

Resiliencia del pinar canario después de la erupción del volcán Tajogaite (La Palma, 2021)

María Guerrero Campos^{1, 2, 3}
 Patricia Marrero Rodríguez¹
 Rafael García Becerra²
 José Carlos Miranda García-Rovés⁴
 Tania Domínguez Flores⁵
 Víctor Chano González⁵
 Beatriz Fariña Trujillo¹
 Manuel Nogales Hidalgo²
 Félix Manuel Medina⁶

¹ Gestión y Planeamiento Territorial y Ambiental (Gesplan S.A.).

² Instituto de Productos Naturales y Agrobiología (IPNA-CSIC).

³ Facultad de Ciencias, Universidad de Málaga.

⁴ E.T.S.I. Montes, Forestal y Medio Natural. Universidad Politécnica de Madrid.

⁵ Dpto. de Genética Forestal y Mejoramiento de Árboles Forestales. Universidad de Göttingen.

⁶ Consejería de Medio Ambiente, Cabildo Insular de La Palma.

Durante 85 días (19 de septiembre – 13 de diciembre de 2021), la isla de La Palma sufrió el mayor evento eruptivo desde que se tienen registros históricos. El volcán Tajogaite emitió una gran cantidad de materiales volcánicos y gases, afectando a la población, a la economía local y a la biodiversidad. Tres ecosistemas se vieron afectados: matorral costero, matorral termófilo y pinar canario, siendo este último el que resultó más dañado, especialmente desde el cráter hasta 7 km hacia el sur de la isla. A pesar de ser un hábitat ampliamente estudiado, nunca se había evaluado el impacto de una erupción volcánica sobre su biodiversidad. Este estudio se ha centrado en este ecosistema, a similar altitud del cráter, a lo largo de la dorsal de Cumbre Vieja. Los resultados muestran que la velocidad de recuperación del pinar es más rápida de lo que se pensaba, permitiendo entender mejor los efectos de una erupción volcánica sobre la biodiversidad canaria.

Palabras clave: Islas Canarias, *Pinus canariensis*, recuperación, biodiversidad

VOLCANES Y BIODIVERSIDAD

Las erupciones volcánicas constituyen una de las catástrofes naturales más complejas y extremas de estudiar debido a los diferentes tipos de daños que causan, su aleatoriedad, la falta de estacionalidad, la imprevisibilidad de su duración y las extensas áreas que pueden afectar. Estos fenómenos generan importantes perturbaciones en la vegetación, que pueden perdurar durante décadas, siglos o incluso milenios (Foster *et al.*, 1998; Turner y Dale, 1998). Las erupciones que han tenido lugar en las últimas décadas, como las de Anak Krakatau (1930, Indonesia), Surtsey (1963, Islandia), Monte Santa

Helena (1980, EE. UU.), Pinatubo (1991, Filipinas) o Tajogaite (2021, España), se han convertido en laboratorios naturales que ayudan a comprender la dinámica de los ecosistemas ligados al volcanismo. Durante las semanas o pocos años posteriores a una erupción (Crisafulli *et al.*, 2015), o incluso cuando esta está en curso (Nogales *et al.*, 2022), se abordan varias cuestiones mediante la observación y la experimentación. Estas preguntas incluyen la evaluación del grado de afección y la distribución espacial de los impactos en los ecosistemas, así como el seguimiento de las primeras etapas de la sucesión ecológica.

La supervivencia de algunas es-

pecies de plantas a las erupciones volcánicas está altamente correlacionada con la distancia al cráter. Los impactos suelen ser más severos cerca del punto de emisión, con la excepción de los flujos de lava o de lodo que al desplazarse lejos del cráter destruyen o dañan gravemente todo a su paso (Dale *et al.*, 2005). Uno de los principales impactos está relacionado con el espesor de la tefra (definido como cualquier fragmento sólido de material volcánico expulsado a través de la columna eruptiva) acumulada, lo que provoca que muchas especies no puedan crecer y superar la capa de ceniza. Como consecuencia, la estructura, composición y abundancia de especies se ve modificada (Zobel y Antos, 1987). En las zonas más cercanas al punto de emisión, las grandes acumulaciones de ceniza causan la muerte de las plantas de biotipo herbáceo, pero no la de algunos árboles y arbustos, que pueden sobrevivir a enterramientos por tefra de más de 2 m de espesor (Nogales *et al.*, 2022; Beierkuhnlein *et al.*, 2023). Mientras, a mayores distancias, los gases sulfurosos y la ceniza fina se acumulan

en las hojas, provocando su abrasión (Black y Mack, 1984) y dificultando la fotosíntesis y el crecimiento de las plantas (Cochran *et al.*, 1983; Weiser *et al.*, 2022),

Otro efecto relacionado con las erupciones volcánicas es la modificación del suelo, causadas por la emisión de material nuevo (lava, escombros, lodo o tefra). Por lo general, este nuevo ambiente no es propicio para el establecimiento de las especies vegetales (Hendrix, 1981), aunque la competencia entre ellas puede verse reducida (Dale *et al.*, 2005).

El modo en que los animales se ven afectados por las erupciones varía en función de multitud de factores intrínsecos de la propia erupción, como el tipo, la extensión espacial y la intensidad de la perturbación volcánica (esta última posiblemente la más importante). Además, otros factores estocásticos, como el momento del suceso y las características particulares de cada especie, influyen en su supervivencia. Los animales no pueden sobrevivir, en casi ninguna circunstancia, cuando son sometidos a temperaturas extremas, toxicidad

química, fuerzas de impacto, enterramiento asociadas a flujos de lava, corrientes explosivas de densidad piroclástica, lahares o a profundidades elevadas de depósitos de tefra (>50 cm) (Crisafulli *et al.*, 2018). Sin embargo, se ha observado que algunos animales con estrategia de vida subterránea son capaces de sobrevivir en comparación con los que viven en hábitats más expuestos (Andersen, 1982; Andersen y MacMahon, 1985).

Los insectos se ven afectados por el área cubierta por la ceniza, así como por la duración de la exposición y la composición química del material piroclástico. La ceniza actúa como un insecticida natural, provocando abrasión cuticular por deshidratación, obstrucción de las válvulas espiraculares o salivación excesiva durante el acicalamiento (Edwards y Schwartz, 1981; Edwards, 2005; Fernández-Arhex *et al.*, 2013). La supervivencia de ciertos vertebrados, como los saurios, se ve influenciada negativamente por su tamaño, ya que los de menor talla pueden encontrar protección en refugios con mayor facilidad que los más grandes (Nogales *et al.*, 2022). En

El sotobosque durante la primera floración (mayo 2022)
después de la erupción, dominado por amagante
(*Cistus symphytifolius*)



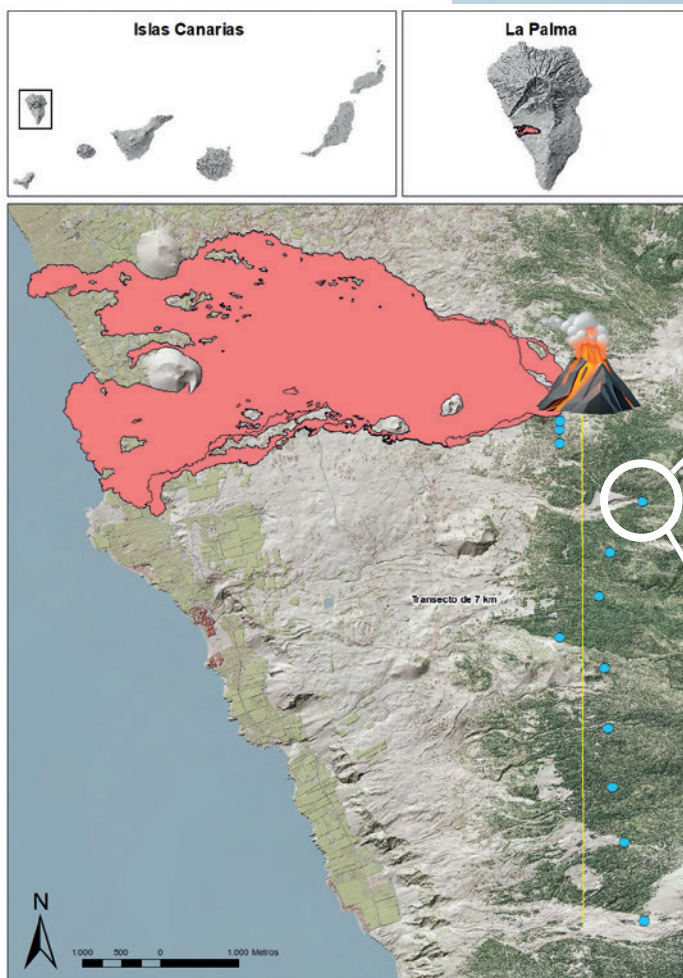
cuanto a las aves, los pájaros pequeños suelen desaparecer de las zonas afectadas por la caída de ceniza y los gases durante la erupción, pero regresan rápidamente una vez que esta finaliza, excepto en los lugares donde los árboles quedan completamente defoliados o enterrados (Edwards, 2005). Según Nogales *et al.*, (2022), las aves de mayor tamaño, como córvidos y rapaces, no necesariamente abandonan las zonas afectadas durante una erupción, sino que pueden cambiar sus hábitos alimentarios. Además, los murciélagos se vieron claramente afectados por la caída de ceniza, que dificultaba su vuelo y alimentación.

LA PALMA, UN LABORATORIO NATURAL DE CARÁCTER OCEÁNICO

La isla de La Palma, situada en la zona más occidental del archipiélago canario, es la segunda isla más joven (1,7 m.a.) y la quinta en extensión (708 km²) (Fig. 1; Carracedo *et al.*, 2001). Además, es la segunda más alta, con una altitud máxima de 2426 m s.n.m. en el Roque de Los Muchachos (Afonso, 1983). Esta isla destaca por su diversidad climática, exuberante vegetación, singular geología y volcanismo. La Palma se caracteriza por un clima subtropical-mediterráneo con inviernos húmedos y veranos secos (Garzón-Machado *et al.*, 2014). La isla está dividida en una zona volcánica-

mente activa (la dorsal de Cumbre Vieja) al sur, y otra inactiva al norte (Cumbre Nueva), donde predomina el proceso erosivo y no se han producido eventos eruptivos desde hace cientos de miles de años (Carracedo *et al.*, 2001). Dada su reciente formación, la actividad volcánica continúa siendo frecuente, convirtiéndola en la isla con mayor número de erupciones históricas. Durante los últimos 600 años, La Palma ha sido el escenario de numerosas erupciones históricas: Tacande (~1470), Tahuya (1585), San Martín (1646), Fuencaliente (1677), El Charco (1712), San Juan (1949), Teneguía (1971) y, recientemente, Tajogaite (2021).

Fig. 1. Mapa general de las áreas cubiertas por la erupción del volcán Tajogaite en la isla de La Palma. La línea amarilla corresponde al transecto de 7 km seguido para el establecimiento de las parcelas de estudio (puntos azules). A la derecha, aspecto del pinar canario afectado por los gases tóxicos emitidos durante la erupción y algunos ejemplos de especies de los principales grupos de animales estudiados.



LA ERUPCIÓN DEL VOLCÁN TAJOGAITE

La erupción comenzó el 19 de septiembre de 2021, siendo la de mayor duración registrada en tiempos históricos en esta isla. Durante 85 días estuvo emitiendo una gran cantidad de materiales volcánicos y gases, afectando a la población, economía local y biodiversidad. Las lavas causaron una devastación sin precedentes en el Valle de Aridane, afectando a alrededor de 3000 construcciones y dejando a más de 2300 personas sin hogar y ante un futuro incierto. La magnitud del impacto queda patente en la extensión cubierta por las coladas: 1241 ha (Fig. 1). Con respecto a

los hábitats que se vieron afectados, el 13 % se clasifica como pinar, el 67 % como matorral termófilo y el 20 % como matorral costero (Nogales *et al.*, 2022).

La tefra y los gases de la pluma volcánica, en su mayoría sulfurosos, fueron principalmente desplazados en dirección suroeste por los vientos alisios predominantes del noreste. Las áreas dentro del perímetro de 2,5 km más cercano al cráter principal fueron las más afectadas, incluyendo el pinar y el matorral termófilo. El pinar, ecosistema donde surgió el volcán, fue el que sufrió el mayor impacto, desde la zona de emisión hasta 1,5 km al norte y 7 km al sur, coincidiendo

con la predominancia de estos vientos alisios (Medina *et al.*, 2021; Nogales *et al.*, 2022; Weiser *et al.*, 2022; 2023).

Esta erupción constituye un marco único para el estudio y seguimiento de los procesos asociados con el vulcanismo y sus efectos sobre la biodiversidad y la dinámica de los ecosistemas en islas oceánicas.

EL PINO CANARIO, UN SUPERVIVIENTE ENTRE VOLCANES

El pinar canario es un ecosistema singular que se encuentra únicamente en las islas más escarpadas (Gran Canaria, Tenerife, La Gomera, La Palma y El Hierro). En La Palma



ocupa alrededor del 25,85 % (18 309 ha) de la superficie total de la isla (MITECO, 2020). Este bosque está por una conífera endémica del archipiélago, el pino canario (*Pinus canariensis*). En el sotobosque se encuentran, principalmente, especies de matorral como el amagante (*Cistus symphytifolius*), el tagasaste (*Chamaecytisus proliferus*), el corazoncillo (*Lotus campylocladus*) o el codeso (*Adenocarpus foliolosus*).

El pino canario es una especie que pertenece al grupo de pinos mediterráneos, junto al pino resinero (*P. pinaster*), el piñonero (*P. pinea*), el carrasco (*P. halepensis*), entre otros (Grievet et al., 2013). Sorprendentemente, la especie más cercana filogenética-

mente es el pino del Himalaya (*P. roxburghii*), a pesar de estar geográficamente separadas por más de 7000 km (Jin et al., 2021).

Esta conífera endémica puede alcanzar hasta 60 m de altura, comprobándose que algunos individuos llegan a los 850 años (Génova y Santana, 2006). Durante la etapa juvenil invierte gran parte de sus recursos en crear un robusto sistema radicular pivotante que puede profundizar más de 4 m en ejemplares adultos, logrando adaptarse sin dificultad en suelos pedregosos y pobres en nutrientes. Esta característica lo convierte en una especie primocolonizadora en coladas volcánicas recientes y malpaíses. Además, es una de las pocas especies del género *Pinus*

con capacidad de rebrote.

Esta especie presenta una serie de rasgos que le otorgan una especial resistencia a perturbaciones ambientales de gran magnitud. Destacan, entre otras, una gran capacidad de cicatrización en heridas abiertas que llegan a abarcar una amplia superficie del tronco principal o ramas laterales (Chano et al., 2015; 2017), o la capacidad de rebrotar también desde el tronco principal o ramas, siendo una de las pocas coníferas que presenta este atributo en etapa adulta (Pausas y Keely, 2017; Chano et al., 2023).

De acuerdo con Schwilky y Ackerly (2001), las especies del género *Pinus* siguen dos estrategias a la hora de

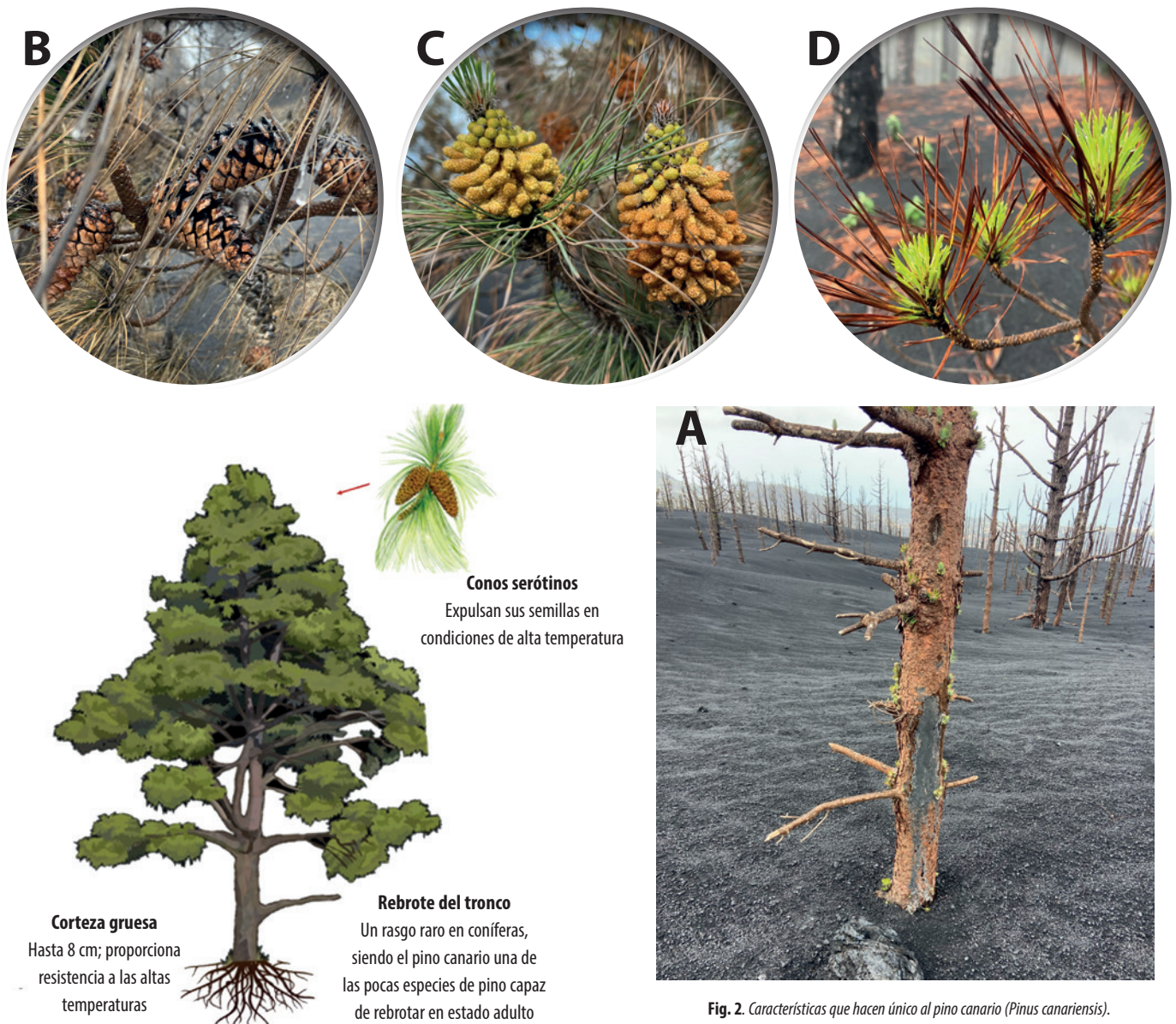


Fig. 2. Características que hacen único al pino canario (*Pinus canariensis*). A. Capacidad para rebrotar desde el tronco después del impacto de una bomba volcánica; B. Conos serótimos; C. Conos estaminados; D. Rebrote de acículas.

enfrentar el daño por fuego:

1. Algunas especies poseen conos serótimos que se abren en respuesta a altas temperaturas, “abrazan” el fuego, por lo que presentan una altura menor, con ausencia de autopoda (pérdida de las ramas más bajas), un follaje más inflamable y una corteza más fina.
2. Por el contrario, la estrategia de otras especies es evitar el fuego, presentando una altura mayor, un follaje menos inflamable, autopoda de ramas bajas (evita que el fuego afecte a la copa, protegiendo así los meristemos apicales), una gruesa corteza (para resguardar el cámbium vascular), y presencia de rebrote epicórmico.

El pino canario, probablemente debido a su evolución en un entorno volcánico, presenta características de ambas estrategias, como conos serótimos, capacidad de rebrote, presencia de canales resiníferos constitutivos, duramen de alta densidad (preserva la madera frente a heridas expuestas al exterior) y una gruesa corteza (protege al cámbium vascular y a las yemas axilares durmientes) (Fig. 2).

Los incendios forestales son considerados el principal agente perturbador de este hábitat a largo plazo (Climent *et al.*, 2004). Estos han sido recurrentes en el pinar canario desde

la llegada del ser humano al archipiélago (Arévalo *et al.*, 2001; Gil y González Doncel, 2013) y, en la actualidad, su frecuencia e intensidad se han visto favorecidas por acción del cambio climático (Weiser *et al.*, 2022). Solo una pequeña proporción de los incendios forestales en Canarias se atribuyen a causas naturales, como la caída de rayos y la actividad volcánica (Climent *et al.*, 1996; Höllermann, 2000). Sin embargo, la erupción de Tajogaite, en una zona completamente inmersa en pinar canario, no generó ningún incendio forestal al disminuir la concentración de oxígeno en el aire, en favor de otros gases emitidos por el volcán.

OBJETIVOS DEL ESTUDIO Y METODOLOGÍA

Este trabajo se enmarca en un contexto ecológico y evolutivo para examinar la dinámica y resiliencia del pinar canario en respuesta a los diferentes efectos provocados por la actividad volcánica (emisión de gases tóxicos, flujos de lava, expulsión de piroclastos, etc.). Para ello, es fundamental la monitorización espacio-temporal del estado de afección de la fauna y flora tras la erupción, el análisis de los procesos de regeneración y neocolonización en los campos de cenizas y coladas de lava, la identificación de las especies potencialmen-

te primo-colonizadoras, así como sus estrategias adaptativas.

El impacto que provoca un fenómeno natural catastrófico de esta magnitud sobre la biodiversidad nunca antes había sido monitorizado durante e inmediatamente después del cese de la erupción. Por ello, el trabajo de seguimiento sistemático realizado sobre el terreno por investigadores del Consejo Superior de Investigaciones Científicas y el Cabildo Insular de La Palma desde el comienzo de la actividad volcánica, constituye un estudio sin precedentes de la transformación del paisaje, su evolución, recuperación y capacidad de resiliencia



Fig. 3. Imágenes del estado de algunos ejemplares de distintas especies del pinar durante la erupción. Arriba, a la derecha tagasaste (*Chamaecytisus proliiferus*) comenzando a rebrotar tras una defoliación completa. Abajo, a la izquierda: amagante (*Cistus symphytifolius*) con las hojas totalmente agujereadas y, a la derecha, pino canario (*Pinus canariensis*) con las ramas cubiertas de ceniza.

medioambiental (Nogales *et al.*, 2022).

Para estudiar la evolución de la biodiversidad una vez finalizada la erupción, se estableció un sistema de seguimiento mensual (enero – diciembre 2022) en un total de 12 parcelas de 900 m², establecidas en el entorno del pinar a lo largo de 7 km al sur del cráter (Fig. 1). El estudio abarcó la mayor parte de los grupos que conforman la flora y fauna presente en las zonas afectadas. Adicionalmente, se anotaron todos los aspectos de historia natural y comportamiento relevantes detectados en este periodo. A continuación, se resumirá brevemente la metodología empleada en cada uno de los grupos seleccionados.

Vegetación

La vegetación se caracterizó mediante un inventario de especies presentes en las parcelas. Se midió la abundancia, la cobertura, la fenología y el porcentaje de daños relacionados con la erupción observando el estado

general de las plantas. Específicamente, en el caso del pino canario, se marcó cada ejemplar presente en las parcelas, se midió su diámetro normal (a 1,30 m sobre la superficie del terreno), así como la cobertura del dosel. En aquellos individuos de esta especie que presentaron más de un 50 % de afección (porcentaje de copa afectada) se midió el tamaño de las acículas apicales y axiales con el fin de intentar conocer su capacidad de regeneración.

Invertebrados

De toda la fauna invertebrada presente en las zonas estudiadas solo se consideraron a los artrópodos por ser el grupo más abundante y más fácilmente reconocible. Con el fin de caracterizar la riqueza y abundancia de especies, se identificaron y contabilizaron los ejemplares de las distintas especies que aparecían sobre las plantas, el suelo y en vuelo. Para el muestreo de invertebrados sobre

la vegetación se utilizó un paraguas entomológico de 100 x 100 cm. Se realizaron 5 varesos sistemáticos sobre el pino canario, el codeso, el tagasaste, el amagante, el corazoncillo y la tederá (*Bituminaria bituminosa*), dependiendo de su presencia y abundancia en cada parcela. En el suelo la prospección se realizó sobre dos cuadrados de 50 x 50 cm elegidas al azar. Mientras se realizaban estos muestreos se contabilizaron y anotaron todas las especies de insectos vistos en vuelo

Lagartos

Se registró la presencia de lagartos tizones (*Gallotia galloti palmae*) mediante transectos lineales de 30 m de largo en los que se contabilizaban los ejemplares observados en una banda de un metro a cada lado del observador. Además, se contaron sus huellas con el fin de completar las abundancias relativas en cada una de las parcelas. Los censos tuvieron lu-



Fig. 4. El sotobosque durante la primera floración (mayo 2022) después de la erupción, dominado por corazoncillo (*Lotus campylocadus*).

gar durante los períodos de mayor insolación diaria, momento en el que los lagartos están más activos. Además, se anotó su tamaño y sexo cuando fue posible. Debido a su actividad nocturna y crepuscular, así como sus hábitos menos conspicuos, dentro del grupo de los saurios no se tuvieron en cuenta a los perenquenes de Delalande (*Tarentola delalandii*).

Aves

Los censos de aves se realizaron mediante el método del Índice Puntual de Abundancia (IPA). Para ello se establecieron puntos fijos en cada parcela de estudio desde el que se anotaban todos los contactos con aves vistas u oídas en un periodo de 5 minutos. Con el fin de obtener datos de densidades, que pudiesen ser comparables entre localidades, se registró la distancia a la que se detectaba cada una de las aves. Los censos, en su mayoría, tuvieron lugar desde la salida del sol hasta unas 3 horas después, momento de mayor actividad de las aves. Por lo tanto, las especies de actividad nocturna o crepuscular no fueron objetivo específico de este trabajo.

Murciélagos

Las únicas especies de mamíferos nativos en la isla de La Palma son los murciélagos. El resto de especies son introducidas e incluso algunas de ellas se consideran invasoras. Por ello solo se realizaron muestreos de qui-

rópteros. Debido a su actividad nocturna y la dificultad para realizar conteos directos de su población, se optó por utilizar su capacidad de ecolocalización para identificar las distintas especies y estimar el número de individuos. Con este fin se utilizaron detectores de ultrasonidos (Pettersson D-230) en muestreos de 5 minutos, en cada parcela, empezando aproximadamente 30 minutos después del ocaso.

APRENDIZAJES EN EL PERIODO POST-ERUPTIVO

Una vez finalizada la erupción, el pinar fue el ecosistema más afectado por la caída de tefra, los gases (principalmente sulfurosos) y los breves episodios de lluvia ácida. En los primeros 500 m alrededor del cráter los individuos de pino perdieron las acículas y gran parte de las ramas se fragmentaron o dañaron. El sotobosque desapareció en las proximidades al punto de emisión debido a los depósitos de tefra que superaron los 2,5 m de espesor. A distancias superiores a 500 m y hasta 7 km hacia el sur los pinos presentaban acículas totalmente cloróticas (amarillamiento del tejido foliar causado por la falta de clorofila), mientras que el sotobosque sufrió defoliación completa, hojas agujereadas o cubiertas por una fina capa de ceniza (Fig. 3). Cabe destacar que todas las herbáceas desaparecieron desde el punto de emisión hasta una distancia de 6 km hacia el sur de la isla, a

excepción de algunos ejemplares de la chicharrilla de dos semillas (*Vicia disperma*) que se detectaron puntualmente.

A pesar de que muchas especies de plantas y animales desaparecieron, sobre todo en las áreas más cercanas al punto de emisión, se ha podido observar que tanto la flora como la fauna se están recuperando satisfactoriamente tras la erupción. Sin embargo, la neocolonización general de las coladas de lava podría tener lugar tras varias décadas, como se ha observado en otros volcanes recientes de la zona.

Plantas

Un total de 290 individuos de pino canario fueron etiquetados para su seguimiento durante el primer año del estudio. En el sotobosque se identificaron 14 especies (10 endémicas de Canarias, una de ellas exclusiva para La Palma y 4 nativas probables), 12 de ellas de porte arbustivo (Fig. 4).

La densidad de plantas (número medio de individuos de cada especie por hectárea) fue significativamente menor en los 2,5 km más próximos al cráter (Test Wilcoxon, $W = 3274$, $p = 0.004$). La distancia al punto de emisión parece también tener un impacto en la reproducción de las plantas. De este modo, la proporción de individuos en estado reproductivo respecto a los de estado vegetativo fue menor al aumentar la distancia al cráter (Test de Chi-cuadrado, $\chi^2 = 22,275$; $df = 1$;



Fig. 5. Seguimiento temporal de los rebrotes en un individuo de pino canario (*Pinus canariensis*) a lo largo del año 2022, en una de las parcelas más cercanas al punto de emisión.

$p < 0.001$). El análisis de la afección de las especies vegetales del pinar, como consecuencia de la erupción del volcán Tajogaite, reveló que las plantas leñosas fueron las únicas especies que sobrevivieron, principalmente, leguminosas como el tagasaste, el codeso, el corazoncillo o la tederá, y cistáceas como el amagante (Nogales *et al.*, 2022; Beierkuhnlein *et al.*, 2023). El pino canario mostró una gran resistencia a las altas temperaturas y a los efectos directos provocados por la caída de tefra y bombas volcánicas, recuperándose además de la clorosis como consecuencia de los gases volcánicos emitidos durante la erupción (ver Weiser *et al.*, 2022; 2023). En la actualidad, la clorosis únicamente persiste en los pinos localizados en las zonas que continúan emitiendo fumarolas (áreas cercanas al cráter y volcán Bernardino).

A lo largo de este año de estudio los ejemplares de pino canario situados a una distancia mayor de 1,5 km del cráter mostraron un mayor ritmo de recuperación en su grado de afección. En algunos casos este avance se observó desde comienzos del año, mejorando sustancialmente a principios del verano, posiblemente como resultado de las lluvias primaverales. En un radio de 250 m alrededor del cráter el 85 % de los pinos acabaron muriendo, a pesar de que algunos comenzaron a rebrotar al finalizar la erupción. Las acículas apicales y axiales continuaron desarrollándose hasta noviembre de 2022 cuando comenzaron a marchitarse (Figs. 5 y 6).

Durante los seguimientos realizados en las parcelas se pudo observar la capacidad de germinación de las semillas del pino canario sobre la ceniza volcánica. Las piñas serótinas, características de esta especie, se abren con el calor dispersando sus numerosas y grandes semillas aladas (López Rodríguez, 2009). Como resultado de la dispersión de estas simientes la proporción de plántulas aumentó significativamente en primavera y verano (Test de Razón de Verosimilitud, $G = 386,82$, $df = 6$, $p < 0.001$). Esta regeneración natural del ecosistema podría estar favorecida por la presencia de abundante pinocha sobre el suelo, creando un microclima

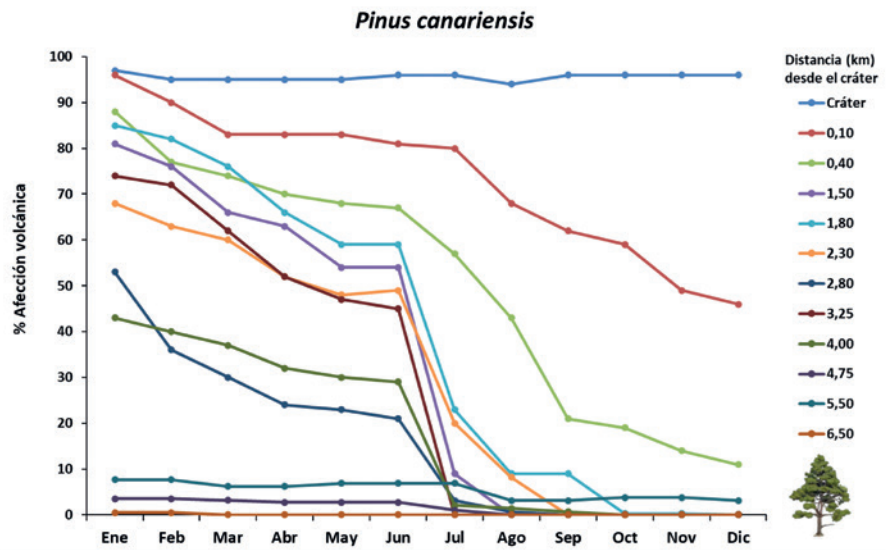


Fig. 6. Dinámica espacio-temporal del estado del pino canario (*Pinus canariensis*) durante el año 2022. ANOVA medidas repetidas, $F(1, 1) = 413$, $p < 0.001$.

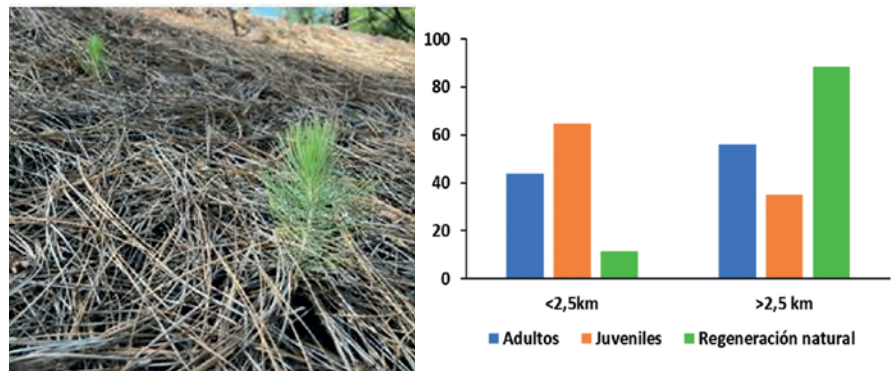


Fig. 7. Plántulas de pino canario (*Pinus canariensis*) emergiendo sobre una capa de pinocha. La gráfica de la derecha muestra la proporción de individuos (adultos, juveniles y plántulas de regeneración natural) a distintas distancias respecto al cráter (Test de Razón de Verosimilitud, $G = 98,687$, $df = 2$, $p < 0.001$).

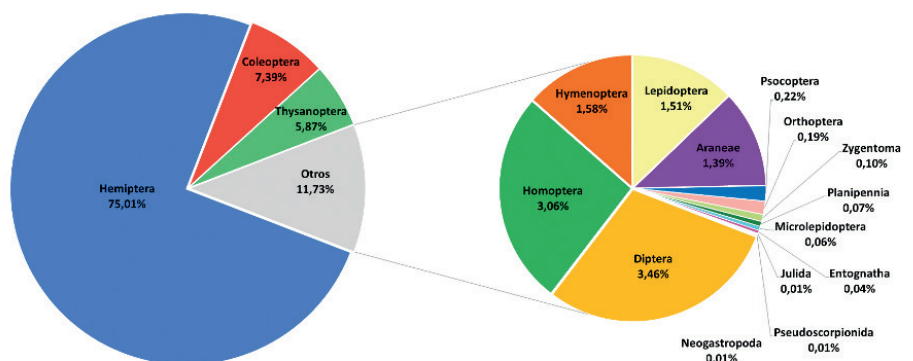


Fig. 8. Abundancia relativa de los órdenes de invertebrados identificados durante los censos post-erupción 2022.

adecuado para que se desarrollen las plántulas en sus primeros estadios (Díaz, 2007; Fig. 7).

Un patrón similar de afección volcánica con respecto a la distancia se observó en las principales especies de plantas de la cohorte del pinar, como en los casos del tagasaste, amagan-

te o corazoncillo. Las poblaciones de estas especies en los primeros 300 metros alrededor del cráter desaparecieron completamente, debido a que quedaron enterradas por la profunda capa de ceniza. A partir de esta distancia los efectos de la erupción fueron disminuyendo de forma paulatina,

de manera que todas las especies del pinar consiguieron recuperarse.

Animales

Tras el colapso inicial de las poblaciones de invertebrados su posterior presencia dependió, principalmente, de la recuperación vegetativa y de la floración de las plantas en las que habitan. Algunas especies de artrópodos, como buenos oportunistas, mostraron picos poblacionales de abundancia temporal coincidiendo con la disponibilidad de un alimento ocasional. De los 17 órdenes registrados en las áreas de estudio, los hemípteros constituyeron el grupo más importante (75 % de los contactos), seguidos por los coleópteros (7,4 %) y tisanópteros (5,8 %) (Fig. 8). Al menos, unas 83 especies han sido identificadas, destacando en abundancia *Empoasca alsiosa*, un cicadélido nativo de Canarias (47% de los contactos). Aunque no se observaron diferencias significativas en la abundancia total de los órdenes de invertebrados en relación con la distancia al punto de emisión (Test Wilcoxon, $V = 49$, $p = 0.201$), sí se registraron picos de abundancia de Coleópteros y Dípteros más cerca del cráter.

Los saurios, aunque no suelen ser abundantes en este ecosistema, constituyen el grupo de vertebrados que ha mostrado una recuperación más lenta. En la mayoría de las áreas de estudio aún no han sido registrados y los escasos contactos detectados corresponden a individuos de pequeña talla.

Las aves constituyen un grupo altamente diverso en especies, cada una con distintas características biológicas (tamaño corporal, comportamiento alimentario, territorialidad), que influyen en su capacidad para adaptarse a los cambios de su entorno. Los pequeños paseriformes, que desaparecieron de las áreas cercanas a los puntos de emisión durante la erupción, regresaron una vez que el volcán cesó su actividad. Sin embargo, las aves de mayor tamaño, como córvidos y rapaces, nunca abandonaron sus territorios y siguen hoy día presentes en esta área.

Durante el seguimiento realizado a lo largo de 2022 se registraron 15

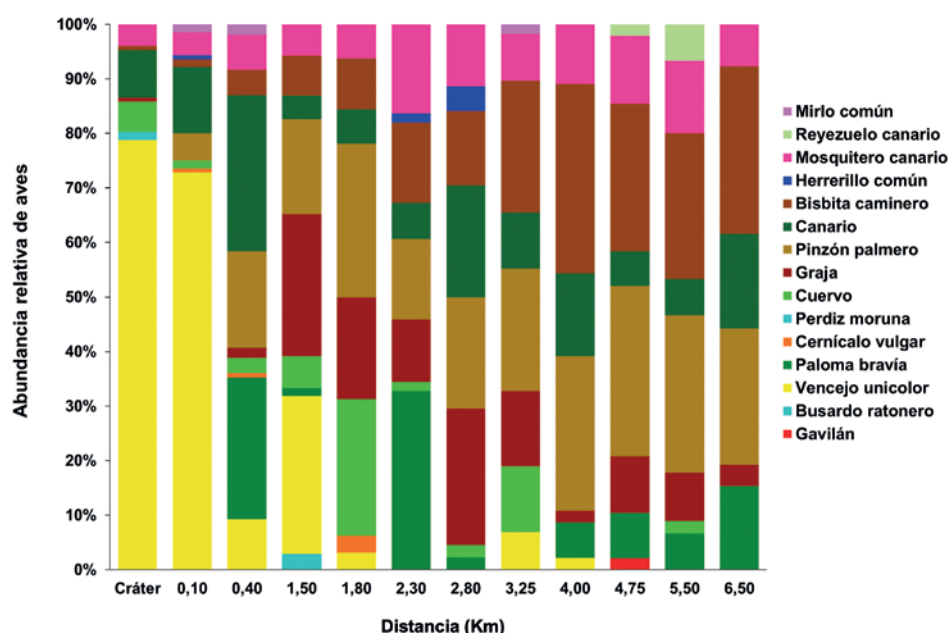


Fig. 9. Abundancia relativa de las especies de aves censadas a distintas distancias del cráter (km) durante el seguimiento de la biodiversidad realizado durante el año 2022.

especies de aves. Aunque se aprecia cierta variación en las abundancias relativas en relación con la distancia al cráter (Fig. 9), esta diferencia no fue estadísticamente significativa (Test de Wilcoxon, $V = 27$, $p = 0,06$). En las áreas cercanas al volcán la presencia de algunas aves insectívoras, como el vencejo unicolor (*Apus unicolor*), coincidió con las explosiones temporales de ciertas especies de cicadélidos (Fig. 10).

El murciélago de Madeira (*Pipistrellus maderensis*) y el murciélago rabudo (*Tadarida teniotis*) fueron las únicas especies detectadas en las áreas de muestreo. Aunque no son abundantes en el pinar, se registró una presumible disminución de contactos en este hábitat durante la erupción. No obstante, su presencia es más común en hábitats termófilos y costeros (los más alejados de los puntos de emisión y en altitudes inferiores), donde cazan sus presas principales en áreas cercanas a cultivos y estanques de agua.

TRAS UNA ERUPCIÓN LA VIDA RESURGE

La actividad volcánica es una perturbación primaria que puede provocar cambios importantes en el ecosistema mientras que se produce de nuevo el ensamblaje biológico. Las especies que sobreviven y se recupe-

ran tras una erupción dependen de varios factores, como el tipo de actividad volcánica, el material expulsado, el área de influencia, la estación y la duración del evento. La exposición frecuente a la misma perturbación puede hacer que las especies desarrollen adaptaciones fisiológicas, morfológicas o conductuales, volviéndose más resilientes (Foster *et al.*, 1998; López de Heredia *et al.*, 2014). En el caso de la vegetación, entre las estrategias que pueden llegar a desarrollar, se incluye la dispersión de propágulos por el viento o el agua, facilitando la colonización de nuevas áreas tras la erupción (Dale *et al.*, 2005).

El desarrollo de la vegetación crea condiciones para el establecimiento de la fauna asociada. Estos animales desempeñan funciones ecológicas vitales en el mantenimiento de los ecosistemas (Crisafulli *et al.*, 2015). El plancton aéreo y la fauna subterránea (ambos constituidos por muchas especies de artrópodos) suelen ser de los primeros seres vivos en llegar a los nuevos paisajes volcánicos (Oromí, 2010; Oromí y García, 2023). Otras especies con gran capacidad de vuelo, como insectos, aves o murciélagos, colonizan fácilmente estos lugares inhóspitos. En todo caso, las especies que se establecen en una nueva comunidad deben pasar por tres fases:

dispersión, establecimiento y desarrollo (Dale *et al.*, 2015).

CONCLUSIONES

- 1) La erupción volcánica de Tajogaite tuvo un impacto significativo en la biodiversidad de la zona. El número de especies, su abundancia y composición disminuyeron en las zonas más afectadas por la erupción a distancias menores a 2,5 km del cráter.
- 2) Los individuos de pino canario ubicados a 250 m alrededor del cráter, aunque mostraron una capacidad de rebrote inmediatamente después de finalizar la erupción, acabaron pereciendo.
- 3) En el sotobosque predominan las leguminosas arbustivas, mientras que las herbáceas desaparecieron. Únicamente se registró, de

forma puntual y localizada, la presencia de la chicharrilla de dos semillas (*V. disperma*).

- 4) Tras el colapso ecológico que sufrieron los invertebrados, su recuperación estuvo ligada a la recuperación de su planta-huésped y con ello, la disponibilidad de alimento.
- 5) Aunque los saurios no son muy abundantes en el pinar, las condiciones en las que se ha mantenido el hábitat no han permitido su recuperación.
- 6) Con respecto a las aves, los pequeños passeriformes que desaparecieron del pinar regresaron inmediatamente después al cese de la erupción; los córvidos y pequeñas rapaces nunca abandonaron el lugar y suelen verse frecuentemente sobre los pinos muertos y coloni-

zados por insectos xilófagos, presumiblemente para alimentarse de estos.

- 7) Los murciélagos fueron poco frecuentes en 2022, detectándose algunos individuos del murciélago de Madeira (*P. maderensis*) y murciélago rabudo (*T. teniotis*).
- 8) Finalmente, los estudios que se continúan realizando en el volcán Tajogaite ayudarán a comprender el impacto que este tipo de eventos ejercen sobre la biodiversidad, así como la capacidad de resiliencia de los ecosistemas que coexisten con eventos naturales catastróficos. Estos trabajos tienen implicaciones importantes para la conservación de los ecosistemas afectados por la erupción volcánica.

Referencias

- Afonso, L. 1983. La Palma. En Afonso, L. (Dir.) *Geografía de Canarias* 4: 212. Interinsular Canaria.
- Andersen, D.C. 1982. Observations on *Thomomys talpoides* in the region affected by the eruption of Mount St. Helens. *Journal of Mammalogy* 63: 652-655. <https://doi.org/10.2307/1380271>
- Andersen, D.C. y MacMahon, J.A. 1985. The effects of catastrophic ecosystem disturbance: the residual mammals at Mount St. Helens. *Journal of Mammalogy* 66: 581-589. <https://doi.org/10.2307/1380942>
- Arévalo, J.R., Fernández-Palacios, J.M., Jiménez, M.J. y Gil, P. 2001. The effect of fire intensity on the understory species composition of two *Pinus canariensis* reforested stands in Tenerife (Canary Islands). *Forest Ecology and Management* 148: 21-29. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00478-3](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00478-3)
- Beierkuhnlein, C., Nogales, M., Field, R., Vetaas, O.R., Walentowitz, A., Weiser, F., Stahlmann, R., Guerrero-Campos, M., Jentsch, A., Medina, F.M. y Chiarucci, A. 2023. Volcanic ash deposition as a selection mechanism towards woodiness. *npj Biodiversity*, 2: 14. <https://doi.org/10.1038/s44185-023-00018-2>
- Black, R.A. y Mack, R.N. 1984. Aseasonal leaf abscission in *Populus* induced by volcanic ash. *Oecologia* 64: 295-299. <https://doi.org/10.1007/BF00379124>
- Carracedo, J.C., Badiola, E.R., Guillou, H., de la Nuez, J. y Pérez Torrado, F.J. 2001. Geology and volcanology of La Palma and El Hierro, Western Canaries. *Estudios Geológicos* 53: 5-6. <https://doi.org/10.3989/egol.01575-6134>
- Chano, V., Gailing, O., Collada, C. y Soto, A. 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. <https://doi.org/10.1007/s10725-023-00970-w>
- Chano V., López de Heredia U., Collada C, Soto A. 2017. Transcriptomic analysis of juvenile wood formation during the growing season in *Pinus canariensis*. *Holzforschung* 71: 919-937. <https://doi.org/10.1515/hf-2017-0014>
- Chano V., López R, Pita P, Collada C., Soto A. 2015. Proliferation of axial parenchymatic xylem cells is a key step in wound closure of girdled stems in *Pinus canariensis*. *BMC Plant Biology* 15: 64. <https://doi.org/10.1186/s12870-015-0447-z>
- Clement, J., Gil, L. y Tuero, M. 1996. *Las regiones de procedencia de Pinus canariensis* Chr. Sm. ex DC. ICONA, Madrid.
- Clement, J., Tapias, R., Pardos, J.A. y Gil, L. 2004. Fire adaptations in the Canary Islands pine (*Pinus canariensis*). *Plant Ecology* 171: 185-196. <https://doi.org/10.1023/B:VEGE.0000029374.64778.68>
- Cochran, V.L., Bezdicsek, D.F., Elliott, L.F. y Papendick, R.I. 1983. The effect of Mount St. Helens' volcanic ash on plant growth and mineral uptake. *American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America* 12: 415-418. <https://doi.org/10.2134/jeq1983.00472425001200030021x>
- Crisafulli, C.M., Parmenter, R.R., Blackman, T.E., y MacMahon, J.A. 2018. Mammal Community Assembly During Primary Succession on the Pumice Plain. En: Crisafulli C.M. y Dale V.H. (Eds.) *Ecological Responses at Mount St. Helens: Revisited 35 years after the 1980 Eruption*. 269-303. New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-7451-1_15
- Crisafulli, C.M., Swanson, F.J., Halvorson, J.J. y Clarkson, B.D. 2015. Volcano ecology: disturbance characteristics and assembly of biological communities. En: Sigurdsson, H., McNutt, S., Rymer, H., y Stix, J. (Eds.) *The encyclopedia of volcanoes*. 1265-1284. New York. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00073-0>
- Dale, V.H., Delgado-Acevedo, J., MacMahon, J. y Ernst, G.G.J. 2005. Effects of modern volcanic eruptions on vegetation. En: Martí, J., y Ernst, G. (Eds.) *Volcanoes and the Environment*, 227-249. Cambridge. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511614767.009>
- Edwards, J.S. y Schwartz, L.M. 1981. Mount St. Helens ash: a natural insecticide. *Canadian Journal of Zoology* 59: 714-715. <https://doi.org/10.1139/z81-100>
- Edwards, J. 2005. Animals and volcanoes: Survival and revival. En: Martí, J., y Ernst, G. (Eds.) *Volcanoes and the Environment*. 250-272. Cambridge. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511614767.010>
- Fernández-Arhex, V., Buteler, M., Amadio, M.E., Enriquez, A., Pietrantuono, A.L., Stadler, T., Becker, G. y Bruzzone, O. 2013. The effects of volcanic ash from Puyehue-Caulle range eruption on the survival of *Dichroplus vittigerum* (Orthoptera: Acrididae). *Florida Entomologist* 96: 286-288. <https://doi.org/10.1653/024.096.0149>
- Foster, D.R., Knight, D.H. y Franklin, J.F. 1998. Landscape patterns and legacies resulting from large, infrequent forest disturbances. *Ecosystems* 1: 497-510. <https://doi.org/10.1007/s100219900046>
- Garzón-Machado, V., Otto, R. y del Arco Aquilar, M. 2014. Bioclimatic and vegetation mapping of a topographically complex oceanic island applying different interpolation techniques. *International*



Fig. 10. Bandada de vencejos (*Apus unicolor*) alimentándose de cicadélidos en las proximidades del cráter.

- Journal of Meteorology* 58: 887-899. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23686111/>
- Génova, M. y Santana, C. 2006. Crecimiento y longevidad en el pino canario (*Pinus canariensis* Smith.). *Investigación agraria. Sistemas y recursos forestales* 15: 296-307.
- Gil L., y González Doncel, I. 2013. *Historia del Paisaje forestal de las Islas Canarias*. Cabildo insular de Tenerife.
- Grivet, D., Climent, J., Zabal-Aguirre, M., Neale, D.B., Vendramin, G.G., González-Martínez, S.C. 2013. Adaptive evolution of Mediterranean pines. *Molecular Phylogenetics and Evolution* 68: 555-566. <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2013.03.032>
- Hendrix, L.B. 1981. Post-eruption succession on Isla Fernandina, Galapagos. *Madroño*, 24: 242-254. <https://www.jstor.org/stable/41424331>
- Höllermaier, P. 2000. The impact of fire in the Canarian ecosystems 1983-1998. *Erdkunde* 54: 70-75. <http://www.jstor.org/stable/25647251>
- Jin, W.-T., Gernandt, D.S., Wehenkel, C., Xiaomei, X., Wei, X.-X., Wang, X.-Q. 2021. Phylogenomic and ecological analyses reveal the spatiotemporal evolution of global pines. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 118: e2022302118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2022302118>
- López Rodríguez, R. 2009. *Diferenciación adaptativa entre poblaciones de Pinus canariensis* Chr. Sm. ex DC. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.3305>
- López de Heredia, U., López, R., Collada, C., Emerson, B.C. y Gil, L. 2014. Signatures of volcanism and aridity in the evolution of an insular pine (*Pinus canariensis* Chr. Sm. Ex DC in Buch). *Heredity* 113: 240-249. <https://doi.org/10.1038/hdy.2014.22>
- Luis Díaz, V.C. 2007. Calidad de planta de pino canario para reforestación. Métodos de cultivo y respuestas fisiológicas a factores de estrés. Tesis doctoral, Universidad de La Laguna, La Laguna.
- Medina, F.M., Acevedo, A. y Nogales, M. Notas preliminares sobre la afección del volcán a la flora y vegetación de La Palma (octubre 2021). 2021. *Conservación Vegetal* 25: 54-55.
- MITECO. 2020. *Cuarto Inventario Forestal Nacional*. Canarias. Madrid
- Nogales, M., Guerrero-Campos, M., Boulesteix, T., Taquet, N., Beierkuhnlein, C., Campion, R., Fajardo, S., Zurita, N., Arechavaleta, M., García, R., Weiser, F. y Medina, F.M. 2022. The fate of terrestrial biodiversity during an oceanic island volcanic eruption. *Scientific Reports* 12: 19344. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-22863-0>
- Oromí, P. 2010. 3. La fauna subterránea de Canarias: un viaje desde las lavas hasta las cuevas. En Afonso-Carrillo, J. (Ed.), *Volcanes: mensajeros del fuego, creadores de vida, forjadores del paisaje*. 63-98. Actas V Semana Científica Telesforo Bravo. Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias. ISBN: 978-84-614-3579-1.
- Oromí, P. y García, R. 2023. Colonización de las lavas por la fauna invertebrada. *Cosmológica*, 3: 43-54. ISSN: 2792-7423.
- Otto, R., García-del-Rey, E., Muñoz, P.G. y Fernández-Palacios, J.M. 2010. The effect of fire severity on first-year seedling establishment in a *Pinus canariensis* forest on Tenerife, Canary Islands. *European Journal of Forest Research* 129: 499-508. <https://doi.org/10.1007/s10342-009-0347-6>
- Pausas, J.G., Keeley, J.E., y Schwilck, D.W. 2017. Flammability as an ecological and evolutionary driver. *Journal of Ecology* 105: 289-297. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12691>
- Schwilk, D.W., y Ackerly, D.D. 2001. Flammability and serotiny as strategies: correlated evolution in pines. *Oikos* 94: 326-336. <https://www.jstor.org/stable/3547577>
- Turner, M.G. y Dale, V.H. 1998. Comparing large, infrequent disturbances: what have we learned?. *Ecosystems* 1: 493-496. <https://www.jstor.org/stable/3658750>
- Weiser, F., Sauer, A., Gettueva, D., Field, R., Irl, S.D.H., Vetaas, O., Chiarucci, A., Hoffmann, S., Fernández-Palacios, J.M., Otto, R., Jentsch, A., Provenza, A. y Beierkuhnlein, C. 2021. Impacts of Forest Fire on Understory Species Diversity in Canary Pine Ecosystems on the Island of La Palma. *Forests* 12: 1638. <https://doi.org/10.3390/f12121638>
- Weiser, F., Baumann, E., Jentsch, A., Medina, F.M., Lu, M., Nogales, M. y Beierkuhnlein, C. 2022. Impact of Volcanic Sulfur Emissions on the Pine Forest of La Palma, Spain. *Forests* 13: 299. <https://doi.org/10.3390/f13020299>
- Weiser, F., Walentowitz, A., Baumann, E., Shatto, C., Guerrero-Campos, M., Jentsch, A., Nogales, M., Medina, F.M., Reidar Vetaas, O. y Beierkuhnlein, C. 2023. Combining in-situ monitoring and remote sensing to detect spatial patterns of volcanic sulphur impact on pine needles. *Forest Ecology and Management* 549: 121468. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121468>
- Zobel, D.B. y Antos, J.A. 1987. Composition of rhizomes of forest herbaceous plants in relation to morphology, ecology, and burial by tephra. *Botanical Gazette* 148: 490-500. <https://doi.org/10.1086/337680>