

III Reunión conjunta del Grupo de Trabajo de Repoblaciones Forestales (SECF)  
y el Grupo de Trabajo de Restauración Forestal (AEET)

---

## **Prioridades de restauración de áreas forestales quemadas**

Vega Hidalgo, J.A. \*

*Centro de Investigación Forestal de Lourizán. Consellería do Medio Rural. Xunta de Galicia.  
Apdo. 127, 36080. Pontevedra*

\* *Autor de correspondencia* e-mail: [jose.antonio.vega.hidalgo@xunta.es](mailto:jose.antonio.vega.hidalgo@xunta.es)

---

### **Resumen**

Las áreas forestales de la fachada atlántica del noroeste y centro-oeste de la península ibérica sufren intensamente las consecuencias de los incendios forestales, agravadas por un acentuado riesgo erosivo post-incendio. La situación en Galicia es particularmente grave e ilustra bien la necesidad de realizar acciones para reducir la degradación y pérdida de suelo después de los incendios, en el marco de la restauración de las áreas afectadas. Las proyecciones del cambio climático para Galicia, apuntan a una mayor gravedad de los incendios y sus efectos hidrológicos y erosivos inducidos, augurando un panorama de mayor vulnerabilidad de sus ecosistemas al fuego.

La rehabilitación de emergencia post-incendio constituye la primera y más urgente fase del proceso de restauración, y para ejecutarla resulta esencial disponer de herramientas que permitan priorizar las zonas a tratar. En las líneas que siguen se presenta una guía, orientada a la rehabilitación post-fuego en Galicia, mostrándose también algunos de los resultados obtenidos con tratamientos realizados, a nivel operativo, de mitigación de la erosión en áreas quemadas de Galicia en los últimos años. Esas acciones son fruto de la colaboración entre gestores e investigadores forestales, trabajando para reducir el impacto de los incendios forestales sobre el suelo y favorecer la restauración de las áreas quemadas. Puede considerarse un caso de aplicación de un manejo adaptativo basado en el aprendizaje y la toma en consideración de las condiciones locales.

**Palabras clave:** estabilización de emergencia, incendio forestal, protocolo, rehabilitación, restauración, severidad del fuego.

---

## 1. Introducción

Es bien sabido que el impacto ambiental y socioeconómico de los incendios forestales en Galicia es muy elevado (Carballas, 2003; Díaz-Fierros y Baamonde, 2006; Barrio *et al.*, 2007; Díaz-Fierros *et al.*, 2007; Vega, 2007; Vega y Fernández, 2007; Carballas *et al.*, 2009; Barrio y Loureiro, 2010). Su contribución al número de fuegos forestales y superficie quemada, en el total de nuestro país, es notoriamente alta (Ministerio de Agricultura, 2012). Galicia es, junto con el N de Portugal, el territorio de la península ibérica y de la Unión Europea que sufre un mayor impacto de los incendios forestales (San Miguel *et al.*, 2012). Desde la perspectiva de restauración post-incendio, en Galicia confluyen un conjunto de circunstancias que hacen que esa tarea presente características específicas. Por un lado, sus condiciones climáticas son bastante favorables a la recuperación de la vegetación quemada, dadas su relativamente abundante precipitación y moderadas temperaturas (Martínez-Cortizas y Pérez-Alberti, 1999). Sin embargo, a la vez posee rasgos que hacen que las consecuencias ecológicas de los incendios sean frecuentemente más graves que en otras partes de España, particularmente desde el punto de vista de sus efectos en el suelo. El elevado crecimiento de la biomasa en esta Comunidad, junto con cubiertas orgánicas superficiales del suelo bien desarrolladas (Xunta de Galicia, 2001; Ministerio Agricultura, 2011), generan fuertes acumulaciones de combustible (Vega *et al.*, 2013a ). Esto propicia incendios con gran capacidad de impacto en la vegetación y sobre todo en el suelo (*Figura 1*). Las condiciones climáticas en el verano facilitan bajos conteni-



**Figura 1.** El incendio forestal crea un mosaico de niveles de afectación a la vegetación y al suelo. Incendio de Ponte Caldelas 2013.

dos de humedad de la cubierta orgánica y del suelo superficial, especialmente en la parte oriental de la región (Vega *et al.*, 2009a). Esto, unido a los altos contenidos de Carbono en sus suelos forestales (Bará y Toval, 1983; Macías *et al.*, 2004; Calvo de Anta *et al.*, 2015, 2014; Rodríguez-Lado y Martínez-Cortizas, 2015) provoca combustiones de rescoldo muy duraderas originando niveles elevados de severidad en el suelo que favorecen, posteriormente, la erosión hídrica del suelo (Figura 2).



**Figura 2.** Niveles de severidad del fuego en el suelo: alto (izquierda) y muy alto (derecha).

Además de la pendiente, un factor muy decisivo para el riesgo de erosión y aumento de escorrentía tras los incendios forestales en Galicia es la existencia de un clima con una alta agresividad potencial de la lluvia, especialmente en su fachada atlántica (Díaz-Fierros *et al.*, 1987; Ministerio de Agricultura, 1988; Ministerio de Medio Ambiente, 2005). En las cuencas hidrográficas de Galicia, existe una agresividad media anual potencial de la lluvia de casi el doble (82% más alto) que la media de las restantes cuencas españolas (García-Barrón *et al.*, 2015). Después del fuego, este hecho incrementa el riesgo de procesos erosivos y de generación de escorrentía superficial. Entre un 60 y 70% de la lluvia anual se recoge entre noviembre y abril, coincidiendo en gran parte con los primeros meses después de los incendios de verano.

En ausencia de fuego, el alto contenido de materia orgánica de la mayoría de los suelos forestales gallegos explica en gran medida su buena estabilidad estructural, capacidad de infiltración y resistencia a la erosión (e.g. Benito y Díaz Fierros, 1992; Díaz-Fierros y Benito 1991). Sin embargo, cuando se produce la combustión de esa abundante materia orgánica, la estabilidad de agregados y la repelencia al agua sufren fuertes alteraciones (e.g. Díaz-Fierros *et al.*, 1994; García-Corona *et al.*, 2004; Benito *et al.*, 2009, 2014; Varela *et al.*, 2005, 2010a, 2010b; Rodríguez-Alleres *et al.*, 2005; 2012). Esto, unido a la destrucción de la vegetación y cubierta orgánica del suelo, explican las frecuentes altas tasas de erosión medidas después de incendios en Galicia (e.g. Díaz-Fierros *et al.*, 1982; Vega *et al.*, 1982, Soto y Díaz-Fierros, 1998; Vega y Fernández, 2010; Fernández *et al.*, 2011, 2015, 2016). De hecho, esos valores de erosión después de incendios son los más altos de la península ibérica (Mataix y Cerdá, 2009).

La escorrentía superficial se ve modificada drásticamente después del fuego, por la eliminación de la interceptación, fuerte disminución de la evapotranspiración, aumento de la repelencia al agua y disminución de la rugosidad. En zonas de matorral quemado ligeramente se han medido solo aumentos entre 1,6 y 2,1 veces (Díaz-Fierros *et al.*, 1990; Soto *et al.*, 1993, 1994; Vega *et al.*, 2005) pero esta cifra creció hasta 15 veces en el caso de un incendio en un pinar con la copa soflamada y hasta 35 veces en un fuego de copa de pinar (Vega *et al.*, 1982, 1986). A nivel de cuenca hidrográfica la respuesta del flujo de agua suele ser menor, especialmente cuando la vegetación rebrota con rapidez. Así, en una cuenca de *E. globulus* en Galicia, quemada con intensidad moderada, ese aumento fue del 65% el primer año después del incendio (Fernández *et al.*, 2006, 2011). Sin embargo, con un régimen de precipitación abundante e intensa la posibilidad de desbordamientos y riadas es muy pronunciada en muchas zonas gallegas. Caudales punta de 22 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> han sido estimados en pequeñas cuencas quemadas (Álvarez *et al.*, 2000) y todos tenemos presentes las graves inundaciones y daños estructurales, económicos y ambientales producidos en las zonas afectadas por las riadas posteriores a los incendios de 2006 (Fra, 2010).

En resumen, después del incendio se produce en Galicia una “ventana de perturbación”, corta en el tiempo, pero muy eficaz para originar daños por erosión y alteración del régimen hídrico, ya que a las razones señaladas se une la escasa cobertura vegetal presente en esos meses siguientes al incendio (Casal *et al.*, 1984, 1990; Casal, 1985, 1987). De hecho, aproximadamente el 80% de la erosión producida en el primer año tras el fuego tiene lugar en los seis primeros meses después de aquel (Vega *et al.*, 2013b).

Las estimaciones climáticas para los próximos decenios en Galicia indican un incremento de la temperatura media anual, especialmente en los meses de primavera y verano (Cruz *et al.*, 2009; Álvarez *et al.*, 2011, 2012). Las precipitaciones parecen disminuir en primavera y verano, particularmente en el interior de Galicia. Para el otoño, los primeros estudios (Cruz *et al.*, 2009) sugerían aumentos de precipitación en la fachada atlántica oeste y concentrada en menos días. Otras modelizaciones más recientes (Álvarez *et al.*, 2011, 2012) muestran un panorama más incierto. Por otro lado, se ha documentado en los últimos cincuenta años (Vega *et al.*, 2010a, b) una disminución muy marcada de la humedad del mantillo forestal, en el verano, para la zona oriental de la región. Según todo lo anterior cabe esperar incendios más intensos en el futuro, con rescoldos más duraderos, que generen fuegos de mayor severidad de daño al suelo. Todo ello apunta a un incremento del riesgo de erosión post-incendio. Sin embargo, no disponemos todavía, a nivel mundial ni local, de modelos apropiados que conecten las repercusiones del cambio climático con las respuestas erosivas e hidrológicas tras incendio (Moody *et al.*, 2013).

Las líneas que siguen muestran, primeramente, el contexto y finalidad de la estabilización de emergencia de áreas forestales quemadas. A continuación se presenta, brevemente, un protocolo-guía, desarrollado conjuntamente por varios grupos de investigación de Galicia (Vega *et al.*, 2013 b) y diseñado para servir de ayuda en la planificación y ejecución de esas acciones urgentes tras un incendio forestal. Se comentan también, algunos resultados de la experimentación con tratamientos de esta-

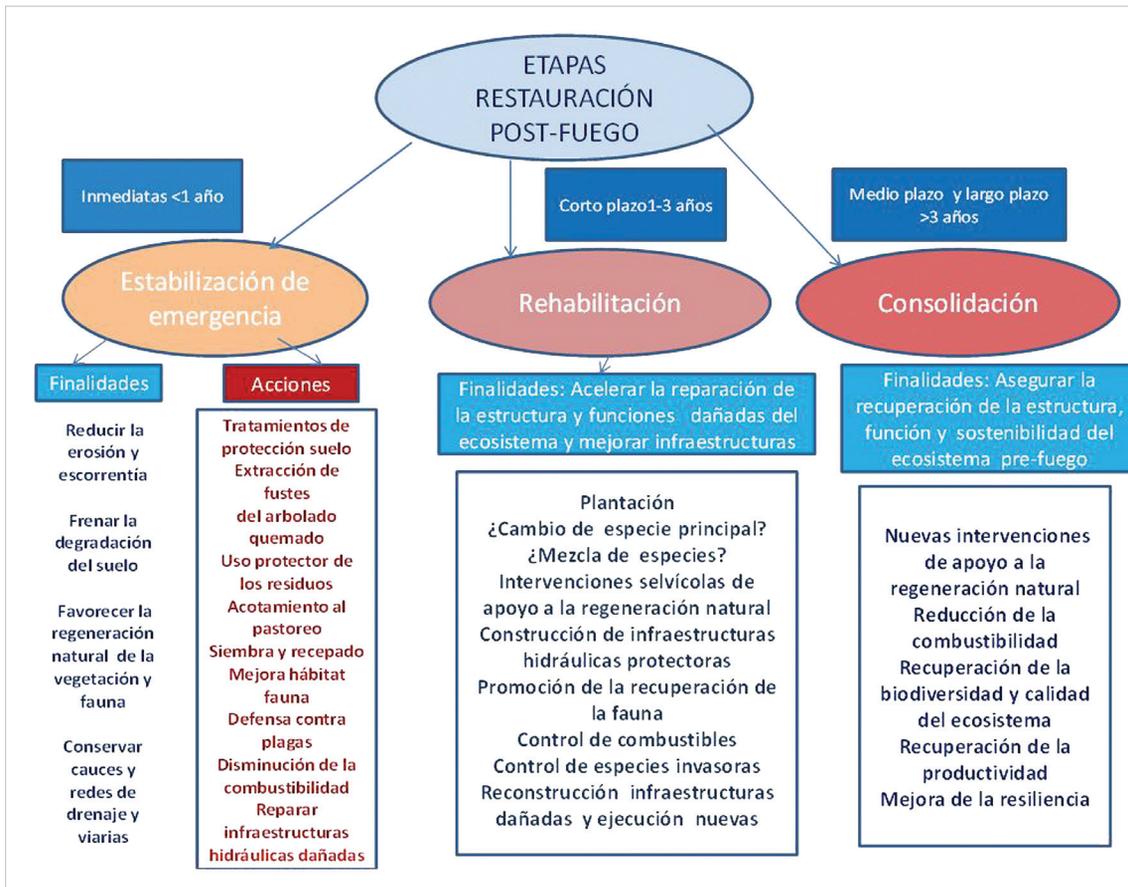
bilización del suelo quemado para dar respuesta a problemas concretos de rehabilitación, a escala operativa, de terrenos quemados.

## **2. La rehabilitación de emergencia: primer paso de la restauración post-incendio**

Después de la extinción del incendio, procede realizar un diagnóstico de la situación creada y decidir si la intervención en el área quemada será necesaria para paliar los efectos negativos del fuego, acelerar la recuperación del sistema hasta su situación inicial, o instalar una nueva especie, o si, por el contrario, no se requiere ninguna acción. En ese proceso pesa en gran medida la evaluación del riesgo de pérdidas del suelo de suficiente entidad. Se da preferencia al suelo por ser el componente más primario y esencial del ecosistema, del que dependen en gran medida su estructura, funcionalidad y capacidad de prestación de servicios, y por tratarse de un recurso no renovable, en términos de la duración de la vida humana. En ese sentido, será preciso:

1. Evaluar el impacto del fuego en las cuencas quemadas.
2. Decidir si es necesario llevar a cabo medidas para reducir el riesgo hidrológico-erosivo post-incendio.
3. En su caso, priorizar esas acciones, esto es, cuándo, dónde y qué tipo de acciones resultan más convenientes realizar. Nótese que nuestra aproximación, está, por tanto, a medio camino entre la restauración ecológica y la bioingeniería, y participa de un enfoque mixto del problema. Algo, por cierto, en sintonía con el espíritu de la III Reunión conjunta SECF-AEET, Lugo 2015. En definitiva, abordar un problema real de restauración causada por una perturbación del ecosistema forestal desde una aproximación multidisciplinar.

El conjunto de acciones primeras a acometer para revertir esa situación reciben el nombre de *estabilización de emergencia* post-fuego, en la terminología anglosajona, y conviene sean ejecutadas con la mayor rapidez posible tras el incendio. Van orientadas, fundamentalmente, a fijar el suelo del área quemada, como sustrato clave del ecosistema afectado, dificultando su movimiento y frenando en lo posible su degradación, al tiempo que favorecen la regeneración natural, tanto de la vegetación como de la fauna. En esta etapa se plantean otras medidas, como el acotado al pastoreo, por sus conocidos efectos negativos en la primera fase del establecimiento de la regeneración de las especies forestales y también en el suelo. Junto a ello se trata de proteger otros recursos naturales y/o infraestructuras dentro y fuera del área quemada de los posibles daños causados por un previsible aumento de la escorrentía y erosión que puedan originar crecidas y desbordamientos. Por ello se presta también atención preferente a la red de drenaje, incluyendo el despeje de elementos que puedan entorpecer los cursos del agua. Se incluyen las actividades de corta y extracción de los fustes del arbolado quemado, cuando proceda, y la utilización de los residuos generados para la protección del suelo. Esas acciones constituyen típicamente la primera etapa de la restauración post-incendio (*Fig. 3*) y desde el punto de vista de la



**Figura 3.** La estabilización de emergencia en el marco de la restauración post-incendio.

restauración ecológica son, sobre todo, una *remediación* (se prima la mitigación de un problema: la erosión) y, con frecuencia, orientadas a una *reconversión* (*sensu* “*reclamation*”), esta última dirigida generalmente a buscar la estabilización de un paisaje pre-fuego y facilitar tareas posteriores. Esto es especialmente frecuente en el caso de masas procedentes de una reforestación realizada principalmente con una utilidad productiva, típica de los montes de propiedad privada (sea vecinal en mano común o particular) de Galicia, que como es sabido representan más del 95% de los de esa Comunidad. Si bien, en las tareas de rehabilitación, acometidas posteriormente, puede decidirse un cambio de especie forestal. No hay que olvidar que la consideración de los aspectos socioeconómicos es uno de los elementos principales a incluir en la planificación de cualquier restauración que quiera perdurar en un determinado contexto sociocultural (Aronson *et al.*, 2007; Clewell and Aronson, 2013).

En términos generales, las tareas a realizar están condicionadas por una serie amplia de factores, tales como las características del área recorrida por el fuego (tamaño, tipo de suelo, vegetación), clima, severidad del fuego en el suelo y vegetación, valores en riesgo y su vulnerabilidad, incluyendo aspectos técnicos, socioeconómicos, culturales y logísticos.

Las acciones de rehabilitación siguen a las de esa primera etapa inicial, y tienen lugar en un plazo todavía bastante corto tras el fuego (*Fig. 3*) Pretenden, básicamente, acelerar la reparación de las funciones del sistema dañado. De uno a tres años después del incendio, es posible tener ya certeza sobre si la regeneración natural se ha producido, si la siembra realizada ha sido efectiva o si el recepado acometido está cumpliendo su cometido. Es el momento de plantearse qué especie o especies pueden implantarse, si se desea un cambio de las preexistentes, y producirse las primeras intervenciones selvícolas de apoyo a las especies forestales regeneradas por semilla, si la regeneración se ha producido satisfactoriamente, ya que el recepado de las especies arbóreas rebrotadoras se habrá abordado en los primeros meses post-fuego. Si la cuenca afectada presenta una fuerte torrencialidad, se acometen obras hidráulicas de corrección y defensa de las zonas externas al área quemada, y complementarias de las efectuadas en la primera fase. Se insiste en la mejora del hábitat de la fauna y se facilita su recuperación, entre otras acciones. Finalmente, en una perspectiva temporal más amplia, la fase de consolidación de la restauración se caracteriza por afianzar la recuperación de la composición, estructura y funcionamiento del ecosistema y asegurar su sostenibilidad (*Fig. 3*), y su tiempo puede ser muy variable.

Conviene destacar que, en Galicia y en otras partes de España, existe una larga experiencia en el uso de diversas técnicas de restauración hidrológico-forestal (restauración *sensu lato*) de terrenos degradados, incluyendo los quemados (véase Ministerio Agricultura, 1992; Mintegui, 1989; Mintegui *et al.*, 1993; López Cadenas 1994; Del Palacio *et al.*, 1999, 2013; Catalina y Vicente, 2002; Serrada *et al.*, 2004; Costa *et al.*, 2006). Con todo, la implementación de las actividades de estabilización de emergencia de zonas quemadas a la que nos estamos refiriendo, supone, de hecho, un cambio con relación al enfoque, plazos y técnicas que se han venido empleando tradicionalmente en las labores de restauración mencionadas. La principal diferencia es que la estabilización va dirigida fundamentalmente a proteger el suelo mismo, de forma directa, en el menor tiempo posible después del incendio. La aproximación más clásica se basa, principalmente, en una protección del suelo más indirecta, mediante la construcción de albarradas y/o fajinas en las laderas para retener, a cierta distancia, los sedimentos generados tras la remoción de las partículas de suelo por la lluvia y su arrastre por escorrentía. En cuencas de régimen torrencial, estas acciones se completan con la construcción de infraestructuras hidráulicas transversales, bien provisionales (empalizadas de troncos o albarradas de piedra), en los cauces de regueros y arroyos tributarios primarios, o bien permanentes (diques de diferentes tipos y materiales) en cursos de agua de mayor orden. Esas barreras transversales provisionales de los cauces persiguen disminuir la energía del agua y servir de depósito a los sedimentos producidos. Con los diques, se pretende retener los acarrees sólidos de cierto tamaño, reduciendo así el riesgo dramático de avenidas aguas abajo y consolidar los pies de laderas inestables. También actúan atrapando sedimentos finos, impidiendo su salida de la cuenca. Sin embargo, estas obras no evitan, estrictamente, la pérdida de suelo en las laderas, causa principal de su degradación. Por otro lado, estas últimas obras requieren un periodo mayor de ejecución, perdiéndose así un tiempo irrecuperable, poco después del incendio, cuando la vulnerabilidad del suelo



**Figura 4.** Los fuegos de copa dejan áreas con el suelo desnudo, expuesto a la energía de la lluvia, y por tanto requieren especial atención.

quemado a la erosión es mayor. Con la combinación de las dos aproximaciones se consigue una complementariedad de las acciones de mitigación que se emplean conjuntamente aunque en momentos diferentes. Las técnicas de protección directa del suelo usan acolchados o mulches formados generalmente de residuos vegetales extendidos sobre aquel que reducen el impacto de la lluvia y aumentan la rugosidad en la ladera, dificultando el arranque de partículas de suelo y su transporte. Son particularmente útiles en las zonas afectadas por fuego de copas (*Fig. 4*) donde el suelo queda desnudo tras el incendio, mientras en las zonas donde el arbolado ha sufrido un soflamado de la copa se genera una capa de hojarasca que protege el suelo de forma muy efectiva (*Fig. 5*). Ello no implica que la construcción de barreras y diques, en áreas propensas a fenómenos torrenciales, siga siendo imprescindible (Prochaska *et al.*, 2008; Ruiz y Luque, 2010).

### 3. Planificación de actividades de emergencia post-incendio

El factor más crítico en las acciones mencionadas es la rapidez en la toma de decisiones y en su ejecución. Si una cuenca quemada presenta un elevado riesgo erosi-

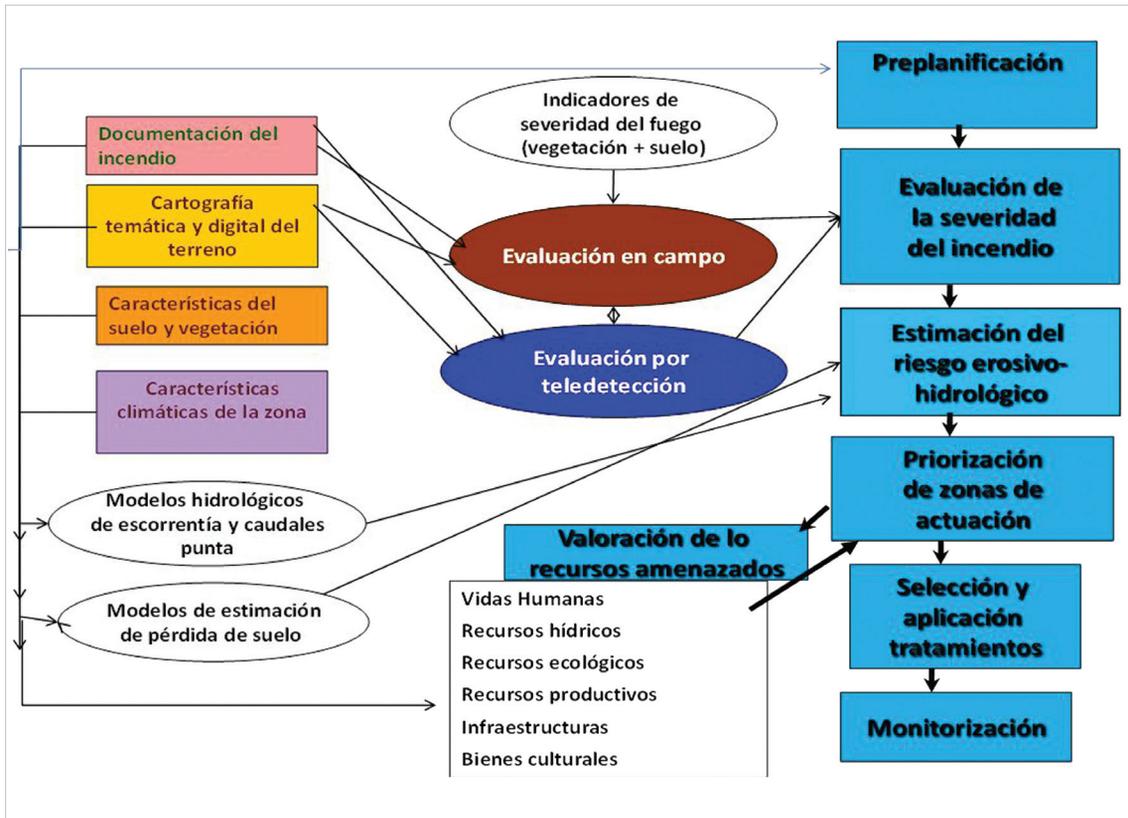


**Figura 5.** Las masas forestales con la copa soflamada generan una capa de hojarasca que protege el suelo de forma muy efectiva.

vo-hidrológico, la eficacia de los tratamientos de estabilización corre pareja con la inmediatez de su ejecución (Robichaud, 2009). En áreas geográficas como Galicia, el tiempo de respuesta disponible es particularmente corto. Consecuentemente, la actuación con la mayor prontitud posible es lo más aconsejable. Eso no quiere decir que no sea necesario un análisis previo de la situación creada por el incendio, un diagnóstico de las posibilidades de recuperación del sistema sin intervención y una planificación de las actividades a realizar, si estas últimas son precisas.

La organización de la respuesta de emergencia post-incendio es una tarea relativamente compleja, requiriendo datos de diversas fuentes e implicando la realización de una serie de acciones, por lo que su sistematización en protocolos y guías específicos resulta particularmente útil. Es por ello que en los últimos años esa actividad está recibiendo mucha atención a nivel nacional e internacional. En nuestro país se han desarrollado, en ese periodo, una variedad de trabajos orientados a ese fin (e.g. Costa *et al.*, 2006; Serrada *et al.*, 2006; Hernández y Romero, 2008; Pérez-Cabello *et al.*, 2011; Alloza *et al.*, 2013; Hernández, 2014; Vallejo y Alloza, 2014), incluyendo desde criterios, orientaciones y recomendaciones hasta protocolos y guías. La mayoría de ellas se han centrado en los ecosistemas mediterráneos. Un grupo de investigadores de Galicia ha desarrollado (Vega *et al.*, 2013b) un protocolo-guía más adap-

tado a las condiciones específicas de la España húmeda, que, lógicamente, comparte también numerosos puntos con los mencionados. Recoge también la experiencia de investigación ad hoc realizada durante los diez últimos años y la de trabajos de campo, a escala real, dedicados a la mitigación de los efectos hidrológico-erosivos tras los incendios en esa región. En la *Fig. 6* se muestra la secuencia de etapas que se está utilizando actualmente en Galicia.

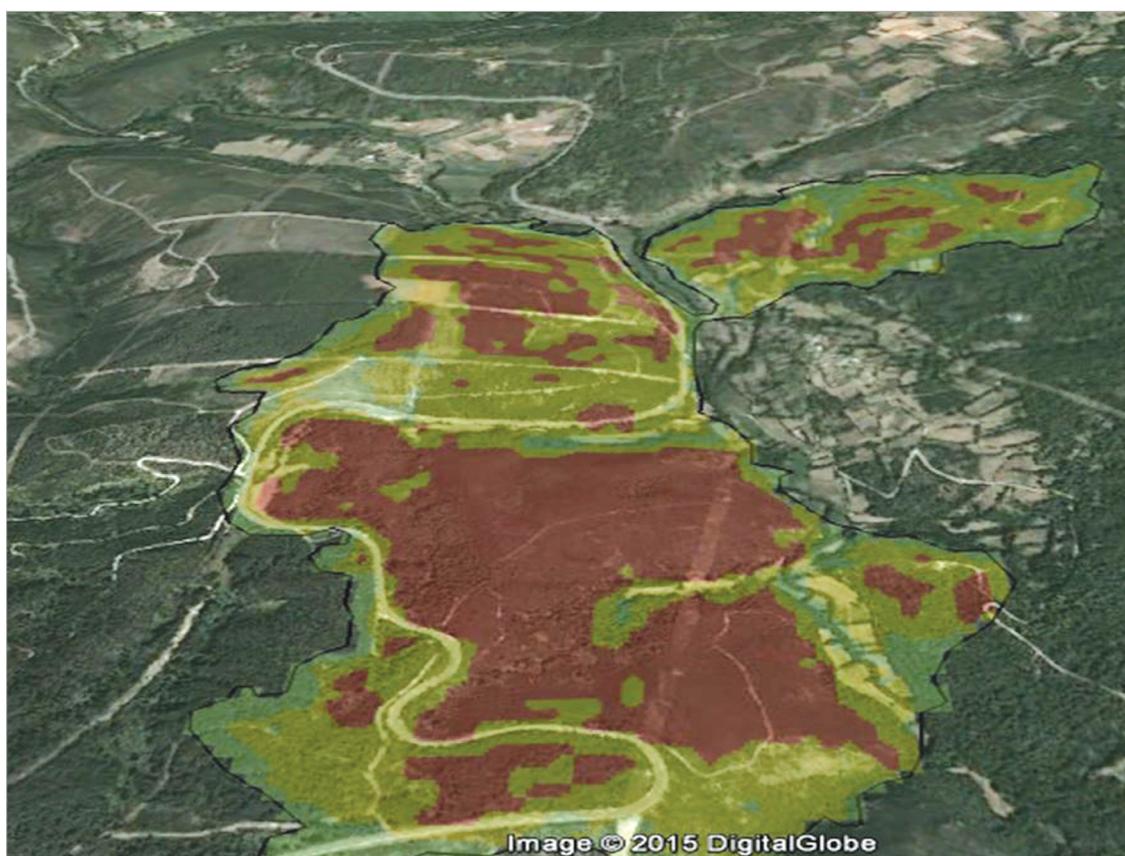


**Figura 6.** Etapas en la planificación de actividades de estabilización de emergencia y rehabilitación de áreas quemadas en Galicia.

Dentro de ese esquema, la evaluación de la severidad del incendio, o nivel de perturbación causado por el fuego en suelo y vegetación, es una etapa crucial del proceso, ya que sus respuestas están fuertemente influenciadas por la distribución espacial de esa variable. Esto es particularmente acusado para la erosión y la escorrentía. Aunque la investigación sobre la cuantificación de la severidad del fuego progresa a buen ritmo, no existe por ahora un procedimiento que automatice su determinación y cartografiado y generalmente precisa un trabajo combinado de campo y satélite para obtenerla en los incendios de cierto tamaño. Para abordar su evaluación a nivel operativo, de campo, se han propuesto diferentes indicadores del nivel de daño sufridos por el suelo y la vegetación (e.g. Key y Benson, 2006; Parsons *et al.*, 2010). Para Galicia se ha desarrollado una tipología sencilla de niveles de daño en el suelo (Vega *et*

*al.*, 2013c) que está ofreciendo buenos resultados, tanto a nivel operativo, por servir de orientación sobre la magnitud de la posible erosión post-incendio producida (Fernández *et al.*, 2011, 2013; Vega *et al.*, 2014, 2015; Fernández and Vega, 2016), como por reflejar razonablemente niveles de alteración de propiedades edáficas relevantes (Vega *et al.*, 2013c; Merino *et al.*, 2014, 2015).

El uso de imágenes de satélite ofrece una información de utilidad sobre la severidad del fuego (*Fig. 7*), sobre todo en grandes incendios, o en áreas de difícil acce-

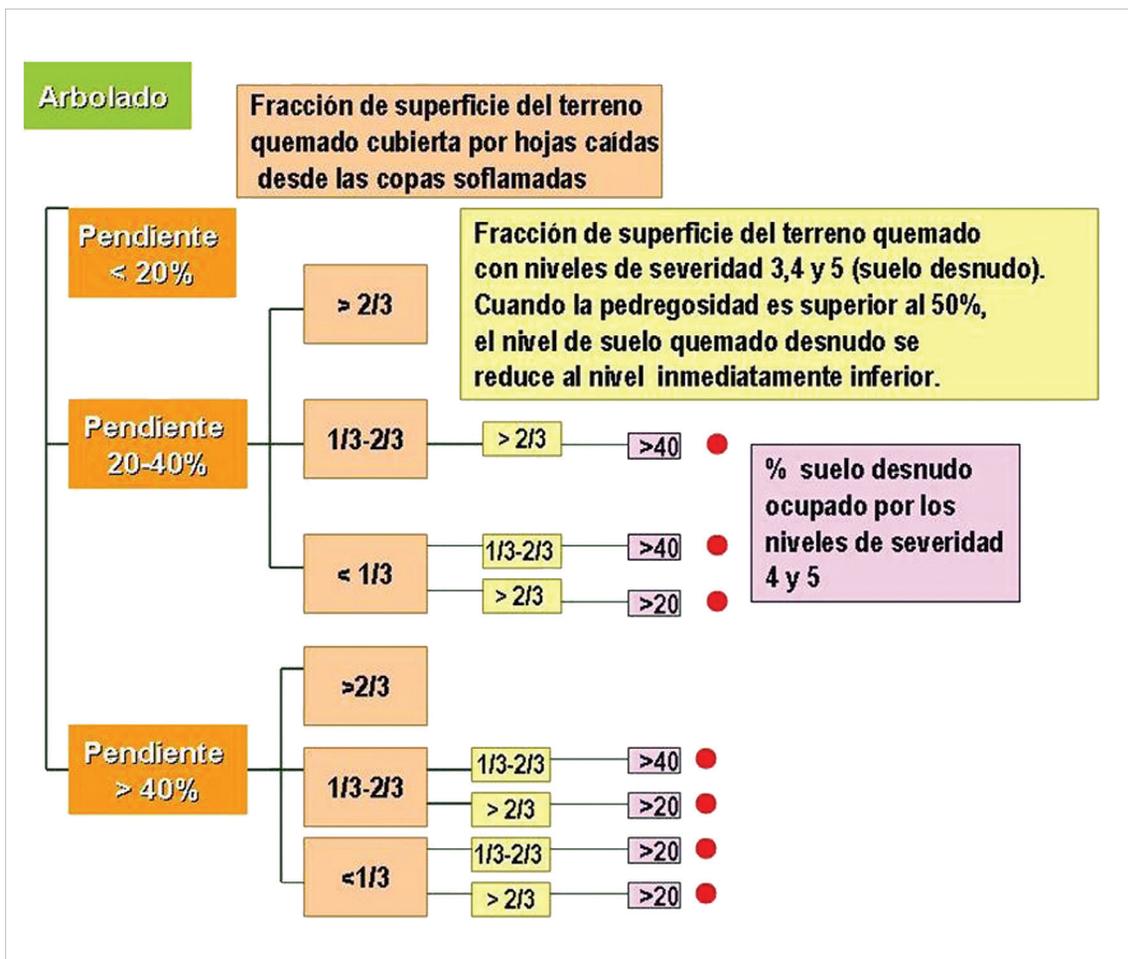


**Figura 7.** Imagen mostrando diferentes niveles de severidad del fuego (dNBR), a través del satélite Landsat, en el incendio de PradoCabalos (Ourense) 2015.

so. Se genera a partir de imágenes multispectrales de satélites como Landsat, permitiendo obtener índices como dNBR y rdNBR, usados para establecer mapas provisionales de severidad. Recientemente, Arellano (2014) ha determinado una relación para Galicia, entre los niveles de dNBR y rdNBR y el indicador de campo de severidad del fuego CBI (Key y Benson, 2006). Esos mapas, no obstante, tienen que validarse con información recogida en campo, ya que, por ahora, la severidad del fuego en el suelo no es adecuadamente reflejada por ninguno de esos indicadores. El resultado es la obtención de un mapa de distribución de la severidad del fuego en el suelo que, unido a la información topográfica, de daño a la vegetación e histórica de la pre-

cipitación, sirve como dato de entrada para determinar el riesgo de pérdidas de suelo y de aumento de escorrentía.

Para estimar las pérdidas de suelo se emplean generalmente dos aproximaciones. La primera, proporciona una estimación preliminar basada en índices o árboles de decisión, que categorizan ese riesgo, en función de factores influyentes en el proceso a nivel local (e.g. Fox, 2009; Vega *et al.*, 2013b). Un ejemplo del uso de esos medios aparece en la *Fig 8*. La segunda, más elaborada, usa modelos predictivos empíricos y físicos de procesos para estimar las cantidades de suelo quemado que pueden ser erosionadas en períodos de tiempo determinados. Existe una buena cantidad de ellos, por ejemplo: RUSLE (Renard *et al.*, 1997), WEPP (Nearing *et al.*, 1989), EUROSEM (Morgan *et al.*, 1998), PESERA (Kirby *et al.*, 2008). Casi todos presentan limitaciones cuando se aplican a sitios quemados. La principal es que no tienen en cuenta los cambios producidos en las propiedades del suelo por el fuego. Aun así, resultan útiles para establecer una gradación relativa de la posible erosión y ayudar a determinar las áreas prioritarias de actuación. Recientemente, Fernández and Vega (2015) han



**Figura 8.** Árbol de decisión para evaluar el riesgo erosivo post-incendio en zonas arboladas, con rangos críticos de factores influyentes en el proceso, adaptado de Vega *et al.* (2013b).

elaborado un modelo empírico de estimación de las pérdidas de suelo, para el primer año post-incendio, en Galicia.

En cuanto al riesgo hidrológico, el número de modelos disponibles para la estimación de la escorrentía y caudal punta es también bastante elevado. Foltz *et al.* (2009) han revisado las ventajas y limitaciones de las aproximaciones de simulación más empleadas por los equipos de rehabilitación de suelos quemados (BAER) en los Estados Unidos. Todos ellos presentan la desventaja de haber sido poco testados en áreas quemadas.

La determinación de la probabilidad de ocurrencia de riadas y flujos de restos después de incendios ha recibido en los últimos años un importante impulso (e.g. Cannon y Gartner, 2005; Cannon *et al.*, 2008, 2010, 2011; Der Gaff, 2014) y se han desarrollado modelos que estiman las condiciones de precipitación y topografía que propician esos fenómenos en diferentes áreas de los Estados Unidos (e.g. Kean *et al.*, 2012; Gartner *et al.*, 2015). De hecho, está disponible una página web: [landslices.usgs.gov/hazards/postfire\\_debrisflow](http://landslices.usgs.gov/hazards/postfire_debrisflow) donde el gestor puede estimar la probabilidad de producirse un evento de ese tipo para distintas zonas de ese país. También en Australia se ha avanzado notablemente en esta temática (Nyman *et al.*, 2015) En Europa la información disponible sobre el tema es más reducida. Aunque está operativo el Sistema Europeo de alerta de inundaciones (EFAS) que trabaja sobre el modelo desarrollado por el JRC (Joint Research Centre, 2014) para predecir la probabilidad de inundaciones en el ámbito europeo (e.g. Alfieri *et al.*, 2013; Alfieri *et al.*, 2014) y el JRC también ha desarrollado el sistema europeo de información sobre fuegos forestales (San Miguel *et al.*, 2012), todavía no está disponible un sistema que prediga el riesgo hidrológico post-incendio que tenga en cuenta los cambios edáficos producidos.

#### **4. Priorización de las áreas a rehabilitar**

Establecer las prioridades de actuación en la rehabilitación de emergencia de áreas quemadas resulta muy necesario por varias razones. En primer lugar, no toda la superficie quemada se ve afectada en un grado que requiera un tratamiento de mitigación. Además, la mayoría de las especies vegetales de Galicia presentan un grado notable de resiliencia al fuego. De hecho, la mayor parte de ellas poseen mecanismos de regeneración adaptados al fuego y las condiciones climáticas ayudan a una rápida regeneración de la vegetación dañada. Esto último también puede ser extendido a la mayor parte de las especies arbóreas.

Con la escasez presupuestaria actual no se dispone de los recursos necesarios para atender a todas las necesidades surgidas tras la acción del fuego. Por otra parte, la urgencia de las acciones demandadas y la pérdida de eficacia de las mismas con el tiempo transcurrido desde el fuego impelen también a establecer con rapidez unas prioridades en las acciones a desarrollar.

Actualmente, se va haciendo necesario además establecer una buena justificación de las actuaciones a ejecutar en esta materia desde una perspectiva de coste-benefi-

cio. Esto implica la inclusión de métodos robustos y objetivos de evaluación de los valores en riesgo. Desafortunadamente no existe una metodología plenamente desarrollada para establecer su cuantificación, aunque algunas herramientas van estando disponibles (Calkin *et al.*, 2007).

Uno de los aspectos de la priorización de actuaciones de emergencia post-incendio que necesita más desarrollo es la determinación de la vulnerabilidad de los recursos amenazados. Aunque el concepto de vulnerabilidad está siendo cada vez mejor aproximado (Cutter *et al.*, 2003; Williams *et al.*), todavía falta una unificación de su contenido y sobre cómo evaluarla, y esto es extrapolable al contexto hidrológico-erosivo. Al margen de ello, los modelos hidrológicos espacialmente distribuidos, aplicados a las condiciones pre y post-fuego, representan una ayuda muy importante para la priorización de las actividades de mitigación (e.g. Beeson *et al.*, 2001; Pérez-Cabello *et al.*, 2006) porque permiten cartografiar las zonas de mayor vulnerabilidad erosivo-hidrológica dentro de la cuenca.

## 5. Mitigación de la erosión post-incendio

La selección de tratamientos de estabilización de emergencia debe basarse en criterios de eficacia, costes y logística, además de la reducción de sus posibles efectos no deseados, dando prioridad a las laderas, usualmente la mayor fuente de sedimentos (Napper, 2006). Aunque se han usado durante años diferentes tratamientos, paradójicamente, la información sobre su eficacia para limitar las pérdidas de suelo por erosión en sitios quemados no ha estado disponible hasta la década de los 2000 (Robichaud *et al.*, 2010). Desde esa fecha se ha producido una amplia información sobre esta temática. Un análisis detallado de la misma muestra que, hasta no hace mucho, la evaluación de la eficacia estaba basada en la recuperación de la cubierta vegetal en lugar de en la reducción en la producción de sedimentos (Robichaud *et al.*, 2000). Durante años, la siembra de herbáceas ha sido el tratamiento más usado, debido a su bajo coste y a la posibilidad de tratar extensas zonas en poco tiempo. Sin embargo, se ha comprobado posteriormente que su eficacia es generalmente muy baja (Beyers, 2004; Peppin *et al.*, 2011; Vega *et al.*, 2014, 2015) y en algunos casos baja (Pinaya *et al.*, 2000; Díaz-Raviña *et al.*, 2012). Igualmente, las fajas de material vegetal y las barreras de troncos presentan una eficacia de retención de sedimentos reducida (e.g. Fernández *et al.*, 2011; Wohlgemuth, *et al.*, 2006; Robichaud *et al.*, 2008a, 2008b; Robichaud *et al.*, 2010; Fernández and Vega, 2016). La investigación sobre este tema llevada a cabo en los últimos años ha sido decisiva para cambiar la perspectiva sobre la elección de tratamientos, al mostrar que la cubierta del suelo el factor más importante para controlar la erosión post-incendio en las laderas y, por tanto, los tratamientos de acolchado o mulching han ido ganando aceptación en los últimos años en comparación con otras alternativas menos eficaces.

En Galicia, la colaboración entre gestores e investigadores ha acelerado la experimentación con diferentes técnicas de estabilización del suelo y ayudado a desarrollar una metodología de trabajo específica. Desde 2006, cuando se efectuaron una



**Figura 9.** El uso de helicóptero para la dispersión de paja de cereal (helimulching) permite tratar en poco tiempo superficies quemadas considerables. (Incendio de Ponte Caldelas, Pontevedra, 2013).

serie de ensayos por parte de los gestores (de la Fuente y Blonde, 2010) y se diseñaron los primeros experimentos sistemáticos con mulching de paja y astilla (Fernández *et al.*, 2011), las mejoras se han ido produciendo de forma continuada.

La aplicación de mulch de paja de cereal desde helicóptero, efectuada por primera vez en Europa en áreas incendiadas de Galicia, en 2010, ejemplifica quizá ese rápido avance (*Fig. 9*). Esos experimentos han demostrado que también en un clima agresivo es un sistema factible, rápido y eficaz, aunque asimismo presenta limitaciones debidas a la acción del viento, pendiente, coste y riesgo de introducción de semillas de especies alóctonas. Igualmente, la aplicación desde tierra es también muy eficaz. Reducciones de entre el 66 y 95% de la erosión producida tras incendios en Galicia se han medido en diferentes estudios y ensayos de campo con mulch de paja de trigo (*Fig. 10*) o de corteza desfibrada (Fernández *et al.*, 2011; Díaz-Raviña *et al.*, 2012, Fernández y Vega, 2014; Vega *et al.*, 2014, Vega *et al.*, 2015), si bien en otras ocasiones su eficacia ha sido menor (Robichaud *et al.*, 2013 a). El mulching de astilla, con muy baja cantidad, ha resultado ser poco eficaz en Galicia, pero no en otros experimentos con cantidades mucho mayores (Robichaud *et al.*, 2013a, b). Más datos técnicos sobre estos tratamientos pueden encontrarse en Napper (2006), Robichaud *et al.* (2010, 2014) y Vega (2013 b).



**Figura 10.** El acolchado o mulching con paja de cereal resulta un tratamiento protector del suelo muy eficaz (Incendio de Palmeira, A Coruña, 2013).

Las acciones de protección directa del suelo deben complementarse con otras en las redes de drenaje y de reparación de vías forestales (Foltz y Robichaud, 2013).

En Galicia los incendios afectan con frecuencia a masas forestales de alta productividad instaladas en su día con fines de aprovechamiento. En ese contexto, la gestión inmediata post-incendio del arbolado quemado tiene particular importancia y debe procurarse que se integre con las labores de estabilización y rehabilitación mencionadas. La apertura de pistas, el empleo de maquinaria, la ejecución de tareas de corta y extracción de arbolado quemado con el suelo húmedo pueden, con facilidad, incrementar los procesos erosivos subsiguientes al fuego y afectar al regenerado. La investigación realizada hasta ahora muestra que hay una gran variabilidad de situaciones y que, por tanto, los efectos producidos por la corta y saca del arbolado quemado pueden suponer impactos fuertes, moderados o muy escasos. El nivel de gravedad de ese impacto está mediatizado por un conjunto muy amplio de factores. La pendiente, la humedad del suelo en el momento de la saca, el grado de severidad del daño en el suelo y vegetación, la presencia o no de una cubierta de hojarasca originada a partir de la caída de hoja de los árboles sofamados, el tipo de maquinaria empleado y la técnica de extracción, así como el tipo de manipulación de los residuos de la corta pueden explicar diferencias notables en los efectos

erosivo-hidrológicos de la corta después del incendio. La información existente, todavía no muy extensa, se ha desarrollado en condiciones climáticas, edáficas, de vegetación y de tipo de masas forestales, bastante diferentes a las de Galicia. No menos importante es que generalmente no se ha considerado la componente socioeconómica del problema. Por ello se requiere una investigación sobre esta temática que contemple ese aspecto.

La monitorización de los tratamientos proporciona, finalmente, una oportunidad única para testar su idoneidad en relación a las características del sitio donde han sido aplicados y determinar su eficacia, además de validar y ayudar a refinar los modelos de erosión existentes. Un registro de los costes e incidencias durante la aplicación de los tratamientos, además de un seguimiento de la respuesta hidrológica, de la vegetación y suelo puede ser muy útil para mejorar aplicaciones futuras.

## 6. Reflexiones finales

La estabilización de emergencia constituye una etapa crítica para la restauración de las áreas forestales quemadas que, hasta ahora, no había recibido la atención necesaria en nuestro entorno y que, sin embargo, puede tener una repercusión notable en la sostenibilidad de los ecosistemas afectados. Los protocolos y guías para planificar e implementar acciones urgentes de estabilización del suelo post-incendio han demostrado ser herramientas necesarias y útiles. Deben ser también lo suficientemente flexibles para adaptarse a diferentes situaciones. La experiencia llevada a cabo en Galicia ha evidenciado la importancia de disponer de herramientas operativas que ayuden a la priorización de las áreas a rehabilitar tras incendios forestales. Los resultados obtenidos hasta ahora indican que la metodología desarrollada y las técnicas de bioingeniería utilizadas han ayudado de forma razonable a limitar apreciablemente las pérdidas de suelo producidas tras incendios, un grave problema ambiental en nuestro entorno. También han puesto de relieve que la interacción de las experiencias de gestión e investigación es fructífera. Una gestión, por otra parte, atenta a unas circunstancias cambiantes de los recursos naturales manejados. Simultáneamente, se ha evidenciado la necesidad de continuar investigando para mejorar nuestra capacidad de disminuir el impacto de los incendios forestales en Galicia y acelerar así la restauración de los ecosistemas afectados.

## 7. Referencias bibliográficas

- Alfieri, L., Pappenberger, F., Wetterhall, F., Haiden, T., Richardson, D., Salamon, P., 2014 Evaluation of ensemble streamflow predictions in Europe. *J. Hydrol.* 517 (19), 913-922.
- Alfieri, L., Salamon, P., Bianchi, A., Neal, J., Bates, P., Feyen, L., 2013. Advances in pan-European flood hazard mapping. *Hydrol. Process.* 28 (13), 4067-4077.
- Alloza, J.A., García, S., Gimeno, T., Baeza, J., Vallejo, V.R., Rojo, L., Martínez, A., 2013. *Guía técnica para la gestión de montes quemados: protocolos de actuación para la res-*

- tauración de zonas quemadas con riesgo de desertificación*. Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente. Secretaría General Técnica, Madrid.
- Álvarez, M., Soto, B., Pérez, R., Díaz-Fierros, F., 2000. Procesos erosivos asociados a eventos torrenciales en áreas incendiadas: un caso de estudio en el monte Faro (Galicia). *Cuader.* S.E.C.F. 9, 137-143.
- Álvarez, R., Muñoz, A., Pesqueira, X.M., García-Duro, J., Reyes, O., Casal, M., 2009 Spatial and temporal patterns in structure and diversity of Mediterranean forest of *Quercus pyrenaica* in relation to fire. *For. Ecol. Manage.* 257(7), 1596-1602.
- Álvarez, V., Lorenzo, M.N., Taboada, J.J., Santos-González F., 2012. Tendencias y variabilidad climática para el siglo XXI en Galicia. VIII Congreso Internacional AEC, Salamanca: 23-32.
- Álvarez, V., Taboada, J.J., Lorenzo, M.N., 2011. Cambio climático en Galicia en el siglo XXI: tendencias y variabilidad en temperaturas y precipitaciones. *A.C.T.* 2, 65-85.
- Arellano, S., 2014. Comparación de la capacidad de los índices dNBR y RdNBR para evaluar la severidad del fuego en incendios forestales de Galicia. Master interuniversitario en Incendios Forestales, Ciencia y Gestión Integral. Universidad de Córdoba.
- Aronson, J., Milton, S.J., Blythe, J.N. (eds.), 2007. *Restoring Natural Capital: Science, Business and Practice*. Island Press, Washington DC.
- Bará, S., Toval, G., 1983. *Calidad de estación de Pinus pinaster en Galicia*. Serie: Recursos naturales, 24. INIA, Madrid.
- Barrio, M., Loureiro, M., 2010. Valoración económica de pérdidas ambientales: una aplicación a los incendios forestales. En: Fra Paleo, U. (ed.), *Riesgos naturales en Galicia. El encuentro entre naturaleza y sociedad*. Universidad de Santiago Compostela - Consorcio Compensación Seguros, pp. 103-122.
- Barrio, M., Loureiro, M., Chas, M.L., 2007. Aproximación a las pérdidas económicas ocasionadas a corto plazo por los incendios forestales en Galicia en 2006. *Ecom. Agrar. Recur. Natur.* 7, 45-74.
- Beeson, P.C., Martens, S.N., Breshears D.D., 2001. Simulating overland flow following wildfire: mapping vulnerability to landscape disturbance. *Hydrol. Process.* 15, 2917-2930.
- Benito, E., Díaz-Fierros, F., 1992. Estudio de las sustancias estabilizantes de la agregación en suelos ricos en materia orgánica. I. Composición de los agregados estables. *Agrochimica* 36, 324-339.
- Benito, E., Soto, B., Varela, E., Rodríguez-Alleres, M., Rodríguez, J.A., 2009. Modificaciones inducidas por los incendios forestales en las propiedades físicas de los suelos del noroeste de España: implicaciones de la respuesta hidrológica y en la erosión hídrica. En: Cerdá A., Mataix-Solera, J. (eds.), *Efectos de los incendios forestales sobre los suelos de España. El estado de la cuestión visto por los científicos españoles*. Universitat de València, pp. 303-323.
- Benito, E., Varela, M.E., Rodríguez-Alleres, M., 2014 Wildfire effects on soil erodibility in Galicia. *Cuader. Invest. Geog.* 40(2), 353-370.
- Beyers, J., 2004. Postfire seeding for erosion control: Effectiveness and impacts on native plant communities. *Conserv. Biol.* 18, 947-956.
- Calkin, D.E., Hyde, K.D., Robichaud, P.R., Jones, J.G., Ashmun, L.E., Loeffler, D., 2007. *Assessing post-fire values-at-risk with a new calculation tool*. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-205. Fort Collins, CO. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- Calvo de Anta, R. Luis, E., Casás, J.F., Galiñanes, M., Matilla, N., Macías, F., Camps, M.

- Vázquez, N., 2015. Soil organic carbon in northern Spain (Galicia, Asturias, Cantabria y País Vasco). *Span. J. Soil Sci.* 5(1), 41-53.
- Calvo de Anta, R., Luis, E., Matilla, N., Casás, F., Macías, F., Camps, M., Vázquez, N., Galliñanes, J.M., 2014. Mapa digital de carbono en suelos del norte de España (Galicia y cornisa cantábrica). En: Macías, F., Díaz-Raviña, M., Barral, M.T. (eds.), *Retos y oportunidades en la ciencia del suelo*. Andavira Editora, Santiago de Compostela, pp. 65-68.
- Cannon, S.H., Boldt, E.M., Kean, J.W., Laber, J., Staley, D.M., 2011. Rainfall intensity-duration thresholds for post-fire debris-flow emergency-response planning. *Nat. Hazards* 59, 209-236.
- Cannon, S.H., Gartner, J.E., 2005. Wildfire-related debris flows from a hazards perspective. In: Jacob, M., Hungr, O. (eds.), *Debris-flow hazards and related phenomena*. Springer Berlin Heidelberg, Praxis. pp. 321-344.
- Cannon, S.H., Gartner, J.E., Rupert, M.G., Michael, J.A., Rea, A.H., Parrett, C., 2010. Predicting the probability and volume of post-wildfire debris flows in the intermountain west, USA. *Geol. Soc. Am. Bull.* 122, 127-144.
- Cannon, S.H., Gartner, J.E., Wilson, R.C., Laber, J.L., 2008 Storm rainfall conditions for floods and debris flows from recently burned areas in southwestern Colorado and southern California. *Geomorphology* 96, 250-259.
- Carballas, T., 2003. Los incendios forestales en Galicia. En: Casares-Long, J.J. (ed.), *Reflexiones sobre el medio ambiente en Galicia*. Xunta de Galicia.
- Carballas, T., 2006 A rexeneración dos ecosistemas. En: Díaz-Fierros, F., Baahamonde, P. (eds.), *Os incendios forestais en Galicia*. Consello da Cultura Galega. Sección de Ciencia, Técnica e Sociedade.
- Carballas, T., Martín, A., Díaz-Raviña, M., 2009. Efecto de los incendios forestales sobre los suelos de Galicia. En: Cerdá A., Mataix-Solera, J. (eds.), *Efectos de los incendios forestales sobre los suelos de España. El estado de la cuestión visto por los científicos españoles*. Cátedra de Divulgación de la Ciencia, Universitat de Valencia.
- Casal, M., 1985. Cambios en la vegetación de matorral tras el incendio, en Galicia. En: *Estudios sobre prevención y efectos ecológicos de los incendios forestales*. Servicio de Publicaciones, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, pp. 93-101.
- Casal, M., 1987. Post-fire dynamics of shrublands dominated by *Papilionaceae* plants. *Ecol. Medit.* 13, 87-98.
- Casal, M., Basanta, M., García Novo, F., 1984. *Ecología de la regeneración del monte incendiado en Galicia*. Monografía nº 99, Servicio de Publicaciones, Universidad de Santiago de Compostela.
- Casal, M., Basanta, M., González, F., Montero, R., Pereiras, J., Puentes, A., 1990. Post-fire dynamics in experimental plots of shrubland ecosystems in Galicia (NW Spain). In: Gollammer, J.G., Jenkins, M.J. (eds.), *Fire in ecosystems dynamics*. SPB Academic Publishing, pp. 33-42.
- Catalina, M.A., Vicente, C., 2002. *Hidrología forestal de la provincia de Málaga*. Diputación Provincial de Málaga.
- Clewell, A.F., Aronson, J., 2013. *Ecological Restoration: Principles, Values, and Structure of an Emerging Profession*. Island Press, Washington D.C.
- Costa, J.C., Lozano, R., Cueto, M., Teruel, J.M., Romero, J.M., Catalina, M.A., Vicente, C., Jover, A.L., Rodríguez de Velasco, J., García, J., Badillo, V., 2006. *Restauración de zonas incendiadas en Andalucía*. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía.

- Cruz, R., Lago, A., Lage, A., Rial, M.E., Díaz-Fierros, F., Salsóns, S., 2009. Evolución reciente do clima de Galicia. Tendencias observadas nas variables meteorolóxicas. En: *Evidencias e impactos do cambio climático en Galicia*. Xunta de Galicia, pp. 1-58.
- Cutter, S.L., Boruff, B.J., Shirley, W.L., 2003. Social Vulnerability to Environmental Hazards *Soc. Sci. Quart.*, 84(2), 242-261.
- De Graff, J., 2014 Improvement in quantifying debris flow risk for post-wildfire emergency response. *Geoenviron. disasters* 1, 5-10.
- Del Palacio, E. (Coord), 2013. *Cien años de restauración hidrológico forestal*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid.
- Del Palacio, E. et al. 1999. *La Restauración hidrológico-forestal en España: gestión sostenible de los recursos suelo, agua y vegetación*. Ministerio de Medio Ambiente. O. A. Parques Nacionales, Madrid.
- Díaz-Fierros, F., Bahamonde, P. (eds.), 2006. *Os incendios forestais en Galicia*. Consello da Cultura Galega, Santiago de Compostela.
- Díaz-Fierros, F., Balboa, X., Barreiro X.L. (eds.), 2007. *Por unha nova cultura forestal fronte aos incendios: informes e conclusións*. Consello da Cultura Galega, Santiago de Compostela.
- Díaz-Fierros, F., Benito, E., 1991. Material geológico y erosionabilidad del suelo en Galicia. *Rev. Acad. Gal. Cienc.* 10, 126-143.
- Díaz-Fierros, F., Benito, E., Soto, B., 1994. Action of forest fires on vegetation cover and soil erodibility. In: Sala, M., Rubio, J.L. (eds.), *Soil erosion and degradation as a consequence of forest fires*. Geofoma Ediciones, Logroño, pp.163-176.
- Díaz-Fierros, F., Benito, E., Vega, J.A., Castelao, A., Soto, B., Pérez, R., Taboada, T., 1990. Solute loss and soil erosion in burnt soils from Galicia (NW Spain). In: Goldammer, J.G., Jenkins, M.J. (eds.), *Fire and Ecosystem Dynamics*. SPB Academic Publishing, The Hague, pp. 103-116.
- Díaz-Fierros, F., Gil, F., Cabaneiro, A., Carballas, T., Leirós, M.C., Villar, M.C., 1982. Efectos de los incendios forestales en suelos de Galicia. *Anal. Edaf. Agrob.* 41, 627-639.
- Díaz-Raviña, M., Martín, A., Barreiro A., Lombao, A., Iglesias L., Díaz-Fierros, F., Carballas, T., 2012. Mulching and seeding treatments for post-fire soil stabilisation in NW Spain: Short-term effects and effectiveness. *Geoderma* 191, 31-39.
- Fernández, C., Vega J.A., 2014 Efficacy of bark strands and straw mulching after wildfire in NW Spain: Effects on erosion control and vegetation recovery. *Ecol. Engin.* 63, 50-57.
- Fernández, C., Vega, J.A., Bará, S., Alonso, M., Fonturbel, M.T., 2011. Effects of the sequence wildfire-harvesting-coppice sprout selection on nutrient export via streamflow in a small E. globulus watershed in Galicia (NW Spain). *For. Sys.* 20 (2), 218-227.
- Fernández, C., Vega, J.A., 2015. Modelling the effect of soil burn severity on soil erosion at hillslope scale in the first year following wildfire in NW Spain. *Earth Surf. Process. Landforms* DOI: 10.1002/esp.3876
- Fernández, C., Vega, J.A., 2016. Are erosion barriers and straw mulching effective to control soil erosion after a high severity wildfire in NW Spain? *Ecol. Engin.* 87, 132-138.
- Fernández, C., Vega, J.A., Gras, J.M., Fonturbel, T., 2006. Changes in water yield after a sequence of perturbations and forest management practices in an *Eucalyptus globulus* Labill. watershed in Northern Spain. *For. Ecol. Manage.* 234(1-3), 275-281.
- Fernández, C., Vega, J.A., Jiménez, E., Vieira, D., Merino, A., Ferreiro, A., Fonturbel, M.T., 2012. Seeding and mulching + seeding effects on post-fire runoff, soil erosion and spe-

- cies diversity in Galicia (NW Spain). *Land Degrad. Develop.* 23, 150-156.
- Fernández, C.; Vega, J. A.; Jiménez, E.; Fonturbel, M. T. 2011. Effectiveness of three post-fire treatments at reducing soil erosion in Galicia (NW Spain). *Int. J. Wild. Fire* 20, 104-114.
- Foltz, R.B., Robichaud, P.R., 2013 *Effectiveness of pos-fire burned Area Emergency Response (BAER) Road treatments: results from three wildfires*. USDA Forest Service RMRS-GTR-313.
- Foltz, R.B., Robichaud, P.R., Rhee, H., 2009. *A synthesis of post-fire road treatments for BAER teams: methods, treatment effectiveness, and decision making tools for rehabilitation*. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-228.
- Fra, U., 2010. Las dimensiones de las inundaciones históricas en Galicia en la comunicación del riesgo. En: Fra Paleo, U. (ed.), *Riesgos naturales en Galicia*. Universidad de Santiago Compostela - Consorcio Compensación Seguros, pp. 47-64.
- García-Barrón, L., Camarillo, J.M., Morales, J., Sousa, A., 2015. Temporal analysis (1940–2010) of rainfall aggressiveness in the Iberian Peninsula basins. *J. Hydrol.* 525, 747-759.
- García-Corona, R., Benito, E., De Blas, E., Varela, M.E. 2004. Effects of heating on some soil physical properties related to its hydrological behaviour in two north-western Spanish soils. *Int. J. Wild. Fire* 13, 195-199.
- García-Ruiz, J.M., Arnáez, J., Gómez-Villar, A., Ortigosa, L., Lana-Renault, N., 2013. Fire-related debris flows in the Iberian Range, Spain. *Geomorphology* 196, 221-230.
- Gartner, J.E., Santi, P.M., Cannon, S.H., 2015. Predicting locations of post-fire debris- flows erosion in the San Gabriel Mountains of southern California. *Nat. Hazards* 77(2), 1305-1321.
- Hernández, L., 2014. *Los bosques después el fuego*. WWF con la colaboración de AXA.
- Hernández, L., Romero, F., 2008. *Criterios de restauración de zonas incendiadas*. Manuales de desarrollo sostenible, 6. Fundación Banco de Santander, con la colaboración de WWF/Adena.
- Joint Research Centre, 2014. *Science for disaster risk reduction*. European Commission. Joint Research Centre.
- Kean, J.W., Staley, D.M., Leeper, R.J., Schmidt, K.M., Gartner, J.E., 2012. A low-cost method to measure the timing of postfire flash floods and debris flows relative to rainfall. *Water Resour. Res.* 48 (5). doi:10.1029/2011WR011460.
- Key, C. H., Benson, N., 2006. *Landscape assessment. Sampling and analysis methods*. USDA Forest Service. General Technical Report. RMRS-GTR-164-CD
- Kirkby, M.J., Irvine, B.J., Jones, R.J.A., Govers, G., the PESERA team 2008. The PESERA coarse scale erosion model for Europe: I – Model rationale and Implementation. *Eur. J. Soil Sci.* 59(6), 1293-1306.
- López Cadenas, F. (coord.), 1994. *Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión*. Tragsa y Mundiprensa, Madrid.
- MacDonald, L.H., Larsen, I.J., 2009. Effects of forest fires and post-fire rehabilitation: a Colorado case study. In: Cerdá, A., Robichaud, P. (eds.), *Restoration strategies after forest fires*. Science Publisher Inc. Enfield, New Hampshire. USA, pp. 423-452.
- Macías, F., Calvo de Anta, R., Rodríguez, L., Verde, L., Pena, X., Camps, M., 2004. El sumidero de Carbono de los suelos de Galicia. *Edafología* 11, 341-376.
- Martínez-Cortizas A., Pérez-Alberti, A. (coords.), 1999. *Atlas climático de Galicia*. Xunta de Galicia.

- Mataix J., Cerdá, A., 2009. Incendios forestales en España. Ecosistemas terrestres y suelos. En: Cerdá A., Mataix-Solera, J. (eds.), *Efectos de los incendios forestales sobre los suelos de España. El estado de la cuestión visto por los científicos españoles*. Universitat de Valencia, pp. 27-53.
- Merino, A., Chávez-Vergara, B., Salgado, J., Fonturbel, M.T., García-Oliva, F., Vega, J.A., 2014. Composition and stability of non-woody char generated by wildfire in different forest ecosystems. *Catena* 133, 52-63.
- Merino, A., Ferreiro, A., Salgado, J., Fonturbel, T., Barros, N., Fernández, C., Vega, J.A., 2014. Use of thermal analysis and solid-state <sup>13</sup>C CP-MAS NMR spectroscopy to diagnose organic matter quality in relation to burn severity in Atlantic soils. *Geoderma* 226-227, 76-386.
- Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación, 1988. *Agresividad de la lluvia en España*.
- Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación, 1992. *Hidrología forestal y protección de suelos. Técnicas y experiencias en dirección de obra*. Colección técnica MAPA, Madrid.
- Ministerio de Agricultura y Alimentación y Medio Ambiente, 2011. *Cuarto Inventario Forestal Nacional. Galicia*. Ministerio de Agricultura y Alimentación y Medio Ambiente. Xunta de Galicia.
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2012. *Los incendios forestales en España. Decenio 2000-2010*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid.
- Ministerio de Medio Ambiente, 2005. *Inventario Nacional de Erosión de suelos 2002-2012*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- Mintegui, J.A., 1989. Evaluación de beneficios físicos derivados de la restauración hidrológico-forestal y la conservación de suelos en las cuencas torrenciales. En: *Degradación de zonas áridas en el entorno Mediterráneo*. Ministerio de Obras públicas, Urbanismo y Medio Ambiente, Madrid, pp. 37-54.
- Mintegui, J.A., de Simón, E., García, J.L., Robredo, J.C., 1993. *La restauración hidrológico forestal en las cuencas de la vertiente mediterránea*. Junta de Andalucía.
- Mintegui, J.A., Robredo, J.C., 1994. Caracterización de las cuencas hidrográficas objeto de restauración hidrológico forestal mediante modelos hidrológicos. *Ing. Agua* 1(2), 69-82
- Moody, J.A., Shakesby, R.A., Robichaud, P.R., Cannon, S.H., Martin, D.A., 2013. Current research issues related to post-wildfire runoff and erosion processes. *Earth-Sci. Reviews* 122, 10-37.
- Morgan, R.P.C., Quinton, J.N., Smith, R.E., Govers, G., Poesen, J.W.A., Auerswald, K., Chisci, G., Torri, D., Styzcen, M.E., 1998. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surf. Process. Landforms* 23, 527-544.
- Napper, C., 2006. *Burned Area Emergency Response treatments catalogue*. USDA Forest Service. National Technology & Development Program. Watershed, Soil, Air Management 0625 1801-SDTDC.
- Nearing, M.A., Foster, G.R., Lane, L.J., Finkner, S.C., 1989. A Process-Based Soil Erosion Model for USDA-Water Erosion Prediction Project Technology. *Amer. Soc. Agric. Eng.* 32, 1587-1593.
- Nyman, P., Smith, H.G., Sherwin, C.B., Langhans, C., Lane, P.N.J., Sheridan, G.J., 2015. Predicting sediment delivery from debris flows after wildfire. *Geomorphology* 250,

173-186.

- Parsons, A., Robichaud, P.R., Lewis, S.A., Napper, C., Clark, J.T., 2010. *Filed guide for mapping post-fire soil burn severity*. USDA Forest Service. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-243.
- Peppin, D., Fulé, P.Z., Sieg, C.H., Beyers, J.L., Hunter, M., Robichaud, P.R., 2011. Recent trends in post-wildfire seeding in western US forests: cots and seed mixes. *Int. J. Wild. Fire* 20, 702-708.
- Pérez-Cabello, F., Echeverría, M., de la Riva, J., Ibarra, P., 2011. Apuntes sobre los efectos de los incendios forestales y restauración ambiental de áreas quemadas. Estado de la cuestión y principios generales. *Geographicalia* 59-60, 295-308.
- Pérez-Cabello, F., de la Riva, J., Montorio, R., García-Martín, A., 2006. Mapping erosion-sensitive areas after wildfires using fieldwork, remote sensing, and geographic information systems techniques on a regional scale. *J. Geophys. Research* 111 G04S10, 13 pp.
- Pinaya, I., Soto, B., Arias, M., Díaz-Fierros, F., 2000. Revegetation of burnt areas: Relative effectiveness of native and commercial seed mixtures. *Land Degrad. Develop.* 11, 93-98.
- Plan INFOCA XVII. *La restauración de las aéreas incendiadas*. Junta de Andalucía, pp. 305-317.
- Prochaska, A.B., Santi, P.M., Higgins, J.D., 2008. Debris basin and deflection berms desing for fire-related debris-flow mitigation. *Environ. Eng. Geos.* XIV (4), 297-313.
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., Mc Cool, D.K., Yoder, D.C. (cords.), 1997. *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)*. Agriculture Handbook nº 703. Washington DC. USDA, Natural Resources Conservation Service.
- Reyes, O., Casal, M., 2008. Regeneration models and plants regenerative types related to the intensity of fire in Atlantic shrubland and woodland species. *J. Veg. Sci.* 19, 575-58.
- Reyes, O., Casal, M., Rego, F.C., 2009. Resprouting ability of six Atlantic shrub species. *Folia Geobotánica* 44, 19-29.
- Robichaud, P.R., 2009a. Post-fire stabilization and rehabilitation. In: Cerdá, A., Robichaud, P. (eds.), *Fire effects on soils and restoration strategies*. Science Publishers, ciudad, pp. 299-320.
- Robichaud, P.R., Ashmun, L.E., Sims, B.D., 2010. *Post-fire treatment effectiveness for hillslope stabilization*. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-240.
- Robichaud, P.R., Rhee, H., Lewis, S.A., 2014. A synthesis of post-fire Burned Area Reports from 1972 to 2009 for western US Forest Service lands: trends in wildfire characteristics and post-fire stabilization treatments and expenditures. *Int. J. Wild. Fire* 23, 929-944.
- Robichaud, P.R., Beyers, J.L., Neary, D.G., 2000. *Evaluating the efectiveness of postfire rehabilitation treatments*. USDA Forest Service. General Technical Report. RMRS-GTR.-63.
- Robichaud, P.R., Lewis, S.A., Wagenbrenner, J.W., Ashmun, L.E., Brown, R.E., 2013a. Post-fire mulching for runoff and erosion mitigation. Part I: Effectiveness at reducing hillslope erosion rates. *Catena* 105, 75-92.
- Robichaud, P.R., Pierson, F.B., Brown, R.E., Wagenbrenner, J.W., 2008a. Measuring effectiveness of three postfire hillslope erosion barrier treatments, western Montana, USA. *Hydrol. Process.* 22, 159-170.
- Robichaud, P.R., Wagenbrenner, J.W., Brown, R.E., Wohlgemuth, P.M., Beyers, J.L., 2008 b. Evaluating the effectiveness of contour-felled log erosion barriers as a post-fire runoff

- and erosion mitigation treatments in the western United States. *Int. J. Wild. Fire* 17, 255-273.
- Robichaud, P.R., Wagenbrenner, J.W., Lewis, S.A., Ashmun, L.E., Brown, R.E., Wohlgemuth, P.M., 2013 b. Post-fire mulching for runoff and erosion mitigation. Part II: Effectiveness in reducing runoff and sediment yields from small catchments. *Catena* 105, 93-111.
- Rodríguez-Alleres, M., Benito, E., De Blas, E., 2005. Implicaciones de la repelencia al agua del suelo en la generación de escorrentía y en la erosión en un área quemada del NW de España. En: Samper Calvete, F.J., Paz González, A. (eds.), *Estud. Zona No Satur. Suelo* Vol. VII, 165-168.
- Rodríguez-Alleres, M.,; Varela, M.E., Benito, E., 2012. Natural severity of water repellency in pine forest soils from NW Spain and influence of wildfire severity on its persistence. *Geoderma* 191, 125-131.
- Rodríguez-Lado, L., Martínez-Cortizas, A., 2015. Modelling and mapping organic carbon content of topsoils in an Atlantic area of southwestern Europe (Galicia-NW Spain). *Geoderma* 245-246, 65-73.
- Ruiz, J., Luque, I., 2010. Actuaciones de emergencia para la defensa del suelo tras un gran incendio forestal en Andalucía. En: Díaz Raviña, M., Benito, E., Carballas, T., Fontúrbel, M.T., Vega, J.A. (eds.), *Investigación y Gestión para la Protección del Suelo y Restauración de los Ecosistemas Forestales afectados por Incendios Forestales*. FUEGO-RED 2010. Santiago de Compostela, pp. 49-64.
- San Miguel, J. et al., 2012. Comprehensive monitoring of wildfires in Europe: the european forest fire information system (EFFIS). In: Tiefenbacher, J. (ed.), *Approaches to manage disasters-assessing hazards, emergencies and disasters impact*. InTech, Rijeka (Croatia), pp. 87-105.
- San Miguel, J. et al., 2012. Land cover change and fire regime in the European Mediterranean Region. In: Moreira, F., Arianoutsou, M., Corona, P., de las Heras, J. (eds.), *Post-fire management and restoration of southern European Forests*. Springer, pp. 21-43.
- Serrada, R., Montero, G., Martínez, J., Fernández, J.A., 2004. *La restauración hidrológico-forestal: pasado, presente y futuro*. Congreso Nacional de Medio Ambiente VII, Madrid, GT8.
- Serrada, R., Muñoz, I., Martínez, J., López de Diego, L., Rodríguez, M., Rodríguez, J.R, Ocaña, L., Cabezas, F.J., Magro, J. Romero, F., 2006. *Incendios forestales: Tratamiento de las superficies quemadas*. Grupo de Trabajo 2. VIII Congreso Nacional de Medio Ambiente (CONAMA).
- Smets, T., Poesen, J., Knapen, A., 2008. Spatial scale effects of the effectiveness of organic mulching in reducing soil erosion by water. *Earth-Sci. Reviews* 89, 1-12.
- Soto, B., Basanta, R., Benito, E., Pérez R., Díaz-Fierros, F. 1994. Runoff and erosion from burnt soils in Northwest Spain. En: Sala, M. Rubio, J.L. (eds), *Soil erosion as a consequence of forest fires*. Geofoma, Logroño, pp. 91-98.
- Soto, B., Basanta, R., Díaz-Fierros, F., 1993. Influence of wildland fire on surface runoff from a hillslope. *Acta Geológ. Hispan.* 28, 95-102.
- Soto, B., Díaz-Fierros, F., 1998. Runoff and soil erosion from areas of burnt scrub: comparison of experimental results with those predicted by the WEPP model. *Catena* 31, 257-270.
- Vallejo, R., Alloza J.A., 2014. *Recomendaciones técnicas en los trabajos de restauración post-fuego*. Proyecto europeo FUME II: Taller sobre lecciones aprendidas en los incen-

dios forestales, Córdoba.

- Varela, M.E., Benito, E., de Blas, E., 2005. Impact of wildfires on surface water repellency in soils of northwest Spain. *Hydrol. Process.* 19, 3649-3657.
- Varela, M.E., Benito, E., Keizer, J.J., 2010 a. Wildfire effects on soil erodibility of woodlands in NW Spain. *Land Degrad. Develop.* 21, 341-376.
- Varela, M.E., Benito, E., Keizer, J.J., 2010 b. Effects of wildfire and laboratory heating on soil aggregate stability of pine forests in Galicia: The role of lithology, soil organic matter content and water repellency. *Catena* 83, 127-134.
- Vega J.A, Fernández, C., 2007. Efectos ecológicos de los incendios forestales. Proyecto Galicia. Hércules Ediciones. Tomo Ecología: 360-397.
- Vega, J.A., Arellano, S., Ruiz-González, A.D., Arellano, A., 2103a. *Nuevos modelos de combustibles forestales de Galicia*. Actas VI Congreso Forestal Español. Vitoria.
- Vega, J.A., Fernández, C., Jiménez, E., Ruiz, A.D., 2009 a. Evidencias de cambio climático en Galicia a través das tendencias dos índices de perigo de incendios forestais. En: *Evidencias e impactos do cambio climático en Galicia*. Xunta de Galicia: 173-194.
- Vega J.A., Fernández, C., Fonturbel, T., González-Prieto, S., Jiménez, E., 2014. Testing the effects of straw mulching and herb seeding on soil erosion after fire in a gorse shrubland. *Geoderma* 223-225, 79-87.
- Vega, J.A, Bará, S., Villamuera, M.A., Alonso, M., 1982. *Erosión después de un incendio forestal*. Departamento Forestal de Zonas Húmedas. INIA.
- Vega, J.A., 2007. Impacto de los incendios sobre el suelo y vegetación forestales en Galicia. En: Díaz-Fierros, F., Balboa, X., Barreiro, X.L. (eds), *Por unha nova cultura forestal fronte aos incendios: Informes e conclusións*. Consello da Cultura Galega, Santiago de Compostela, pp. 73-102.
- Vega, J.A., Bará, S., Alonso, M., 1986. *Estudio de la erosión, estabilidad de agregados y ácidos húmicos en suelos forestales quemados*. Memoria 1983-1986. Centro de Investigaciones Forestales. Xunta de Galicia.
- Vega, J.A., Fernández, C., 2010. Riesgos hidrológicos y erosivos después de los incendios forestales. En: Fra, U. (ed.), *Riesgos naturales en Galicia*. Universidad de Santiago Compostela - Consorcio Compensación Seguros, pp. 79-102.
- Vega, J.A., Fernández, C., Fonturbel, T., 2015 Comparing the effectiveness of seeding and mulching + seeding in reducing soil erosion after a high severity fire in Galicia (NW Spain). *Ecol. Engin.* 74, 206-212.
- Vega, J.A., Fernández, C., Jiménez, E., Ruiz, A.D., 2009 b. Impacto dun escenario de cambio climático sobre o perigo de incendios forestais en Galicia. En: *Evidencias e impactos do cambio climático en Galicia*. Xunta de Galicia, pp. 583-607.
- Vega, J.A., Fonturbel, M.T., Merino, A., Fernández, C., Ferreiro, A., Jiménez, E., 2013c. Testing the ability of visual indicators of soil burn severity to reflect changes in soil chemical and microbial properties in pine forests and shrubland. *Plant Soil* 369, 73-91.
- Vega, J.A., Fonturbel, T., Fernández, C., Arellano, A., Díaz-Raviña, M., Carballas, M.T., Martín, A., González-Prieto, S., Merino, A., Benito, E., 2013b. *Acciones urgentes contra la erosión en áreas forestales quemadas: Guía para su planificación en Galicia*. Xunta de Galicia y Ministerio de Economía y Competitividad.
- Vega, J.A., Pérez-Gorostiaga, P., Fonturbel, T., Barreiro, A., Fernández, C., Cuiñas, P., 2005. Variables influyentes en la respuesta regenerativa vegetativa a corto plazo de *Quercus pyrenaica* Willd. tras incendios en Galicia. Actas 4º Congreso Forestal Español, Zaragoza.

- Wohlgemuth, P.M., Hubbert, K. R., Robichaud, P.R., 2001. The effects of log erosion barriers on post-fire hydrologic response and sediment yield in small forested watersheds, southern California. *Hydrol. Process.* 15, 2053-3066.
- Xunta de Galicia. 2001. *O monte galego en cifras*. Consellería de Medio Ambiente, Xunta de Galicia.