

Deforestación inducida por el fuego en bosques mediterráneos sometidos a sequía

Víctor Resco de Dios¹,
Asaf Karavani¹,
Matthias M. Boer²,
Mara Baudena³,
Carlos Colinas¹,
Rubén Díaz-Sierra⁴,
Jesús Pemán¹,
Martín de Luis⁵,
Álvaro Enríquez de Salamanca^{4,6}

¹ Universitat de Lleida

² Western Sydney University

³ Utrecht University

⁴ Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED)

⁵ Universidad de Zaragoza

⁶ DRABA Ingeniería y Consultoría Medioambiental

En los últimos 15 años, 3 millones de hectáreas de bosques se han convertido en matorrales o pastizales en los países mediterráneos de la Unión Europea, siendo el fuego y la sequía los principales motores de esa deforestación. Se analiza la deforestación inducida por los efectos conjuntos del fuego y la sequía en tres escalas jerárquicas: resistencia en individuos, resiliencia de poblaciones y transiciones a un nuevo estado. A nivel individual se analiza la resistencia estructural y fisiológica y la capacidad de rebrote. Cuando los individuos perecen, el segundo paso hacia la deforestación es una resiliencia limitada de la población, esto es, una baja capacidad para regenerarse tras el fuego. Si los individuos mueren y la población no se recupera, se producirá una transición a un nuevo estado de vegetación. Las especies con capacidad de rebrote proporcionan un papel amortiguador contra la deforestación en bosques dominados por especies que regeneran sexualmente y carecen de banco de semillas. Aunque la diversificación de rodales con especies rebrotadoras suele ser ventajosa para incrementar la resiliencia de la masa, existen lagunas de conocimiento sobre cómo la composición de la masa afecta a la inflamabilidad, a la resistencia frente a la sequía y sobre el "síndrome de agotamiento de los rebrotes". La gestión debe adaptarse para mantener los bosques mediterráneos bajo un clima cambiante, prestando además mayor atención a la aparición de nuevos riesgos de incendios en zonas antes libres de ellos, como los bosques de montaña.

Palabras clave: Deforestación; incendios forestales; sequía; región mediterránea

INTRODUCCIÓN

En los últimos años los países mediterráneos de la Unión Europea han "reverdecido": entre 1990 y 2006 se han convertido en bosques 2,3 millones de ha ocupadas por matorrales

y 2 millones de ha de tierras agrícolas. Sin embargo, esa tendencia se contrarresta en parte por la transformación de 3,2 millones de ha de bosque en matorral, principalmente por el fuego y la sequía. El cambio climático hace

prever en la cuenca mediterránea un aumento en la duración e intensidad de la sequía estival (con una escasez extrema de agua que puede producir mortalidad de árboles), y de la frecuencia de incendios.

RÉGIMEN DE INCENDIOS EN LA REGIÓN MEDITERRÁNEA

La hipótesis de la “productividad intermedia-fuego” plantea unos picos en la ocurrencia de incendios en niveles intermedios de productividad y aridez, siendo la actividad del fuego mínima donde la productividad es baja y la aridez alta (desiertos), por falta de combustible, o cuando la productividad es alta y la aridez baja (bosques lluviosos), porque los combustibles rara vez están lo suficientemente secos como para arder. En los bosques mediterráneos la carga de combustible suele ser suficiente para soportar incendios, por lo que el aumento de aridez a causa del cambio climático puede provocar un incremento de su frecuencia. Se espera un incremento relativo de incendios mayor en los bosques mediterráneos más productivos (con mayor carga de combustible) frente a pequeños aumentos o

incluso reducciones en la actividad del fuego allí donde las limitaciones hídricas son más fuertes, con cargas de combustible bajas, que podrían reducirse aún más.

Los incendios forestales suelen clasificarse como fuegos de suelo, de superficie (o sotobosque) o de copas, un esquema útil para prever su comportamiento y acometer su extinción. Pero los efectos del fuego en la dinámica de la vegetación dependen del tipo de combustible, la recurrencia y estacionalidad de los incendios, la intensidad y severidad (la supervivencia depende en gran medida del daño en la copa) y del tamaño de los rodales quemados. La estimación de la frecuencia y recurrencia de incendios en Europa mediterránea es complicada porque muchos bosques son relativamente jóvenes (originados tras el abandono del campo o por repoblaciones) o tienen una larga historia de explotación forestal que dificulta los análisis dendrológicos. En California se estiman intervalos medios de recurrencia del fuego de 36 años, con gran variación intrarregional.

Las acciones humanas tienen un gran impacto en la frecuencia de in-

cendios; por ejemplo, se estima que en Valencia la frecuencia se ha duplicado desde la década de 1970 debido al abandono de la tierra. La frecuencia de fuegos afecta a la deforestación, particularmente en especies que se regeneran de semilla, porque es necesario un intervalo sin fuego para alcanzar la madurez y producir semillas viables. El tamaño de los incendios se ha alterado también drásticamente. Una consecuencia de las labores de extinción es la denominada “paradoja de los incendios”, por la cual una gran proporción del área total quemada se consume en unos pocos eventos grandes. Por ejemplo, en Cataluña solo el 0,2 % de los incendios forestales son grandes incendios (> 500 ha) pero suponen más del 60 % del área quemada. Existe una gran proporción de incendios pequeños, que pueden controlarse fácilmente, y una pequeña proporción de grandes incendios que superan la capacidad de extinción y afectan a una gran superficie de terreno. La mayoría de incendios forestales en el mediterráneo ocurren en verano, en un período de escasez de agua. Se apunta a un cambio en el régimen de incendios en el siglo XX; su actividad

Pinar de Pinus pinaster tras un incendio, con piñas abiertas en el suelo por acción del fuego. Riba de Saelices (Guadalajara)



estuvo limitada por el combustible hasta la década de 1970, y ha sido impulsada por la sequía desde entonces. El incremento de sequía que predicen los escenarios climáticos puede llevar a que de nuevo pasen a estar limitados por el combustible, al reducirse la productividad.

PROCESOS CONDUCENTES A LA DEFORESTACIÓN

La deforestación inducida por incendios es un proceso en tres etapas, con una jerarquía de escalas, donde el fuego interactúa a nivel de individuos, poblaciones y comunidades. El primer paso depende de la resistencia de los árboles individuales; para que exista deforestación, deben sucumbir al fuego. Cuando los individuos perecen, el segundo paso hacia la deforestación depende de la capacidad de recuperación de la población, es decir, la capacidad para regenerarse después del fuego, teniendo gran influencia la recurrencia de incendios. Si los individuos mueren en un incendio y la población no se recupera, es probable que se produzca un cambio de especie o una transición de estado, dependiendo del tamaño del área quemada y la estacionalidad del fuego, entre otros aspectos. Si la transición es hacia un estado no forestal, se entra en el tercer paso hacia la deforestación.

Los pinos mediterráneos carecen de capacidad de rebrote, y su regeneración se basa en la germinación de semillas tras el fuego. La deforestación depende del daño a árboles y semillas en el incendio, de la falta de pies madre a una distancia de dispersión, y de la ausencia de árboles que rebroten en el sotobosque. Si se dan las dos primeras condiciones pero hay un subpiso de rebrotadoras, es probable que haya una transición de pino a fagáceas, pero si no existe dicho subpiso el resultado final del proceso será la deforestación.

Aunque la deforestación posincendio se ha producido sobre todo en pinares, no se debe descartar la pérdida de bosques de fagáceas en un futuro más cálido y seco; de hecho ya se detecta en parte del Mediterráneo un declive de estas especies, que están siendo desplazadas por semi-



A. Enriquez de Salamanca

Incendio en una masa de Pinus pinea. La supervivencia de los individuos depende del grado de socarramiento de la copa, determinado por la velocidad del incendio. Mazagón (Huelva).

lladoras (germinadoras) y arbustos que rebrotan aun bajo condiciones de sequía.

Tradicionalmente se ha considerado que el fuego puede promover cambios en la vegetación a menudo considerados como sucesivos (pino a fagáceas) o regresivos (pino a matorral). Este enfoque presenta la sucesión como un proceso lineal donde la vegetación avanza, en ausencia de perturbación, hacia un punto final (clímax) y, cuando ocurren perturbaciones, regresa a un estado anterior de esa ruta lineal. Sin embargo, preferimos describirlos como transiciones de estado, porque las trayectorias de la vegetación son difíciles de predecir y a menudo no lineales. En el modelo tradicional de dinámica vegetal (sucesional), basado en la fitosociología, las fagáceas serían la vegetación potencial predominante en gran parte del mediterráneo, pero la evidencia palinológica a menudo no da soporte a estas hipótesis. Los estudios de campo muestran trayectorias no lineales, lo que significa que las circunstancias locales pueden conducir a diferentes comunidades tras un incendio en un mismo sitio. Por ejemplo, se ha iden-

tificado diferentes comunidades de matorral para distintas recurrencias de incendios en masas de *Pinus halepensis*.

RESISTENCIA AL FUEGO EN ÁRBOLES INDIVIDUALES

Los fuegos de copas son comunes en los ecosistemas mediterráneos. La supervivencia posterior al incendio es baja en árboles no rebrotadores, siendo la combustión o el socarramiento de la copa la causa más común de mortalidad, especialmente entre las especies menos tolerantes al fuego. Sin embargo, existen rasgos estructurales, fisiológicos o de rebrote que mejoran la supervivencia, y que pueden considerarse adaptaciones al fuego.

Rasgos estructurales

La humedad del combustible tiene influencia en la propagación del fuego. Por ejemplo, los árboles de hoja caduca tienen mayor humedad foliar que los de hoja perenne porque el follaje contiene sólo hojas jóvenes producidas en el mismo año. La senescencia de hojas durante la sequía incrementa la inflamabilidad de la copa. Por ejemplo, las acículas de *Pinus halepensis*

viven tres años, secándose en julio; hasta un tercio de la copa puede estar compuesta por materia seca en esa época, incrementando la inflamabilidad, aunque solo unas semanas, hasta que las acículas secas caen.

La morfología de los árboles también está relacionada con los incendios, ya que influye en la probabilidad de experimentar un fuego de copas y afecta al grado de aislamiento térmico de los brotes y hojas. La altura de la base de la copa y la densidad aparente de la copa son esenciales en la probabilidad de un incendio de copas.

La corteza aísla el cambium, el sistema vascular y los meristemas de temperaturas letales. El grosor de corteza es la propiedad que más influye en su capacidad de aislamiento térmico, aunque la proporción de corteza interior y exterior, densidad, contenido de agua, estructura y textura también desempeñan papeles importantes.

El daño a las raíces se limita a casos donde se produce un calentamiento intenso del suelo, típico de incendios de suelo, que son raros en ambientes mediterráneos. Las raíces actúan como órganos de almacenamiento, y su papel principal en la supervivencia tras un incendio se debe a que proporcionan los recursos necesarios para rebrotar en las especies con esta capacidad.

Procesos fisiológicos

El objetivo principal de las adaptaciones estructurales es proteger las funciones fisiológicas esenciales de los árboles. El proceso más importante que explica la muerte del árbol en un incendio es la combustión o socarramiento de la copa, pero se puede producir una mortalidad sustancial en los meses posteriores. La necrosis es el resultado de la desnaturalización de proteínas a causa del estrés térmico. En el cambium y floema ocurre casi instantáneamente si las células superan los 60° C o con exposiciones prolongadas a 50° C. Sin embargo, para que se produzca la mortalidad después del incendio a menudo tienen que transcurrir semanas o meses, lo que sugiere que están involucrados otros mecanismos. Estudios recientes demuestran que los incendios pueden inducir un colapso del xilema, por cavi-

tación a causa del déficit de presión de vapor creado por el calor y por deformación de las paredes celulares de los vasos conductores o de las traqueidas. La reducción de la conductividad conduce a la desecación de la copa. Los efectos del fuego en la mortandad de árboles dependen de la intensidad y severidad de las quemaduras.

Resistencia a través del rebrote

El rebrote es un mecanismo importante de resistencia de los bosques mediterráneos frente al fuego; desde el punto de vista de la dinámica de la vegetación, el más eficiente cuando existen fuegos de copas recurrentes. Sin embargo, se desconoce por cuánto tiempo seguirá operando esta respuesta ante futuras condiciones ambientales; en el Sur de los Alpes se detectan disminuciones en el vigor del rebrote o incluso la falta de rebrote en *Fagus sylvatica*. Es posible que muchas especies rebrotadoras estén acercándose al límite de su capacidad de rebrote, proceso que llamamos “síndrome de agotamiento del rebrote”, como apuntan estudios sobre pérdida de resiliencia en ecosistemas dominados por este tipo de especies.

La capacidad de rebrotar depende de cómo de protegidas queden las yemas o los tejidos meristemáticos formadores de yemas, del almacenamiento de carbohidratos no estructurales para nutrir el rebrote hasta que se recupere la capacidad fotosintética y de la disponibilidad de agua y nutrientes. Estudios experimentales exponiendo las plantas a múltiples turnos de quema en un corto período de tiempo muestran limitaciones en las yemas. La sequía prolongada puede disminuir las reservas de carbohidratos, limitando la capacidad de rebrote. Aunque esas reservas rara vez disminuyen por debajo de los umbrales críticos, incluso en sequías extremas, si los árboles dependen de los carbohidratos almacenados para rebrotar, incendios sucesivos, que desencadenan el rebrote con frecuencia, pueden conducir a su agotamiento. Otra hipótesis apunta a la disponibilidad de agua como limitante del rebrote, ya que no puede ocurrir bajo estrés hídrico extremo. Hay datos de agotamiento de rebrotes en arbustos mediterrá-



1 Piña abierta tras un incendio

2 Piñones en el suelo tras un incendio

3 Rebrote de cepa tras un incendio

neos bajo escasez de agua pero no de carbohidratos e incluso de muerte de rebrotes bajo estrés hídrico agudo. Además, la sequía actúa como agente debilitador que aumenta la probabilidad de ataques de patógenos, lo que limita la capacidad de rebrote. La edad de los árboles podría disminuir el vigor del rebrote, especialmente en los más viejos y grandes, debido a las necesidades respiratorias y a cambios hormonales.

RESILIENCIA DE LAS POBLACIONES AL FUEGO

Un incendio de alta intensidad reduce la tasa de supervivencia, generando una mortandad generalizada de individuos en masas de semilladoras. La recuperación de la población de estas especies depende de la capacidad de reclutar nuevos individuos, y ésta de la cantidad de semillas viables disponible tras el incendio, y de la posterior germinación, establecimiento y supervivencia de la plántula.

Disponibilidad de propágulos

La disponibilidad y cantidad de semillas viables en un área quemada es esencial para la recuperación de la población, pudiendo proceder de bancos de semilla *in situ*, que han escapado al daño por calor, o *ex situ*. La disponibilidad de propágulos se ve afectada por diferentes aspectos del régimen de incendios, como la intensidad y severidad del fuego (para bancos *in situ*) o la forma y tamaño de la zona quemada (para bancos *ex situ*). En especies semilladoras, la única fuente disponible de semillas son los árboles supervivientes en márgenes del incendio o rodales no quemados. La recolonización de áreas quemadas depende de la capacidad de dispersión de las semillas y de la extensión y configuración espacial de rodales quemados y no quemados, ya que la dispersión de los pinos está limitada a distancias de hasta 100 m. Una adaptación es la serotinia, una apertura tardía de conos en respuesta al calor, presente en dos especies mediterráneas, *Pinus halepensis* y algunas poblaciones de *P. pinaster* que históricamente han experimentado incendios recurrentes de alta intensidad. El fuego mejora la apertura de las



Regeneración posincendio de *Pinus halepensis*. Sierra de Almirez (Murcia).

piñas serotinas y permite la liberación simultánea de grandes cantidades de semillas en condiciones de ausencia de competencia y alta radiación. Una de las principales limitaciones en la disponibilidad de propágulos es la depredación de las semillas.

Establecimiento de los propágulos

El establecimiento y desarrollo de los propágulos requiere la concurrencia de una humedad adecuada, el suministro de nutrientes, la rotura de la latencia, unas condiciones microclimáticas favorables para la especie, la ausencia de herbívoros y el establecimiento de relaciones simbióticas con hongos micorrícicos. Además requiere que los intervalos de retorno del fuego sean lo suficientemente largos como para permitir que las plántulas se establezcan y conviertan en individuos maduros, de modo que haya nuevas semillas disponibles cuando ocurra el siguiente incendio.

Existen diferentes hipótesis para explicar el establecimiento posterior al incendio. La primera es que el establecimiento de una planta después de un incendio depende de la existencia

de “ventanas de oportunidad”, cuya frecuencia y duración está determinada por múltiples factores como la variación climática intraanual, la cantidad de hojarasca, factores topográficos y edáficos o la densidad de herbívoros. Las ventanas de oportunidades ocurren temporalmente, pero también espacialmente, en lo que se conoce como “sitios seguros”, micrositios que pueden ofrecer protección a las plántulas.

Una segunda hipótesis predice que la supervivencia de las plántulas se debe principalmente a la fecha de establecimiento, de modo que las plántulas que emergen temprano dentro de una ventana de oportunidad tendrán mayor probabilidad de éxito que las que emergen en una etapa posterior, ya que tienen más tiempo para desarrollarse y afrontar la siguiente temporada desfavorable (invierno frío o verano seco) con un sistema de raíces más grande que permita una exploración del suelo más extensa y un tallo más largo y grueso que resista las temperaturas perjudiciales.

La hipótesis de “dependencia de evento” establece que el reclutamiento posincendio de la planta es impul-



A. Enríquez de Salazar

Encinar desarrollado sobre un pinar de *Pinus pinaster* incendiado. Robledo de Chavela (Madrid).

sado por las condiciones ambientales inmediatamente posteriores al incendio. Si, por ejemplo, a un incendio le sigue una sequía intensa, que no permite el establecimiento de plántulas, la combinación de eventos puede dar lugar a que la cobertura de planta sea muy dispersa durante un tiempo prolongado. Por lo tanto las condiciones en el momento del incendio crean un legado a largo plazo que afecta a la dinámica de la comunidad vegetal.

Supervivencia de los propágulos

La supervivencia de las plántulas está determinada por las interacciones entre fisiología de la especie, herbivoría, régimen de fuego, clima y características del sitio. La sequía es a menudo el principal determinante de la supervivencia. Períodos prolongados de escasez de agua conducen a un colapso del xilema y al agotamiento de las reservas de carbohidratos, afectando al flujo descendente a través del floema. Al avanzar la sequía las pérdidas de agua cuticular o residual consumen el agua almacenada en el tallo hasta cruzar los umbrales letales. Las plántulas no pueden recuperarse de una sequía después de

cruzar un cierto umbral de colapso hidráulico del xilema ni después de agotar las reservas de carbohidratos hasta el punto en que la demanda excede de la oferta.

La herbivoría es un desafío adicional para la supervivencia porque el consumo de partes de la planta pone en peligro su supervivencia. Las plántulas tienen un tamaño y capacidad de almacenamiento limitados para resistir la herbivoría, particularmente en condiciones secas que las debilitan. Los incendios de alta intensidad producen un aumento de presión en las plantas que primero rebrotan. Sin embargo, los ambientes posfuego a veces proporcionan condiciones favorables al disminuir la competencia y aumentar la disponibilidad de agua.

Redes de hongos micorrízicos

La mayoría de especies leñosas mediterráneas son ectomicorrízicas obligadas, lo que implica que no pueden completar su ciclo de vida sin establecer una relación simbiótica con hongos ectomicorrízicos. Esto hace que la comunidad de hongos micorrízicos superviviente sea un componente crítico en una zona quemada. Una

comunidad de hongos ectomicorrízicos bien desarrollada, sana y diversa ayuda a los propágulos a germinar y crecer, ya que la red de hifas fúngicas aumenta su acceso al agua y nutrientes. El que esté presente o no una red micorrízica funcional dependerá del tiempo transcurrido desde la presencia de vegetación leñosa, ya que los hongos micorrízicos dependen de las plantas como fuente de carbono y su ausencia prolongada produce un agotamiento de la comunidad fúngica. Si la población de leñosas tarda demasiado en volver a establecerse en el sitio, puede encontrar un “desierto” subterráneo, sin micelio de hongos micorrízicos. Los propágulos de las especies arbóreas germinan y crecen, pero a tasas mucho más reducidas, y son poco competitivos en comparación con colonizadores anuales, lo que complica el establecimiento de los árboles. Los estudios sobre la acción del fuego en los hongos micorrízicos son escasos, pero todo apunta a un efecto negativo.

TRANSICIONES DE ESTADO Y CAMBIOS EN EL DOMINIO DE LA COMUNIDAD

Transiciones a corto plazo

Los bosques mediterráneos están dominados por pinos, germinadores obligados, y fagáceas, rebrotadoras facultativas, en rodales puros o mixtos. Los bosques de fagáceas son más resistentes a los cambios de estado después del fuego, mientras que los dominados por pinos son más propensos a desplazarse hacia bosques de fagáceas o matorrales, sobre todo con alta recurrencia de incendios. Un evento único de fuego puede llevar a un cambio de estado en pinares de montaña de *Pinus nigra* y *P. sylvestris*. Otros pinos como *P. halepensis* y *P. pinea* generalmente se recuperan después de un solo evento de fuego, el primero reclutando semillas almacenadas en sus piñas serótinas y el segundo por su resistencia al fuego y sus semillas protegidas por conos gruesos que aguantan altas temperaturas. Pero es muy probable una transición de estado si ocurre un segundo incendio antes de que los nuevos pinos alcancen la madurez (7-10 años para *P. halepensis*).

El fuego puede mejorar el establecimiento de fagáceas si están presentes en una densidad suficiente en el sotobosque antes del incendio. Se ha documentado el cambio de masas no serotinas de *P. pinaster* a *Q. pyrenaica* cuando las densidades del melojo antes del incendio superaban los 200 pies/ha. Otro estudio señala como los rodales de *P. nigra* fueron reemplazados por *Q. faginea* cuando había una presencia significativa de quejigo en el sotobosque antes del incendio. También están documentadas transiciones de pino a fagáceas en los primeros 15 años después de un incendio de copas de alta severidad.

Una vez que se ha producido una transición de bosque a matorral, la pérdida en la calidad de la materia orgánica del suelo y en la fertilidad, estabiliza el estado no boscoso o matorralización. Esta degradación del suelo se ve reforzada por la sequía, ya que la actividad enzimática disminuye con la escasez de agua y, en consecuencia, disminuyen las tasas de mineralización.

Dinámica a largo plazo

Después de una transición de estado, el ecosistema posterior al incendio puede o no persistir. Tanto los matorrales como los bosques pueden ser “estados estables”, no transitorios dentro de escalas de tiempo ecológicamente relevantes, para unas ciertas condiciones ambientales. Hay indicios de que la sucesión posterior al incendio en matorrales permanece retrasada o detenida. En la cuenca mediterránea hay evidencias, no concluyentes, de una retroalimentación fuego-vegetación; las áreas que se han quemado en el pasado tienen más probabilidades de experimentar nuevos incendios en el futuro.

En una determinada zona puede existir vegetación “pirofítica”, que promueve incendios recurrentes para su mantenimiento, o “pirofóbica”, menos inflamable pero que no persiste en presencia de incendios. Los matorrales pirofíticos tienen arbustos altamente inflamables que acumulan grandes bancos de semillas resistentes al fuego, o con capacidad de propagación vegetativa, que les permite regenerarse rápidamente después de

un incendio. Por el contrario, los bosques de pinos son menos inflamables, pero tienden a desaparecer después de incendios consecutivos. Cabe destacar que la existencia de vegetación pirofítica y pirofóbica es discutida por muchos autores, que consideran que el comportamiento del fuego depende más de factores estructurales (v.g.: de la gestión de la masa) que de la composición específica.

El cambio climático plantea un desafío adicional en la estabilidad a largo plazo de los cambios de estado. Aunque hay bosques de fagáceas establecidos en rodales previamente dominados por pinos, algunas de estas especies pueden estar fuera de su nicho climático a finales de siglo; es el caso de la sustitución de *P. pinaster* por *Q. pyrenaica* señalada anteriormente.

El cambio climático plantea un desafío adicional en la estabilidad a largo plazo de los cambios de estado. Aunque hay bosques de fagáceas establecidos en rodales previamente dominados por pinos, algunas de estas especies pueden estar fuera de su nicho climático a finales de siglo; es el caso de la sustitución de P. pinaster por Q. pyrenaica

Gestión forestal

La gestión forestal ayuda a prevenir la deforestación, creando una estructura de la vegetación con mayor resistencia y resiliencia al fuego y mediante actuaciones posteriores al incendio para evitar la degradación. Por el contrario, las repoblaciones con poca o ninguna intervención pueden tener una gran carga de combustible, con una elevada continuidad horizontal y vertical, y un riesgo elevado de producir incendios de gran intensidad.

Las repoblaciones en España, en el ámbito mediterráneo, introdujeron principalmente especies de coníferas los terrenos degradados, siguiendo el modelo clásico de restauración, con el objetivo en muchos casos que estas masas facilitarían la instalación bajo su cubierta de las frondosas. La colonización de especies rebrotadoras mejora la supervivencia después de un incendio, y puede favorecerse disminuyendo la densidad del pinar cuando ya existen rebrotes en el sotobosque o introduciéndolas si no están presentes. Sin embargo, a veces aumentar la diversidad funcional aumenta la limitación del agua y disminuye la resistencia al estrés hídrico y, al aumentar la complejidad estructural, también se puede favorecer la propagación del incendio a copas. El rebrote puede disminuir después de un estrés hídrico severo, por lo que se requerirán intervenciones que disminuyan la competencia y mejoren el equilibrio hídrico para mejorar la supervivencia.

LAGUNAS EN EL CONOCIMIENTO

Compensaciones en la resistencia a la sequía y al fuego

Los incendios y la sequía coinciden, y la selección natural ha desarrollado soluciones comunes como el rebrote o la germinación inducida por calor. Pero también hay efectos antagónicos, como la senescencia foliar, que disminuye los requerimientos de agua a expensas de una mayor inflamabilidad o la resistencia a la embolia, que se correlaciona negativamente con la resistencia al fuego de copas. Existe una presión selectiva más fuerte para desarrollar resistencia a la sequía que al fuego, por lo que si se producen adaptaciones fisiológicas seguramente prioricen la supervivencia a la sequía y no al fuego.

Nuevos ambientes de fuego

Como consecuencia del cambio global se observan cambios en el régimen de incendios. En zonas de media montaña los incendios superficiales fueron frecuentes en el Holoceno, siendo las especies presentes coníferas semilladoras tolerantes al fuego como *Pinus nigra* o *Cedrus atlantica*. Sin embargo, desde hace unas décadas se dan incendios de copas que pueden



Transición de estado de pinar de *Pinus pinaster* a un matorral de *Genista cinerascens* y *Cistus ladanifer* después de un incendio en 1999. Arriba, izda.: Estado en 1999, antes del incendio. Arriba dcha.: Estado en 2016. Debajo: Estado en 2016. En primer plano, rodal de *Pinus pinaster* que sobrevivió al incendio; al fondo matorral de sustitución del pinar quemado. San Lorenzo de El Escorial (Madrid)

propiciar cambios en la composición de la comunidad o transiciones a especies diferentes de las coníferas. Otra consecuencia del cambio global es la aparición de nuevos ecosistemas inflamables. Aunque hay registros paleológicos de incendios en bosques pirenaicos de *Pinus uncinata* a 1.800 m en intervalos climáticos cálidos, el fuego en alta montaña ha sido insignificante en el pasado reciente; los primeros in-

cendios en bosques de *P. uncinata* en los últimos milenios se han producido en los últimos cinco años. Los modelos advierten también de la posibilidad de ocurrencia de incendios en bosques de coníferas de alta montaña en los Alpes. La aparición de nuevos ecosistemas inflamables es preocupante porque se producen en ecosistemas dominados por especies poco adaptadas al fuego.

Estados estables alternativos

Saber si la transición de un estado boscoso a otro de matorral será estable o transitoria es un desafío. Es necesario considerar procesos estabilizadores y desestabilizadores para lograr predicciones realistas; el cambio climático está provocando el debilitamiento y el declive de los árboles, lo que, puede dar lugar a una menor carga de combustible, el síndrome de

agotamiento del rebrote, aparición de patógenos y plagas o flujos migratorios que proporcionen propágulos adaptados a las nuevas condiciones climáticas.

Evitar la deforestación posterior al incendio a través de la gestión

El manejo previo al incendio debe tener como objetivo disminuir la inflamabilidad de los rodales y la escasez de agua, y favorecer la producción de semillas. Cuando las características ambientales lo permitan se debe incrementar la resiliencia favoreciendo o plantando especies rebrotadoras. Sin embargo se debe estudiar en profundidad el síndrome de agotamiento del rebrote, que podría limitar la utilidad de estas especies. Además, la diversificación debe hacerse tras evaluar los efectos sobre la inflamabilidad de la masa. Después del fuego, la extracción de la madera muerta evita la proliferación de coleópteros y permite su uso como biomasa, pero puede comprometer la regeneración por eliminación de nutrientes y compactación del suelo. Por el contrario, dejar los pies quemados protege el suelo de la compactación, pero complica el manejo posterior al incendio. Una opción intermedia es derribar los pies y dejarlos en el suelo, con o sin retirada parcial de biomasa. La conservación del suelo, la reducción de la erosión y lograr la regeneración deben ser prioritarios en los esfuerzos para disminuir la deforestación posterior al incendio.

CONCLUSIONES

El fuego y la sequía juegan un papel importante en la fisonomía de los ecosistemas mediterráneos. Comprender cómo las características de las plantas afectan tanto a la propagación del fuego como a la recuperación posterior al incendio es un desafío importante. Se ha sugerido que la sucesión de incendios puede mejorar la sostenibilidad de los bosques mediterráneos ya que tras el fuego las plántulas crecen en ambientes libres de competencia, ya que podría servir para rejuvenecer rodales en declive. No obstante, esto sólo puede aplicarse bajo un conjunto limitado de condiciones ambientales, como tasas de erosión limitadas o baja recurrencia de incendios.



Tras un incendio son recomendables actuaciones para favorecer la regeneración. Albarradas de troncos para retener el suelo tras un incendio. Sierra de Cazorla (Jaén)

El cuello de botella para la recuperación posterior al incendio parece estar en las etapas previas al crecimiento de las plántulas, es decir, la disponibilidad de propágulos y el establecimiento temprano de las plántulas. La disponibilidad de propágulos es función de la existencia de bancos de semillas aéreas o edáficos (para bancos *in situ*) y del tamaño de rodal quemado (para bancos *ex situ*). La precipitación posterior al incendio influirá en la supervivencia de los propágulos establecidos de forma temprana. Estas lluvias iniciales tienen un efecto desproporcionadamente grande en el establecimiento temprano, y sus efectos duran varios años. Los cambios fisionómicos y de estado ocurren cuando los individuos sucumben al fuego y la regeneración falla.

Esos cambios posteriores al incendio dependerán de la comunidad vegetal previa al incendio, la sequía (y otros factores ambientales) y el régimen de incendios.

Aún existen importantes lagunas de conocimiento para comprender la dinámica de la vegetación a largo plazo y la estabilidad de las transiciones de estado. Además, el cambio climático puede reducir el espacio potencial de algunas especies de árboles y el aumento de la intensidad de sequías puede favorecer la aparición de plagas de insectos y patógenos. El aumento de la presión climática y el peligro de incendios podrían llevar a los bosques mediterráneos al borde del colapso y la deforestación a gran escala podría ser una realidad a finales del siglo XXI.

REFERENCIAS

Este artículo es un resumen, traducido del inglés, del publicado por los autores en la revista *Ecological Monographs* (2018), *Fire-induced deforestation in drought-prone Mediterranean forests: drivers and unknowns from leaves to communities* (<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ecm.1285/full>). Los derechos de autor del artículo original pertenecen a John Wiley & Sons, Inc. o las compañías del grupo Wiley, contando con licencia de la compañía para la publicación de este resumen en español.

Al tratarse de una revisión sobre la materia de estudio, el artículo original cuenta con un gran número de referencias bibliográficas. Para facilitar su edición en esta revista se ha optado por eliminar las referencias, remitiendo al artículo original anteriormente referenciado para su consulta.