piroclastos de gran tamaño quedaron restringidos a 1 km del cráter (Bonadonna et al. 2022). Los daños mecánicos y de heridas provocados por piroclastos provocaron una eliminación completa de las ramas y heridas en el fuste en los primeros 150 metros. Provocaron heridas en fuste y la rotura de algunas ramas de los 150 a los 250 metros. Mas allá de los 300 metros no se observaron daños de heridas en los troncos por el impacto de los piroclastos.

Emisión de gases: Los gases tóxicos generaron daños homogéneos en un área aún más amplia que las cenizas, hasta 7 km del cráter, con clorosis en las acículas (Nogales et al 2022). Los árboles entre los 150 y 250 metro, que presentaban ramas mostraron una defoliación prácticamente completa quedando únicamente acículas secas. Los árboles hasta 500 metros de radio presentaban gran cantidad de acículas secas con mayor o menor cantidad de acículas vivas, aunque cloróticas.

Formación de fisuras y cono de cenizas: Ambos procesos causaron la mortalidad completa de los individuos directamente afectados.

Flujos de lavas: Los flujos de lava causaron la mortalidad de todos los individuos



en su curso y generaron daños mecánicos en los laterales fríos de las coladas.

Figura 4: Ortofotografías de 1963 y 2009 de Hoyo Negro arriba izquierda y derecha respectivamente. Ortofotografías anterior (2020) y posterior (2022) a la erupción de Tajogaite.

4.6 Principales resultados de la erupción de 2021

La mayoría de los pinos comenzaron a rebrotar en las dos primeras semanas después de la erupción. Sin embargo, dentro de un radio de 150 m del cráter, la mortalidad fue significativa, alcanzando el 100% tras seis meses. Después de un año, la mortalidad fue del 33% en un radio de 150-250 m. Tras 18 meses, todos los árboles en un radio de 300 metros habían muerto, con mortalidad puntual hasta a 500 m de distancia.

Las mediciones de conductancia estomática de los pies estudiados resultaron en valores en un rango entre 95.4 y 383.3 $\text{mmol}_{\text{H}_2\text{O}} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Como se observa en la figura 5, la conductancia de los pinos es significativamente mayor cuanto más cerca se encuentran del cráter.

Los valores de potenciales hídricos a medio día variaron entre los -4 y los -23.3 bares. De manera opuesta a lo ocurrido con la conductancia estomática, los pinos mostraron unos valores de potenciales más negativos (mayor estrés hídrico) cuanto menor era la distancia al volcán (figura 5).

Las mediciones de SPAD, al igual que las del potencial hídrico y las de conductancia estomática mostraron una tendencia significativa, en este caso positiva con la distancia al volcán: las acículas de los pinos más alejados presentaban un mayor verdor que las acículas más cercanas al volcán (figura 5).

Figura 5: Valores de conductancia estomática (gs) arriba izquierda; de potenciales hídricos de acícula a medio día (Ψ) arriba derecha; y de SPAD abajo; en los árboles medidos en parcelas a distintas distancias. La línea indica la regresión significativa. La zona sombreada indica los intervalos de confianza del 5 y el 95 %.

Los valores de NDVI mostraron una bajada generalizada hasta valores cercanos a 0 en todas las parcelas hasta los 2500 metros (figura 6). Los valores de NDVI se han mantenido en valores cercanos a 0 en las parcelas situadas a una distancia menor de 200 metros, además de la parcela dañada a 1175 m. La parcela situada a 200 metros mostró un leve incremento correspondiente a los rebrotes mencionados, para bajar de nuevo. Las parcelas a partir de los 500 metros en los últimos meses han mostrado valores similares a los pre-eruptivos, exceptuando de nuevo la parcela a 1175 m.

Figura 6: Valores NDVI mensuales de la última década (septiembre 2013 – septiembre 2023) de las parcelas a distintas distancias.

5. Discusión

5.1 Discusión de los resultados fisiológicos de Tajogaite (2021)

En cuanto a los valores de conductancia estomática, algunos se encuentran por encima de los valores habituales observados en pino canario, que suelen alcanzar los $200 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Fernández-Marín et al. 2021; Peters et al. 2003). Valores superiores a estos, por encima de los $300 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, como los observados en Tajogaite, habían sido encontrados en pinos que sufrieron simulación de daños volcánicos (Miranda et al. 2020). Estos valores pueden deberse a dos causas complementarias:

1. Los árboles tratan de recuperar cuanto antes el tejido fotosintético formando acículas menos costosas energéticamente y con menor impermeabilización, como se observó en el estudio de Miranda et al. (2020). En este estudio también se observó que esta mayor pérdida de agua no se correspondía con una mayor eficiencia en la tasa fotosintética; al contrario, la eficiencia en el uso del agua de las acículas de árboles dañados era menor que la de los árboles control. En el caso de Tajogaite, parece que podría ocurrir lo mismo, ya que las mayores conductancias se asocian con menores valores de SPAD.
2. Las células de guarda de los estomas acumulan SO_2 emitido por el volcán, perdiendo la habilidad para cerrar completamente los estomas (Knabe 1976), siendo las concentraciones de SO_2 mayores cuanto menor es la distancia al volcán.

Las tendencias con la distancia al cráter tanto de conductancia estomática (mayor conductancia a menor distancia) como de potencial hídrico (valores más negativos a menor distancia) son complementarias. La mayor pérdida de agua de los árboles más cercanos genera un mayor estrés hídrico. La medición del potencial hídrico se realizó en un día nublado, por lo que la pérdida de agua por evaporación fue más reducida que en días despejados. Por lo tanto, cabe suponer que en días soleados los valores de los potenciales podrían superar los umbrales que determinan el cierre estomático para esta especie. Según las curvas de cavitación realizadas por López et al. (2013), la población de pinos de Taburiente alcanzaba un 12 % de pérdida de conductividad por cavitación con potenciales de -20.0 bares y un 50% de la conductividad con potenciales de -46.1 bares.

En definitiva, uno de los principales problemas por los que estos árboles pueden estar presentando mortalidad es por limitaciones hídricas. Las raíces de los pinos han quedado enterradas bajo una capa de cenizas, de mayor profundidad cuanto más cerca está el árbol del cráter. Además, el cráter continuaba desgasificando para liberar la presión, lo que podría generar toxicidad tanto a nivel atmosférico



como en el subsuelo, afectando al agua disponible para los pinos y posiblemente a las raíces. Además, estos árboles estarán limitados por la variación de los ciclos de nutrientes en el nuevo suelo, lo que podría alterar la disponibilidad de nutrientes como el nitrógeno, necesario para regenerar las copas y permitir la entrada de carbohidratos a los individuos. Las limitaciones hídricas, de toxicidad y de nutrientes probablemente generarán un agotamiento de recursos, ya que los árboles antes de morir generaron varias cohortes de rebrote consecutivas que se secaron en pocas semanas o meses. Los valores observados de NDVI coincidieron con las observaciones realizadas en campo. Salvo la anomalía en la parcela a 1175 m del cráter, los valores de NDVI parecen mostrar una recuperación paulatina, casi completa, a valores pre-erupción en todas las parcelas más allá de los 500 metros de distancia al cráter.

5.2 Diferencias en las respuestas del pinar ante ambas erupciones

Aunque lo ocurrido con los pies en 1949 tras la erupción de Hoyo Negro solo puede estimarse a partir de mediciones actuales en los árboles o en la masa, o en todo caso, en mediciones sobre el vuelo de 1963, todo parece indicar que la mortalidad en la erupción de Tajogaite ha sido mucho mayor que en la de Hoyo Negro, al menos en las distancias más cercanas al cráter. En el vuelo de 1963 se pueden observar árboles con copa a menos de 50 metros del cráter. Esta diferencia en la mortalidad puede deberse a algunas diferencias entre las erupciones.

En primer lugar, la erupción de Tajogaite fue mucho más duradera que la de Hoyo Negro, lo que implicó que los árboles más cercanos soportaran mayor estrés. Sin embargo, los daños por piroclastos en los pinos fueron mucho más frecuentes en Hoyo Negro, siendo todavía en la actualidad fácilmente visibles las heridas en los troncos. En segundo lugar, no se han encontrado referencias en la bibliografía consultada sobre emisiones de gases en Hoyo Negro, por lo que es posible que estas fueran menos abundantes que en Tajogaite. Además, la erupción de Hoyo Negro fue predominantemente freatomagmática, sin emisión de lavas, lo que hace probable que los gases emitidos en esta erupción fueran principalmente vapor de agua. Finalmente, la zona de Hoyo Negro, al estar en cumbre, queda frecuentemente bañada por el mar de nubes generado por los húmedos vientos alisios, lo que favorece a los pinos de la zona con el aporte de agua. Sin embargo, Tajogaite se encuentra a la sombra de los alisios, lo que podría haber generado mayores limitaciones hídricas, sumadas al estrés de los daños volcánicos, superando los límites de supervivencia de los árboles (valores de potenciales hídricos).

Lo que sí podemos asegurar sobre la masa de pinar afectada por Hoyo Negro es que ha continuado incrementando su número con nuevas incorporaciones. En Tajogaite, estas nuevas incorporaciones podrían retrasarse, precisamente debido a la mayor mortalidad, al menos en las zonas más cercanas al cráter. En primer lugar, porque existen menos árboles adultos que puedan producir semilla. En segundo lugar, por las condiciones más áridas de la zona. Y en tercer lugar, porque la mayor mortalidad también indica un mayor daño infligido por esta erupción, lo que, en comparación con la erupción de 1949, retrasará la recuperación de los



árboles supervivientes.

La falta de árboles en las cercanías de Tajogaite también puede ser un factor que limite las posibilidades de germinación de pinos u otra vegetación. Los pinos canarios solitarios crean bajo su copa un área cubierta por una "alfombra" de acículas. En el paisaje de pinares volcánicos es fácil observar cómo estas alfombras se convierten en "islas de fertilidad", creando condiciones que favorecen la instalación de nuevas plantas. Entre otras, estas condiciones incluyen el sombreado del suelo (que es de color negro y absorbe gran cantidad de radiación), el aporte de materia orgánica y las condiciones microclimáticas bajo la copa del pino.

6. Conclusiones

A pesar de los severos daños causados por las erupciones volcánicas, el pino canario posee características y las estrategias que le permiten sobrevivir a estas grandes perturbaciones. Las erupciones olcánicas producen daños heterogéneos como se descrito para cada uno de los eventos. La mayor duración y la limitación climática más estricta del área de Tajogaite seguramente sean las causas de la mayor mortalidad y de lo posible restaso en la recuperación del pinar afectado por esta erupción más reciente

7. Agradecimientos

Agradecer al cabildo de La Palma y a sus agentes ambientales y retenes forestales la ayuda prestada durante todos los estudios aquí mostrados

8. Bibliografía

- Bonadonna, C., M. Pistolesi, S. Biass, M. Voloschina, J. Romero, D. Coppola, A. Folch, L. D'Auria, A. Martin-Lorenzo, L. Dominguez, C. Pastore, M.P.R. Hardy and F. Rodríguez. 2022. Physical Characterization of Long-Lasting Hybrid Eruptions: The 2021 Tajogaite Eruption of Cumbre Vieja (La Palma, Canary Islands). *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*. 127
- Briffa, K.R., P.D. Jones, F.H. Schweingruber and T.J. Osborn. 1998. Influence of volcanic eruptions on Northern Hemisphere summer temperature over the past 600 years. *Nature*. 393:450-455.
- Carracedo, J.C., E.R. Badiola, H. Guillou, J. Nuez and F.J. Perez-Torrado. 2001. Geology and volcanology of La Palma and El Hierro, Western Canaries. *Estudios Geológicos*. 57:175-273.
- Chano, V., C. Collada and A. Soto. 2017. Transcriptomic analysis of wound xylem formation in *Pinus canariensis*. *BMC PLANT BIOLOGY*. 17
- Chano, V., O. Gailing, C. Collada and A. Soto. 2023. Differential gene expression analysis of the resprouting process in *Pinus canariensis* provides new insights into a rare trait in conifers. *PLANT GROWTH REGULATION*. 100:717-731.
- Chano, V., R. Lopez, P. Pita, C. Collada and A. Soto. 2015. Proliferation of axial



- parenchymatic xylem cells is a key step in wound closure of girdled stems in *Pinus canariensis*. *Bmc Plant Biology*. 15
- Climent, J., R. López, S. González and L. Gil. 2007. El pino canario (*Pinus canariensis*), una especie singular. *Ecosistemas*. 16:80-89.
- Dale, V.H., L.A. Joyce, S. McNulty, R.P. Neilson, M.P. Ayres, M.D. Flannigan, P.J. Hanson, L.C. Irland, A.E. Lugo, C.J. Peterson, D. Simberloff, F.J. Swanson, B.J. Stocks and B.M. Wotton. 2001. Climate change and forest disturbances. *Bioscience*. 51:723-734.
- Fernández-Marín, B., M.A. Ruiz-Medina, J.C. Miranda and A.M. González-Rodríguez. 2021. Coexistent Heteroblastic Needles of Adult *Pinus canariensis* C.Sm. ex DC. in Buch Trees Differ Structurally and Physiologically. *Forests*. 12
- Foster, D.R., D.H. Knight and J.F. Franklin. 1998. Landscape patterns and legacies resulting from large, infrequent forest disturbances. *Ecosystems*. 1:497-510.
- Grime, J.P. 1977. Evidence for existence of three primary strategies in plants and its relevance to ecological and evolutionary theory. *American Naturalist*. 111:1169-1194.
- Kasaplıgil, B. 1977. A Late-Tertiary conifer-hardwood forest from the vicinity of Güvem village, near Kızılcahamam, Ankara. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration Institute of Turkey*. 88:25-33.
- Klaus, W. 1980. Ein *Pinus canariensis* Smith-Zapfenfund aus dem Ober-Miozän (Pannon) des Wiener Beckens: A fossil cone of *Pinus canariensis* Smith from the Upper Miocene (Pannon) of the Vienna Basin (Austria). *Annalen des Naturhistorischen Museums in Wien. Serie A für Mineralogie und Petrographie, Geologie und Paläontologie, Anthropologie und Prähistorie*. 84:79-84.
- Knabe, W. 1976. Effects of Sulfur Dioxide on Terrestrial Vegetation. *Ambio*. 5:213-218.
- López, R., U. López de Heredia, C. Collada, F. Javier Cano, B.C. Emerson, H. Cochard and L. Gil. 2013. Vulnerability to cavitation, hydraulic efficiency, growth and survival in an insular pine (*Pinus canariensis*). *Annals of Botany*. 111:1167-1179.
- Miranda, J.C. 2012. El pino canario y las erupciones de cumbre vieja (1949, La Palma). *Adaptación al volcanismo. In Sistemas y recursos naturales*. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, p 127.
- Miranda, J.C. 2017. El pino canario y las erupciones de Cumbre Vieja (1949, La Palma). *Adaptación al volcanismo*. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, p 127.
- Miranda, J.C., C. Calderaro, C. Coccozza, B. Lasserre, R. Tognetti and G. von Arx. 2022. Wood Anatomical Responses of European Beech to Elevation, Land Use Change, and Climate Variability in the Central Apennines, Italy. *Frontiers in Plant Science*. 13
- Miranda, J.C., J. Rodríguez-Calcerrada, P. Pita, M. Saurer, J. Oleksyn and L. Gil. 2020. Carbohydrate dynamics in a resprouting species after severe aboveground perturbations. *European Journal of Forest Research*
- Morla, C., C. Alcalde, J. Postigo and E. Barrón. 2002. Paleobiogeografía de *Pinus canariensis*: estróbilos y semillas fósiles del Plioceno ibérico (cuenca del Bajo Segura, Alicante, España). *In II Congreso español de Biogeografía*. Servicio de Publicaciones Universidad de La Laguna, La Gomera, Spain, pp 313-323.
- Nogales, M., M. Guerrero-Campos, T. Boulesteix, N. Taquet, C. Beierkuhnlein, R. Champion, S. Fajardo, N. Zurita, M. Arechavaleta, R. García, F. Weiser and F.M. Medina. 2022. The fate of terrestrial biodiversity during an oceanic island volcanic eruption. *Scientific Reports*. 12
- Pan, Y., R.A. Birdsey, O.L. Phillips and R.B. Jackson. 2013. The Structure,



Distribution, and Biomass of the World's Forests. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, Vol 44. 44:593-622.

Peters, J., D. Morales and M.S. Jimenez. 2003. Gas exchange characteristics of *Pinus canariensis* needles in a forest stand on Tenerife, Canary Islands. *Trees-Structure and Function*. 17:492-500.

Rodríguez Martín, J.A., N. Nanos, J.C. Miranda, G. Carbonell and L. Gil. 2013.

Volcanic mercury in *Pinus canariensis*. *Naturwissenschaften*. 100:739-747.

Swanson, M.E., J.F. Franklin, R.L. Beschta, C.M. Crisafulli, D.A. DellaSala, R.L. Hutto, D.B. Lindenmayer and F.J. Swanson. 2011. The forgotten stage of forest succession: early-successional ecosystems on forest sites. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 9:117-125.