

EFFECTOS DE LOS INCENDIOS FORESTALES EN LA EROSIONABILIDAD DE LOS SUELOS EN GALICIA

E. BENITO^{1*}, M.E. VARELA^{1,2}, M. RODRÍGUEZ-ALLERES¹

¹Departamento de Biología Vegetal y Ciencias del Suelo. Campus Lagoas-Marcosende. Universidad de Vigo. 36310 Vigo. España.

²Centro de Estudos do Ambiente e do Mar (CESAM). Departamento de Ambiente e Ordenamento. Universidade de Aveiro. 3810-193 Aveiro. Portugal.

RESUMEN. *La erosionabilidad del suelo es un factor decisivo en la intensidad de los procesos de erosión hídrica que se pueden desencadenar como consecuencia de los incendios forestales. En este trabajo se presentan los resultados de diferentes experiencias llevadas a cabo en los suelos del N.O. de España, con el objeto de analizar las principales propiedades del suelo que condicionan su susceptibilidad a la erosión, así como los efectos de los incendios forestales en esta propiedad del suelo y sobre las consecuencias que estos cambios ocasionan en la respuesta hidrológica y erosiva de los suelos.*

Los suelos forestales de Galicia se caracterizan por presentar una erosionabilidad muy baja, debido principalmente a su textura predominantemente gruesa, a sus altos contenidos en materia orgánica y a la elevada estabilidad de los agregados. El impacto de los incendios forestales en la susceptibilidad a la erosión de estos suelos dependerá de sus efectos sobre estas propiedades del suelo, siendo claramente dependiente de la severidad de los incendios. La erosionabilidad del suelo se ve aparentemente poco afectada por los incendios de baja severidad pero aumenta de forma notable tras incendios de severidad alta. La repelencia al agua del suelo, inducida o intensificada por el fuego, se considera como un factor determinante en la generación de flujos de escorrentía y en los procesos erosivos repetidamente observados en las áreas quemadas del N.O. de España.

Wildfire effects on soil erodibility in Galicia

ABSTRACT. *Soil erodibility exerts a decisive influence on the severity of water erosion resulting from forest fires. This paper reports the results of various experiments conducted on soils in Galicia (NW Spain) with a view to identifying the main soil properties governing soil erodibility, as well as the impact of forest fires on this property and the consequences of the ensuing changes on the hydrological and erosive response of soil.*

By virtue of their predominantly coarse texture, high contents in organic matter and also high aggregate stability, soil forests in Galicia are scarcely erodible.

Because the impact of forest fires on their erodibility depends on these soil properties, it is also markedly dependent on fire severity. Soil erodibility seems scarcely affected by low-severity fires but increases markedly with increasing severity. The water repellency of soil, whether induced or boosted by fire, is a determining factor for the occurrence of runoff and erosion processes continually observed in burnt areas in NW Spain.

Palabras clave: erosiónabilidad, incendios forestales, Galicia.

Key words: erodibility, forest fires, Galicia.

Enviado el 28 de octubre de 2013.

Aceptado el 4 de febrero de 2014.

*Correspondencia: Departamento de Biología Vegetal y Ciencias del Suelo. Campus Lagoas-Marcosende. Universidad de Vigo. 36310 Vigo. España. E-mail: rueda@uvigo.es

1. Introducción

Los incendios constituyen una de las perturbaciones más frecuentes e importantes que sufren los ecosistemas forestales de Galicia (Vega *et al.*, 2013). Es importante señalar que aproximadamente la mitad de los incendios forestales que ocurren en España tienen lugar en Galicia y que la superficie quemada en los últimos decenios representa en torno al 25% de la superficie estatal incendiada, a pesar de que su superficie forestal representa sólo el 10% de la de todo el país (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2012).

Uno de los efectos más negativos para el medioambiente que ocasiona el fuego en el suelo es el incremento de los procesos de erosión hídrica (Benito *et al.*, 1991; Carballas *et al.*, 2009; Vega *et al.*, 2013). A este proceso contribuyen de manera decisiva la erosividad de las precipitaciones, la topografía, la cubierta vegetal y la propia susceptibilidad de los suelos frente a los procesos erosivos (Morgan, 2005).

Después de un incendio forestal, la reducción de la cubierta vegetal y la hojarasca dejan el suelo desprotegido frente al impacto de las gotas de lluvia y se reduce la capacidad de almacenamiento de agua, lo que generalmente favorece el desprendimiento de partículas del suelo y su arrastre, así como la formación de flujos de agua superficiales que favorecen la pérdida acelerada del suelo en la ladera y/o cuenca (Bryan, 2000).

La erosiónabilidad es la característica del suelo que define su resistencia a los procesos de desprendimiento y transporte. La susceptibilidad de los suelos a la erosión va a depender de sus características intrínsecas, de factores ambientales y de los distintos usos y perturbaciones a que se ven sometidos los suelos.

En general, se admite que las propiedades del suelo que más influyen en su erosiónabilidad son la composición granulométrica y la estructura. De ellas depende, tanto la porosidad y permeabilidad del suelo y, por tanto, su capacidad de aceptación de la lluvia,

como las fuerzas de unión entre las partículas del suelo y, consecuentemente, su resistencia a la liberación y al transporte (Díaz-Fierros y Benito, 1996; Benito *et al.*, 2010).

Está ampliamente reconocido que los suelos más erosionables son aquellos con altos contenidos en limos y arenas finas, por ser estas partículas fácilmente disgregables y fácilmente transportadas por los flujos de escorrentía superficial. Los suelos con altos contenidos en arcilla son poco erosionables debido a que son resistentes al desprendimiento, mientras que los suelos con altos contenidos en arena también son resistentes a la erosión, en este caso debido a su elevada permeabilidad y por su mayor resistencia al transporte (Morgan, 2005).

Muchos autores han señalado la importancia del descenso en el contenido en materia orgánica como responsable del aumento en la erosionabilidad del suelo (Wischmeier *et al.*, 1971; Evans, 1980). La materia orgánica es un importante agente de unión entre las partículas minerales del suelo, favoreciendo su resistencia al desprendimiento. Se acepta generalmente un umbral del 4%, por debajo del cual la erosionabilidad del suelo se incrementa considerablemente (Evans, 1980; Benito y Díaz-Fierros, 1989; Le Bissonnais *et al.*, 1997). Por otra parte, existen también evidencias de que el entramado de raíces de los suelos forestales aumenta mucho su resistencia a la liberación de partículas, si bien, debido a la dificultad de su medida, casi nunca se considera como dato a tener en cuenta en la estimación de la erosionabilidad. La pedregosidad del suelo también puede influir, en este caso reduciendo la velocidad del flujo de escorrentía superficial y, en consecuencia, su capacidad de transporte.

Los incendios forestales van a repercutir de manera importante en la erosionabilidad del suelo, ya que afectan tanto a los procesos que controlan la infiltración de la lluvia, como a la resistencia del suelo para la liberación de partículas y su posterior transporte. Además del incremento del volumen de escorrentía, como consecuencia de la pérdida de protección por la vegetación y de la alteración de las propiedades del suelo, en las zonas quemadas se incrementa de forma específica la cantidad de suelo susceptible de ser arrastrado. La desagregación del suelo y la generación de material “suelto” fácilmente arrastrable se produce durante el incendio por efecto de la onda de calor y por la combustión de la materia orgánica del suelo (Benito *et al.*, 2009). Otro fenómeno relacionado con los incendios forestales que condiciona el comportamiento hidrológico y la erosionabilidad en las zonas quemadas es el incremento de la repelencia al agua que suele observarse en el suelo tras el paso del fuego, bien sea en la superficie o en la capa subsuperficial (Díaz-Fierros *et al.*, 1994; Cerdà y Doerr, 2005; Shakesby y Doerr, 2006). La repelencia al agua puede ser un factor que aumente la erosionabilidad del suelo al reducir la capacidad de infiltración del agua, si bien diferentes estudios también señalan un efecto positivo de la repelencia al agua en la estabilidad de los agregados y, por tanto, en su resistencia al desprendimiento (Chenu *et al.*, 2000; Mataix-Solera y Doerr, 2004; García Corona *et al.*, 2004; Arcenegui *et al.*, 2008; Varela *et al.*, 2010b; Mataix-Solera *et al.*, 2011).

La magnitud de los cambios en los procesos mencionados anteriormente dependerá de varios factores, siendo la intensidad del fuego (velocidad de liberación de energía

durante la combustión) y la severidad con que afecte al suelo, factores clave. También influirá de manera importante el tipo de suelo y sus propiedades.

La determinación directa de la erosionabilidad del suelo en el campo es una labor costosa ya que requiere medidas experimentales en parcelas durante varios años, con el fin de obviar la variabilidad temporal de la intensidad y frecuencia de los episodios tormentosos. Por ello, se han utilizado ampliamente los simuladores de lluvia en estudios de erosionabilidad del suelo (Benito *et al.*, 1986, 2010; Calvo *et al.*, 1988; Cerdà, 1999; Cerdà *et al.*, 2010; Iserloh *et al.*, 2013) y también se han realizado esfuerzos para evaluar la susceptibilidad de los suelos a la erosión a partir de la determinación de determinados índices o relaciones desarrollados a partir de componentes y/o propiedades del suelo (Wischmeier *et al.*, 1971; Lal y Elliot, 1994; Morgan, 2005).

En este trabajo se presenta una revisión sobre el estado de la cuestión respecto a la susceptibilidad a la erosión de los suelos en Galicia a partir de las experiencias desarrolladas en las últimas tres décadas. Se analiza, en primer lugar, mediante experiencias con lluvia simulada, la influencia del uso del suelo y del material geológico en la erosionabilidad de los suelos y se discuten los principales factores que explican la baja susceptibilidad a la erosión de los suelos forestales en Galicia. A continuación, se evalúa el impacto de incendios forestales de diferente severidad en esta propiedad del suelo, comparando los resultados obtenidos en experiencias de campo con estudios de calentamiento controlado en laboratorio. Finalmente, se analizan las consecuencias que estos cambios ocasionan en la respuesta hidrológica y erosiva de los suelos.

2. La erosionabilidad de los suelos forestales en Galicia

La erosionabilidad de los suelos gallegos se estudió, mediante la técnica de simulación de lluvia, (Benito *et al.*, 1986) sobre un conjunto de muestras representativas de los principales tipos de uso y materiales geológicos (Benito y Díaz-Fierros, 1989; Díaz-Fierros y Benito, 1991). Los resultados reflejaron una mayor resistencia de los suelos frente a la erosión hídrica a medida que aumentaba su contenido en materia orgánica. Se estableció un nivel crítico del 4%, por debajo del cual la erosionabilidad del suelo se incrementaba notablemente. Los suelos dedicados a cultivo presentaron una mayor erosionabilidad que los suelos dedicados a prado o uso forestal, observándose un incremento de cuatro a seis veces en la susceptibilidad a la erosión por la puesta en cultivo de los suelos naturales. Esta pérdida de resistencia a la erosión hídrica bajo uso agrícola fue atribuida al menor contenido en materia orgánica que presentaban estos suelos, pero también se relacionó con el manejo inadecuado del suelo, principalmente por el laboreo en condiciones excesivas de humedad (Benito y Díaz-Fierros, 1992a). En cuanto a la influencia del material geológico sobre la erosionabilidad, se vio que ésta era pequeña cuando se utilizaba como único factor condicionante, pero que las relaciones mejoraban de forma sensible cuando se tenía en cuenta, al mismo tiempo, el contenido en materia orgánica del suelo (Benito y Díaz-Fierros, 1991). En la Fig. 1 puede verse como, con contenidos bajos de carbono, la mayor sensibilidad a la erosión se produce en suelos desarrollados sobre esquistos pelíticos, anfibolitas y gabros (caracterizados por presentar una textura franca o franco-limosa), mientras que la menor susceptibilidad a la pérdida de suelo ocurre en suelos desarrollados

sobre sedimentos arenosos y areniscas, de texturas más gruesas. En una situación intermedia se encuentran los suelos desarrollados sobre rocas ácidas (esquistos cuarcíticos y rocas graníticas), con texturas franco-arenosas. A partir de valores de carbono del 8-10% (la mayor parte de los suelos forestales de la región) todos los suelos muestran valores muy bajos de susceptibilidad a la erosión frente a la lluvia simulada.

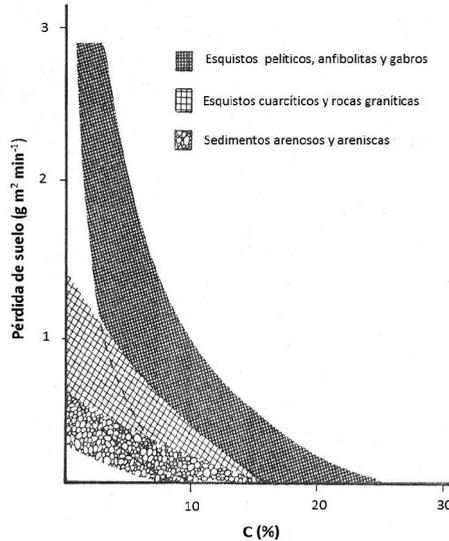


Figura 1. Relación entre la erosionabilidad de suelos del N.O. de España y su contenido en materia orgánica (Benito et al., 1991).

Las principales razones que explicarían esta baja erosionabilidad de los suelos forestales en Galicia, hay que buscarlas en la elevada capacidad de infiltración de los suelos, debido a su textura predominantemente gruesa y, sobre todo, a la estabilidad de sus agregados frente a la acción del agua. Esta propiedad se ha considerado de forma repetida como la de mayor influencia en la erosionabilidad del suelo (Morgan, 2005), habiéndose demostrado, a su vez, que la materia orgánica es un factor esencial para explicar la elevada estabilidad de los agregados, dado el bajo contenido en arcilla de estos suelos (Benito y Díaz-Fierros, 1989, 1992b). Se asume que la materia orgánica del suelo favorece la estabilidad de los agregados por dos mecanismos. En primer lugar, incrementa la cohesión de los agregados, a través de la unión de las partículas minerales por polímeros orgánicos o a través del ensamblaje físico de los microagregados por raíces e hifas de hongos (Tisdall y Oades, 1982; Benito y Díaz-Fierros, 1992b). En segundo lugar, la materia orgánica puede modificar las características de la humectación al aumentar la repelencia al agua de los agregados, reduciendo el fenómeno del estallido (Giovannini *et al.*, 1983; Chenu *et al.*, 2000; Goebel *et al.*, 2005; Mataix *et al.*, 2011). Sin embargo, la repelencia al agua también puede tener un efecto negativo en la erosionabilidad al reducir la infiltración del agua en el suelo, favoreciendo la formación de flujos superficiales de agua y el arrastre de las partículas de suelo (Doerr *et al.*, 2000; Shakesby y Doerr, 2006).

La repelencia al agua es muy frecuente de forma natural en los suelos forestales de Galicia (Benito *et al.*, 2003; Varela *et al.*, 2005, 2010a; Rodríguez-Alleres *et al.*, 2007, 2012; Rodríguez-Alleres y Benito, 2011). Como en otras partes del mundo, ocurre en mayor proporción en pinares y eucaliptales que en otras formaciones vegetales, afectando de forma muy severa a la superficie del suelo y siendo más pronunciada en suelos de textura más gruesa (Fig. 2), especialmente bajo condiciones de verano secas (Rodríguez-Alleres *et al.*, 2007; Rodríguez y Benito, 2011, 2012). Esta elevada severidad de la repelencia al agua podría explicarse por el clima templado-húmedo del N.O. de España que favorece una elevada producción de biomasa, elevados contenidos en materia orgánica en los suelos y, por tanto, una elevada producción de sustancias hidrofóbicas. Por otra parte, la fuerte acidez de los suelos favorece el predominio de hongos en la biomasa del suelo, la presencia de profundas capas de hojarasca y formación de humus tipo mor, todos ellos citados repetidamente en la bibliografía como fuentes importantes de compuestos orgánicos hidrofóbicos (Doerr *et al.*, 2000; Franco *et al.*, 2003; Varela *et al.*, 2005; Rodríguez-Alleres *et al.*, 2007). Además, hay que señalar las importantes cantidades de resinas, ceras y aceites aromáticos aportados al suelo por estas especies que también contribuirían al desarrollo de repelencia al agua (Rodríguez-Alleres *et al.*, 2007, 2012).

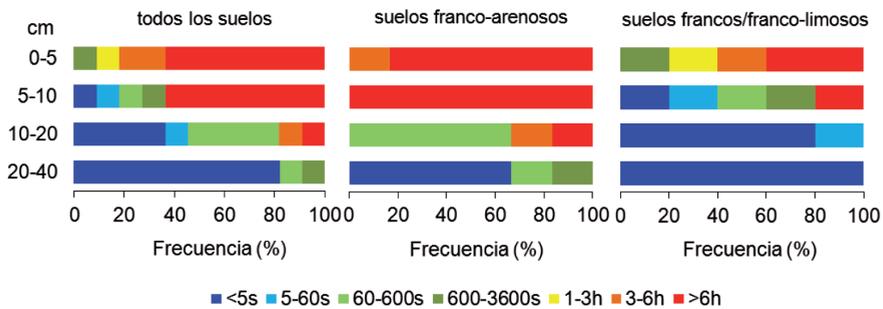


Figura 2. Frecuencia de la persistencia de la repelencia al agua del suelo, expresada en clases WDPT (tiempo de penetración de la gota de agua) en suelos del N.O. de España bajo *Pinus pinaster* entre 0 y 40 cm de profundidad (Rodríguez-Alleres *et al.*, 2012).

Mediante experiencias con simulación de lluvia en el campo (Benito *et al.*, 2001), se ha demostrado la fuerte influencia que ejerce la repelencia al agua de estos suelos en favorecer flujos de escorrentía superficial, muy superiores a los esperados por sus características morfológicas y por la vegetación asociada. Sin embargo, la elevada estabilidad estructural de los suelos impide, en general, que esa elevada escorrentía favorezca una intensa erosión del suelo (Benito *et al.*, 2003; Rodríguez-Alleres *et al.*, 2005).

3. La erosionabilidad del suelo en áreas quemadas de Galicia

En este apartado se presenta un resumen de las experiencias llevadas a cabo en Galicia con el objetivo de determinar el impacto de incendios forestales de diferente severidad en la susceptibilidad a la erosión de los suelos. Para ello, se ha empleado un doble enfoque. Los efectos directos de los incendios forestales se estudiaron por medio de una

estrategia de muestreo pareado, comparando muestras superficiales de suelos recientemente quemados con suelos adyacentes no quemados (Varela *et al.*, 2005, 2010a,b). Los efectos del calentamiento se estudiaron a través de experiencias controladas en el laboratorio y, posteriormente, se compararon con los efectos de los incendios forestales para arrojar más luz sobre la importancia de las diferencias en la severidad del fuego (García-Corona *et al.*, 2004; Varela *et al.*, 2005, 2010b). Las experiencias se realizaron en zonas de matorral y en plantaciones de pinos y eucaliptos por ser las especies forestales más frecuentes y, al mismo tiempo, las más propensas a sufrir incendios forestales en Galicia. Las características de los suelos que se analizaron son aquellas que se consideran que tienen una influencia clave en la erosionabilidad del suelo. Estas son: la composición granulométrica, la distribución de agregados por tamaños, la estabilidad de los agregados, el contenido en materia orgánica, la repelencia al agua y la permeabilidad del suelo.

3.1. Efectos inmediatos de los incendios forestales en la erosionabilidad del suelo

La textura del suelo tiene una influencia importante en la erosionabilidad del suelo ya que controla la capacidad de retención de agua y su infiltración, así como la formación y estabilidad de los agregados. En general, en los estudios llevados a cabo en Galicia, no se observaron modificaciones importantes en la composición granulométrica de los suelos quemados al compararlos con los suelos no quemados (Fig. 3a) (Benito *et al.*, 2009; Varela *et al.*, 2010), si bien se han encontrado disminuciones en el porcentaje de la fracción arcilla tras incendios muy severos (Bará y Vega, 1983).

La agregación del suelo se considera una propiedad esencial para evaluar la susceptibilidad del suelo a la erosión aunque su conexión directa con la cantidad de suelo perdido no ha sido bien establecida por ahora (Benito *et al.*, 2009, 2010; Mataix-Solera *et al.*, 2010, 2011). En general, en las experiencias llevadas a cabo en Galicia, se observó una fragmentación y reducción del tamaño de los agregados, más o menos intensa, por efecto directo del calor tras el paso del fuego (Fig. 3b). Sin embargo, la estabilidad al agua de los agregados mostró un comportamiento mucho más variable, observándose importantes aumentos, reducciones de hasta un 73%, pero también zonas donde la estabilidad de los agregados prácticamente no sufrió variaciones con respecto a las áreas no quemadas (Fig. 3c) (Varela *et al.*, 2010a). Estos cambios que se producen en la estabilidad de los agregados se relacionaron directamente con los cambios que sufre la materia orgánica durante el incendio (Fig. 3d). La materia orgánica desempeña una función esencial en la formación y en la estabilidad de los agregados, especialmente en los suelos gallegos debido a la falta de coloides minerales por la escasez de arcilla. Es por ello, que su disminución debida a la combustión por el incendio, va a tener un marcado efecto en la pérdida de estabilidad de los agregados, aumentando consecuentemente la erosionabilidad del suelo. Sin embargo, es relativamente frecuente encontrar en las áreas quemadas de Galicia, pocas variaciones en el contenido en carbono e incluso en muchos casos incrementos significativos con respecto a los suelos forestales no quemados (Fig. 3d). En estas situaciones, Varela *et al.* (2010a,b) observaron que la estabilidad al agua de los agregados sufrió pocos cambios, o incluso aumentó en los suelos quemados en comparación con los no quemados. Este aumento se ha asociado con fuegos de baja se-

veridad (Díaz-Fierros *et al.*, 1987, 1990). Bará y Vega (1983) también encontraron, en un estudio de 40 suelos incendiados bajo *Pinus pinaster* en Galicia, una respuesta distinta en función de la severidad del incendio, no observando diferencias, con respecto a los suelos no quemados, para incendios de baja severidad y aumentando la inestabilidad de los agregados en los suelos afectados por fuegos de mayor severidad.

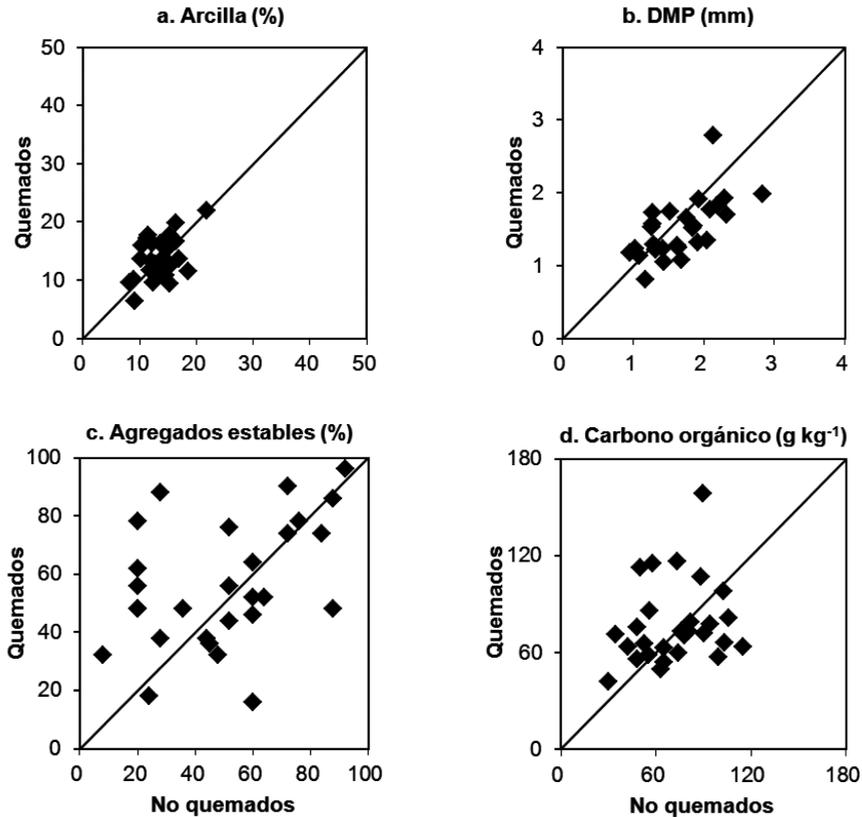


Figura 3. Diferencias en el contenido en arcilla (a), distribución de agregados por tamaños (b), estabilidad de agregados (c) y contenido en carbono (d) entre suelos quemados y no quemados en diversas zonas de Galicia. Cada punto corresponde al valor del suelo quemado frente al no quemado para cada zona de estudio.

La erosionabilidad de un suelo depende, además de la resistencia a la liberación de partículas, de su capacidad de generar un flujo de agua superficial bajo la acción de una lluvia. Este flujo tendría una doble acción: de liberación de partículas por su tracción sobre el suelo y, sobre todo, de transporte del material previamente disgregado en la superficie del suelo. Las investigaciones en Galicia indican que la repelencia al agua del suelo tras los incendios es un fenómeno muy común, afectando a la conductividad hidráulica y favoreciendo, por tanto, la formación de flujos de escorrentía superficial y la erosión del suelo (Díaz-Fierros *et al.*, 1990, 1994; Varela *et al.*, 2005,

2010a; Rodríguez-Alleres *et al.*, 2012). En general, el fuego modifica la distribución en profundidad, la intensidad y persistencia de la capa de suelo repelente al agua, dependiendo de la severidad del fuego. En incendios de severidad alta, se observó cómo se destruye la hidrofobicidad en los primeros centímetros superficiales del suelo inmediatamente después del paso del fuego, mientras aumenta la intensidad y espesor de la misma en las capas subyacentes, así como su persistencia en el tiempo (Fig. 4) (Rodríguez-Alleres *et al.*, 2012).

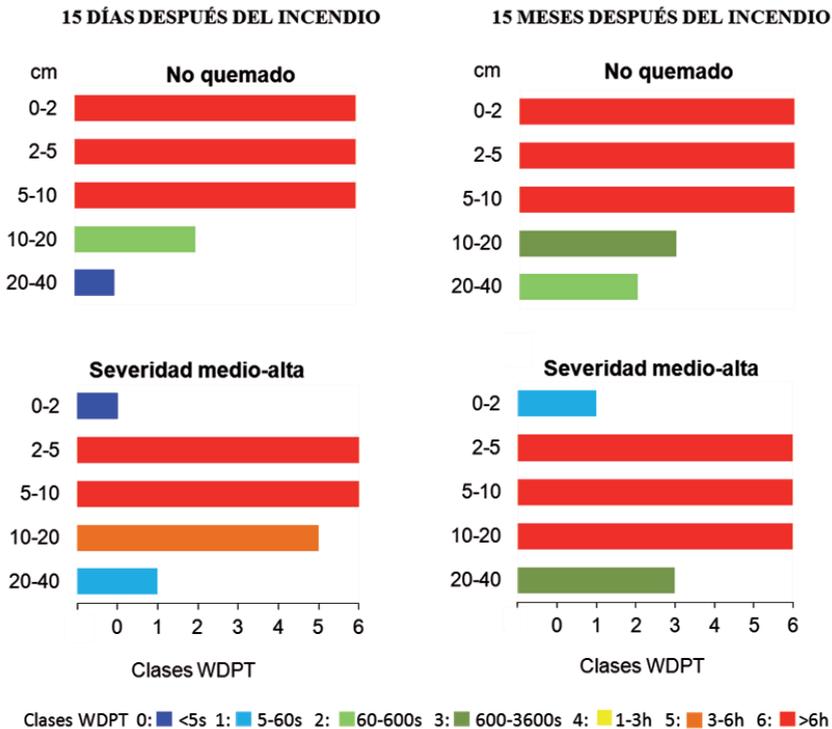


Figura 4. Clases de repelencia al agua del suelo (tiempo de penetración de la gota de agua) entre 0 y 40 cm de profundidad en una zona no quemada y en una zona adyacente afectada por un incendio de severidad medio-alta, 15 días y 15 meses después del incendio (a partir de Rodríguez-Alleres *et al.*, 2012).

Sin embargo, en incendios de menor severidad se observaron respuestas muy diferentes dependiendo del grado de repelencia que presentaban los suelos antes del incendio. Así en la Fig. 5 puede verse cómo el fuego puede inducir la aparición de repelencia al agua (con una severidad de fuerte a muy fuerte) en la superficie de los suelos que no eran repelentes antes del incendio, incrementar la severidad de la repelencia superficial en aquellos suelos que presentaban una repelencia al agua de ligera a moderada antes del fuego o mantenerse el mismo grado de repelencia en los suelos que anteriormente al incendio eran fuerte o muy fuertemente repelentes al agua.

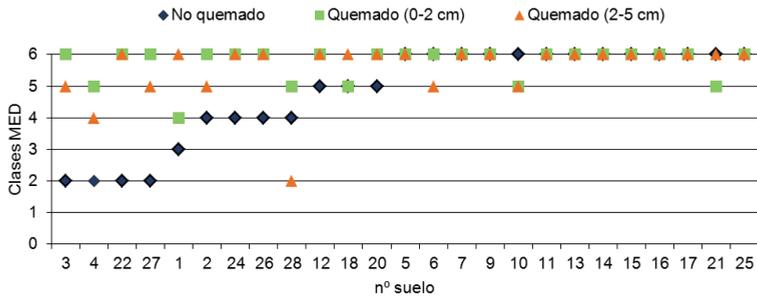


Figura 5. Cambios en la repelencia al agua (Clases MED) causada por incendios de baja severidad en los primeros 5 cm del suelo. Los suelos aparecen ordenados en orden creciente del grado de repelencia de los suelos no quemados (clase 1: muy hidrofílico, clase 2: hidrofílico, clase 3: ligeramente hidrofóbico, clase 4: moderadamente hidrofóbico, clase 5: fuertemente hidrofóbico, clase 6: muy fuertemente hidrofóbico) (a partir de Varela et al., 2010a).

Esta fuerte repelencia que presentan los suelos quemados en Galicia, bien sea en la superficie o subsuperficialmente, favorece reducciones importantes en la velocidad de infiltración del agua en el suelo, lo que se ha evidenciado tanto en experiencias de campo como de laboratorio en áreas afectadas por fuegos de distinta severidad (Díaz-Fierros et al., 1990; Fernández et al., 2008, 2012). Los mayores descensos se observaron en las zonas más severamente quemadas (Vega et al., 2013).

3.2. Efectos del calentamiento en laboratorio sobre las propiedades edáficas que controlan la erosionabilidad del suelo

Ante la dificultad para conocer en muchos casos la intensidad y duración de los incendios forestales, el uso de programas de calentamiento controlado en laboratorio resulta muy útil para estudiar con detalle la influencia de distintas temperaturas en las propiedades del suelo que van a condicionar su susceptibilidad a la erosión (Giovannini, 1994; García-Corona et al., 1994).

Las experiencias de calentamiento se realizaron con muestras de suelo recogidas en diferentes zonas de Galicia, bajo distintos materiales geológicos y bajo vegetación de *Pinus pinaster* (Soto et al., 1991; García-Corona et al., 2004; Varela et al., 2010b). Se seleccionaron las temperaturas de 25 (control), 170, 220, 380 y 460°C, en función de las reacciones térmicas más características observadas en los suelos mediante análisis térmico diferencial (Giovannini et al., 1988; Soto et al., 1991). Las características del suelo analizadas fueron las mismas que las indicadas en el apartado anterior.

Algunos de los resultados obtenidos se resumen en la tabla 1. En ella puede verse que la composición granulométrica de los suelos, no experimenta modificaciones importantes por debajo de los 220°C, mientras que se observa una tendencia hacia un incremento de la fracción arena con el aumento de la temperatura, lo que implica una disminución de la fracción arcilla, siendo esta disminución más pronunciada en el suelo de textura más fina (suelo 24) (Benito et al., 2009).

Por debajo de 220°C tampoco se observaron cambios significativos en el contenido en carbono de los suelos, mientras que a 380°C y a 460°C los contenidos en carbono experimentaron una importante disminución, con pérdidas con respecto al suelo control que oscilaron entre el 55 y el 75% a 380°C y entre el 83 y el 94% a 460°C (García-Corona *et al.*, 2004; Benito *et al.*, 2009; Varela *et al.*, 2010b).

Tabla 1. Granulometría (% de arena, limo y arcilla), contenido en carbono orgánico (g kg^{-1}), distribución de agregados por tamaños (diámetro medio ponderado, mm), agregados estables al agua (%) y conductividad hidráulica (cm h^{-1}) de las muestras de suelo calentadas a distintas temperaturas (media \pm desviación estándar). Los valores para cada suelo dentro de una misma columna son significativamente diferentes ($p < 0.05$) si las letras son diferentes.

	T (°C)	Suelo 7		Suelo 8		Suelo 24	
Arena, limo, arcilla	25	74, 16, 10		60, 21, 19		38, 51, 11	
	170	77, 14, 9		60, 21, 19		40, 49, 11	
	220	77, 14, 9		60, 21, 19		39, 51, 10	
	380	75, 16, 9		64, 21, 15		41, 50, 9	
	460	75, 16, 9		62, 24, 14		42, 52, 6	
Carbono orgánico	25	53.1	\pm 6.6 ^a	101.9	\pm 3.2 ^a	87.7	\pm 17.5 ^a
	170	48.3	\pm 10.4 ^a	103.1	\pm 15.6 ^a	86.5	\pm 18.8 ^a
	220	52.3	\pm 9.8 ^a	104.5	\pm 11.1 ^a	72.6	\pm 9.2 ^a
	380	23.8	\pm 1.9 ^b	25.5	\pm 5.0 ^b	32.3	\pm 2.5 ^b
	460	4.5	\pm 3.2 ^c	5.9	\pm 1.1 ^c	15.0	\pm 5.8 ^b
DMP	25	1.34	\pm 0.15 ^a	1.12	\pm 0.09 ^a	1.11	\pm 0.39 ^a
	170	1.25	\pm 0.17 ^a	0.74	\pm 0.04 ^{bc}	1.09	\pm 0.08 ^a
	220	1.37	\pm 0.11 ^a	0.92	\pm 0.08 ^c	0.98	\pm 0.09 ^a
	380	0.43	\pm 0.03 ^b	0.51	\pm 0.13 ^b	0.30	\pm 0.07 ^b
	460	0.38	\pm 0.03 ^b	0.61	\pm 0.03 ^b	0.24	\pm 0.04 ^b
Agregados estables	25	52	\pm 4 ^a	69	\pm 13 ^a	31	\pm 12 ^a
	170	89	\pm 5 ^b	52	\pm 7 ^{ab}	47	\pm 19 ^{ab}
	220	84	\pm 14 ^b	64	\pm 24 ^a	56	\pm 4 ^b
	380	8	\pm 8 ^c	19	\pm 18 ^b	9	\pm 10 ^c
	460	1	\pm 2 ^c	n.d.		0	\pm 0 ^c
Conductividad hidráulica	25	15.23	\pm 7.82 ^a	19.69	\pm 20.99 ^a	7.60	\pm 5.08 ^a
	170	11.45	\pm 6.09 ^a	14.42	\pm 14.04 ^{ab}	3.30	\pm 2.89 ^b
	220	0.44	\pm 1.06 ^b	5.03	\pm 8.95 ^b	0.00	\pm 0.00 ^c
	380	1.66	\pm 0.56 ^b	13.12	\pm 5.25 ^{ab}	1.93	\pm 0.85 ^{bc}
	460	1.41	\pm 0.20 ^b	6.92	\pm 2.03 ^{ab}	1.77	\pm 0.27 ^{bc}

n.d.: no determinado por no quedar agregados después de calentar las muestras de suelo a 460°C.

Tampoco se apreciaron cambios significativos en la distribución de agregados por tamaños por debajo de 220°C, mientras que la estabilidad de los agregados experimenta, en general, un claro incremento a las temperaturas de 170 y 220°C. A las temperaturas de

380 y 460°C se observó una fuerte desagregación de los suelos y una drástica reducción en la estabilidad de los agregados (García-Corona *et al.*, 2004; Benito *et al.*, 2009; Varela *et al.*, 2010b). Otras experiencias realizadas en Galicia con suelos forestales calentados a distintas temperaturas mostraron un patrón de respuesta de la estabilidad de agregados muy semejante (Díaz-Fierros *et al.*, 1987; Soto *et al.*, 1991), con un incremento por debajo de 170°C y un decrecimiento drástico a 380 y 460°C. Lo primero, se ha relacionado con las alteraciones en la composición de la materia orgánica del suelo entre 100 y 160°C pero, sobre todo, por el incremento que se produce en la repelencia al agua de los suelos en ese rango de temperaturas (ver Fig. 6), mientras que lo segundo, se debe a la pérdida de la materia orgánica por combustión (Benito *et al.*, 2009; Varela *et al.*, 2010b).

Por otra parte, al someter los suelos a un rango mayor de temperaturas en el laboratorio (Fig. 6), se pudo comprobar que el grado de repelencia al agua de los suelos se incrementa en el rango de temperaturas entre 25 y 220°C (siendo ese incremento mayor en los suelos con menor grado de repelencia inicial), alcanza sus valores máximos entre los 220 y 240°C y a partir de ahí experimenta un brusco descenso en su intensidad hasta desaparecer a los 280°C (Varela *et al.*, 2005).

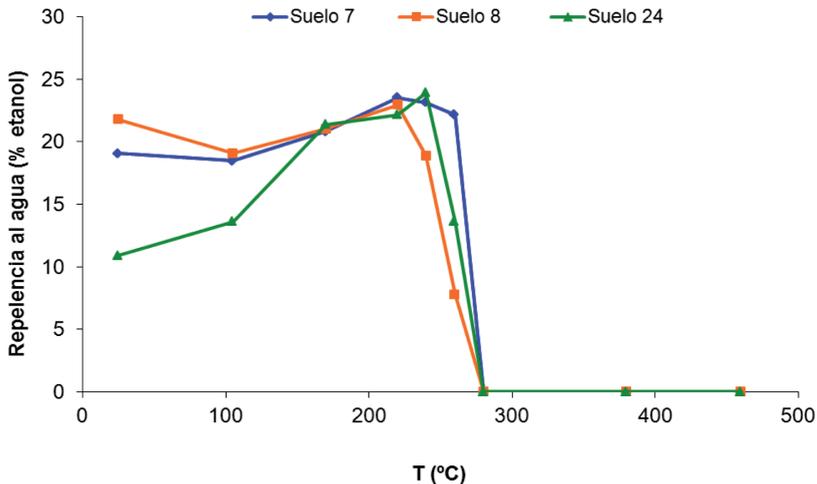


Figura 6. Efecto del calentamiento en la severidad de la repelencia al agua (test de la molaridad de etanol) de tres suelos sometidos a varias temperaturas en el laboratorio (a partir de Varela et al., 2005)

La influencia de la temperatura en la conductividad hidráulica vendría condicionada por los cambios que tienen lugar en la agregación y en la repelencia al agua de los suelos. La conductividad hidráulica disminuye con el aumento de la temperatura hasta alcanzar los valores mínimos a 220°C y se mantiene muy baja a las temperaturas de 380 y 460°C (Tabla 1). La reducción observada a los 220°C se atribuyó al incremento de la

repelencia al agua de los suelos. A temperaturas superiores, debido a que la repelencia al agua desaparece, la disminución en el tamaño y en la estabilidad de los agregados explicaría los bajos valores de conductividad hidráulica observados en los suelos estudiados (García-Corona *et al.*, 2004; Benito *et al.*, 2009).

3.3. Comparación entre los efectos de los incendios forestales y el calentamiento en el laboratorio sobre la erosionabilidad del suelo

La comparación entre los resultados obtenidos en las experiencias de calentamiento controlado en el laboratorio y los observados tras los incendios forestales, nos permitieron confirmar que el impacto inmediato de los incendios forestales en la erosionabilidad de los suelos del N.O. de España opera sobre todo a través de sus efectos sobre la materia orgánica del suelo y resulta ser claramente dependiente de la severidad de los incendios (Varela *et al.*, 2005, 2010b; Benito *et al.*, 2009).

En aquellas zonas en donde el contenido en materia orgánica de los suelos quemados o bien no cambia substancialmente o aumenta con respecto al de los suelos no quemados y que podrían considerarse, por tanto, incendios de baja severidad, el resto de las propiedades del suelo relacionadas con su erosionabilidad tampoco se ven muy afectadas por el paso del fuego, a excepción de una ligera fragmentación y reducción del tamaño de los agregados. Sin embargo, es importante señalar la fuerte o muy fuerte repelencia al agua superficial que manifiestan los suelos tras fuegos poco intensos, cuyo efecto en la erosionabilidad de los suelos podría ser doble: uno positivo, al proteger los agregados del estallido frente al impacto de las gotas de agua y aumentando, por tanto, la estabilidad al agua de los agregados, pero otro muy negativo, al frenar la entrada de agua en el suelo, favoreciendo la generación de flujos de escorrentía superficial.

En aquellos incendios de mayor severidad, en donde se produce la combustión de la materia orgánica del suelo, la degradación física de los suelos se manifiesta de manera mucho más drástica, ya que la pérdida de la materia orgánica, principal agente cementante de los suelos forestales gallegos, favorece una fuerte desagregación del suelo y una pérdida de estabilidad de los agregados. La repelencia al agua, aunque disminuye o desaparece en la superficie del suelo, se mantiene muy severa en la capa subsuperficial, por lo que aumenta de forma drástica la susceptibilidad a la erosión de los suelos quemados.

La consecuencia final de los procesos descritos es la frecuente aparición en Galicia de eventos erosivos en el otoño e invierno siguientes a los incendios y la degradación de propiedades edáficas de gran importancia (Carballas *et al.*, 2009; Vega *et al.*, 2013). En condiciones desfavorables esas pérdidas de suelo pueden alcanzar una elevada magnitud (Díaz-Fierros *et al.*, 1982; Vega *et al.*, 1982; Benito *et al.*, 1991; Fernández *et al.*, 2011). En la tabla 2 se presentan algunos datos recopilados por Vega *et al.* (2013) de pérdidas de suelo en áreas quemadas en Galicia. De ellos, se puede deducir que los valores máximos son superiores a los encontrados en áreas mediterráneas quemadas (Shakesby y Doerr, 2006; Pausas *et al.*, 2008) y, sobre todo, contrastan con la casi nula erosión que se produce en las áreas forestales en Galicia, en ausencia del fuego (Díaz-Fierros *et al.*, 1990; Benito *et al.*, 1991; Soto *et al.*, 1994; Vega *et al.*, 2005, 2013).

Tabla 2. Datos de pérdidas de suelo por erosión en áreas quemadas de Galicia (a partir de Vega et al., 2013).

Erosión (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)	Precipitación (mm)	Autor
15.0-170.0	1400	Díaz-Fierros et al. (1982)
21.7	2000	Vega et al. (1982)
2-13	1400	Soto et al. (1994)
0.2-0.6	1412	Vega et al. (2005)
35.0	1520	Fernández et al. (2011)
2.0	754	Díaz-Raviña et al. (2012)
20.4	1033	Vega et al. (2013)

4. Conclusiones

Los suelos forestales de Galicia se caracterizan por presentar una susceptibilidad a la erosión muy baja, debido principalmente a su textura predominantemente gruesa, a sus altos contenidos en materia orgánica y a la elevada estabilidad de los agregados.

El impacto de los incendios forestales en la erosionabilidad de estos suelos opera sobre todo a través de sus efectos sobre la materia orgánica del suelo, siendo claramente dependiente de la severidad de los incendios. La susceptibilidad a la erosión se vería poco afectada en incendios de baja severidad pero aumentaría de forma notable en incendios de severidad alta. Las investigaciones en Galicia también han indicado que la repelencia al agua del suelo es un fenómeno muy común después del paso del fuego, considerándose un factor clave en la generación de flujos superficiales y en los procesos erosivos, al reducir drásticamente la conductividad hidráulica de los suelos quemados.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por la Xunta de Galicia (proyectos PGIDI-T02RFO30101PR y CN2012/108) y por el Ministerio de Ciencia e Innovación (proyecto AGL2008-01399/FOR).

Referencias bibliográficas

- Arcenegui, V., Mataix-Solera, J., Guerrero, C., Zornoza, R., Mataix-Beneyto, J., García-Orenes, F. 2008. Immediate effects of wildfires on water repellency and aggregate stability in Mediterranean calcareous soils. *Catena* 74, 219-226.
- Bará, S., Vega, J.A. 1983. *Efectos de los incendios forestales en los suelos del N.O. de España*. Publicación del Departamento Forestal de las Zonas Húmedas. Lourizán, Pontevedra, CRIDA 0.1- INIA.
- Benito, E., Díaz-Fierros, F. 1989. Estudio de los principales factores que intervienen en la estabilidad estructural de los suelos de Galicia. *Anales de Edafología y Agrobiología* 48, 229-253.
- Benito, E., Díaz-Fierros, F. 1992a. Effect of cropping on the structural stability of soils rich in organic matter. *Soil & Tillage Research* 23, 153-161.

- Benito, E., Díaz-Fierros, F. 1992b. 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 Rueda, E., Gómez-Ulla, A., Díaz-Fierros Viqueira, F. 1986. Descripción de un simulador de lluvia para estudios de erodibilidad del suelo y estabilidad de los agregados al agua. *Anales de Edafología y Agrobiología* 45 (9-10), 1115-1126.
- Benito E., Soto B., Díaz-Fierros F. 1991. Soil erosion studies in N.W. Spain. En *Soil erosion studies in Spain*, M. Sala, J.L. Rubio, J.M. García-Ruíz (eds.), Geoforma Ediciones, Logroño, pp. 55-77.
- Benito, E., de Blas, E., Santiago, J.L., Varela, M.E. 2001. Descripción y puesta a punto de un simulador de lluvia de campo para estudios de escorrentía superficial y erosión del suelo. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe* 26, 211-220.
- Benito, E., Santiago, J.L., de Blas, E., Varela, M.E. 2003. Deforestation of water-repellent soils in Galicia (NW Spain): effects on surface runoff and erosion under simulated rainfall. *Earth Surface Processes and Landforms* 28, 145-155.
- Benito, E., Soto, B., Varela, M.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 en la respuesta hidrológica y en la erosión hídrica. En *Efectos de los incendios forestales sobre los suelos en España. El estado de la cuestión visto por los científicos españoles*, A. Cerdà, J. Mataix-Solera (eds.), Cátedra Divulgación de la Ciencia, Valencia, pp. 303-323.
- Benito, E., Cerdà, A., Soto, B., Díaz-Fierros, F., Rubio, J.L., Varela, M.E., Rodríguez-Alleres, M. 2010. Métodos para el estudio de la erosionabilidad del suelo: su aplicación en suelos afectados por incendios forestales. En *Actualización en métodos y técnicas para el estudio de los suelos afectados por incendios forestales*, A. Cerdà, A. Jordán (eds.), Cátedra Divulgación de la Ciencia, Valencia, pp. 85-107.
- Bryan, R.B. 2000. Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. *Geomorphology* 32, 385-415.
- Calvo, A., Gisbert, B., Palau, E., Romero, M. 1988. Un simulador de lluvia portátil de fácil construcción. En *Métodos y técnicas para la medición de procesos geomorfológicos*, M. Sala, F. Gallart (eds), S.E.G. Monografía 1, 6-15.
- Carballas, T., Martín, A., Díaz-Raviña, M. 2009. Efecto de los incendios forestales sobre los suelos de Galicia. En *Efectos de los incendios forestales sobre los suelos en España. El estado de la cuestión visto por los científicos españoles*, A. Cerdà, J. Mataix-Solera (eds.), Cátedra Divulgación de la Ciencia, Valencia, pp. 269-301.
- Cerdà, A. 1999. Simuladores de lluvia y su aplicación a la geomorfología. Estado de la cuestión. *Cuadernos de Investigación Geográfica* 25, 45-84.
- Cerdà, A., Doerr, S.H. 2005. Influence of vegetation on soil hydrology and erodibility following fire: an 11-year investigation. *International Journal of Wildland Fire* 14, 423-437.
- Cerdà, A., Hooke, J. Romero-Díaz, A., Montanarella, L., Lavee, H. 2010. Soil erosion on Mediterranean Type-Ecosystems. *Land Degradation and Development* 21, 71-74.
- Chenu, C., Le Bissonnais, Y., Arrouays, D. 2000. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal* 64, 1479-1486.
- Díaz-Fierros, F., Benito, E. 1991. Material geológico y erosionabilidad del suelo en Galicia. *Revista Academia Galega de Ciencias* 10, 126-143.
- Díaz-Fierros, F., Benito, E. 1996. Rainwash erodibility of Spanish soils. En *Soil degradation and desertification in Mediterranean environments*, J.L. Rubio, A. Calvo-Cases (eds), Geoforma Ediciones, Logroño, pp. 91-103.

- Díaz-Fierros, F., Gil Sotres, F., Cabaneiro, A., Carballas, T., Leirós, M.C., Villar, M.C. 1982. Efectos erosivos de los incendios forestales en suelos de Galicia. *Anales de Edafología y Agrobiología* 41, 627-639.
- Díaz-Fierros, F., Benito, E., Pérez, R. 1987. Evaluation of the U.S.L.E. for prediction of erosion in burnt forest areas in Galicia (NW Spain). *Catena* 14, 189-199.
- Díaz-Fierros, F., Benito, E., Vega, J.A., Castelao, A., Soto, B., Pérez, R., Taboada, T. 1990. Solute loss and soil erosion in burnt soil from Galicia (NW Spain). En *Fire in ecosystem dynamics*, J.G. Goldammer, M.J. Jenkins (eds.), SPB Academic Publishing, The Netherlands, pp. 103-116.
- Díaz-Fierros, F., Benito, E., Soto, B. 1994. Action of forest fires on vegetation cover and soil erodibility. En *Soil erosion and degradation as a consequence of forest fires*, M. Sala, J.L. Rubio (eds.), Geoforma Ediciones, Logroño, pp. 163-176.
- 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.
- Doerr, S.H., Shakesby, R.A., Walsh, R.P.D. 2000. Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological consequences. *Earth-Science Reviews* 51, 33-65.
- Evans, R. 1980. Mechanics of water erosion and their spatial and temporal controls: an empirical viewpoint. En *Soil Erosion*, M.J. Kirkby, R.P.C. Morgan (eds.), John Wiley & Sons, New York, pp. 109-128.
- Fernández, C., Vega, J.A., Fonturbel, M.T., Jiménez, E., Pérez, J.R. 2008. Immediate effects of prescribed burning, chopping and clearing on runoff, infiltration and erosion in a shrubland area in Galicia (NW Spain). *Land Degradation and Development* 19, 502-515.
- 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). *International Journal of Wildland Fire* 20, 104-114.
- Fernández, C., Vega, J.A., Fonturbel, M.T. 2012. The effects of fuel reduction treatments on runoff, infiltration and erosion in two shrubland areas in the north of Spain. *Journal of Environmental Management* 105, 96-102.
- Franco, C.M.M., Clarke, P.J., Tate, M.E., Oades, J.M. 2003. Chemical characterisation of water repellent materials in Australian sands. En *Soil Water Repellency: Occurrence, Consequences and Amelioration*, C.J. Ritsema, L.W. Dekker (eds.), Elsevier Science, The Netherlands, pp. 37-50.
- 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. *International Journal of Wildland Fire* 13, 195-199.
- Giovannini, G. 1994. The effect of fire on soil quality. En *Soil degradation and desertification in mediterranean environments*, J.L. Rubio, A. Calvo (eds.), Geoforma Ediciones, Logroño, pp. 9-12.
- Giovannini, G., Lucchesi, S., Cervelli, S. 1983. Water-repellent substances and aggregate stability in hydrophobic soil. *Soil Science* 135(2), 110-113.
- Giovannini, G., Lucchesi, S., Giachetti, M. 1988. Effect of heating on some physical and chemical parameters related to soil aggregation and erodibility. *Soil Science* 146, 255-262.
- Goebel, M., Bachmann, J., Woche, S.K., Fischer, W.R. 2005. Soil wettability, aggregate stability and the decomposition of soil organic matter. *Geoderma* 128, 80-93.
- Iserloh, T., Ries, J.B., Arnáez, J., Boix-Fayos, C., Butzen, V., Cerdà, A., Echeverría, M.T., Fernández-Gálvez, J., Fister, W., Geißler, C., Gómez, J.A., Gómez-Macpherson, H., Kuhn, N.J., Lázaro, R., León, F.J., Martínez-Mena, M., Martínez-Murillo, J.F., Marzen, M., Mingorance, M.D., Ortigosa, L., Peters, P., Regúés, D., Ruiz-Sinoga, J.D., Scholten, T., Seeger, M., Solé-

- Benet, A., Wengel, R., Wirtz, S. 2013. European small portable rainfall simulators: a comparison of rainfall characteristics. *Catena* 110, 100-112.
- Lal, R., Elliot, W. 1994. Erodibility and Erosivity. En *Soil Erosion Research Methods*, R. Lal (ed.), 2ª ed. Soil and Water Conservation Society, pp. 181-208.
- Le Bissonnais, Y., Blavet, D., de Noni, G., Laurent, J.Y., Chenu, C. 1997. Erodibility of Mediterranean vineyard soils: relevant aggregate stability methods and significant soil variables. *European Journal of Soil Science* 58, 188-195.
- Mataix-Solera, J., Doerr, S.H. 2004. Hydrophobicity and aggregate stability in calcareous topsoil from fire affected pine forests in southeastern Spain. *Geoderma* 118, 77-88.
- Mataix-Solera, J., Benito, E., Andreu, V., Cerdà, A., Llovet, J., Úbeda, X., Martí, C., Varela, E., Gimeno, E., Arcenegui, V., Rubio, J.L., Campo, J., García-Orenes, F., Badía, D. 2010. ¿Cómo estudiar la estabilidad de agregados en suelos afectados por incendios? Métodos e interpretación de resultados. En *Actualización en métodos y técnicas para el estudio de los suelos afectados por incendios forestales*, A. Cerdà, A. Jordán (eds.), Cátedra Divulgación de la Ciencia, Valencia, pp. 105-141.
- Mataix-Solera, J., Cerdà, A., Arcenegui, V., Jordán, A., Zavala, L.M. 2011. Fire effects on soil aggregation: A review. *Earth-Science Reviews* 109, 44-60.
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. 2012. *Los incendios forestales en España. Decenio 2001-2010*. Madrid.
- Morgan, R.P.C. 2005. *Soil Erosion and Conservation*, 3ª ed. Blackwell Publishing, Oxford.
- Pausas, J.G., Llovet, J., Rodrigo, A., Vallejo, V.R. 2008. Are wildfires a disaster in the Mediterranean basin? A review. *International Journal of Wildland Fire* 17, 713-723.
- Rodríguez-Alleres, M., Benito, E. 2011. Spatial and temporal variability of surface water repellency in sandy loam soils of NW Spain under *Pinus pinaster* and *Eucalyptus globulus* plantations. *Hydrological Processes* 25, 3649-3658.
- Rodríguez-Alleres, M., Benito, E. 2012. Temporal fluctuations of water repellency in forest soils of Galicia, NW Spain. Do soil samples dried at laboratory reflect the potential soil water repellency? *Hydrological Processes* 26, 1179-1187.
- 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 *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo*, F.J. Samper Calvete, A. Paz González (eds.), Vol. VII, pp. 165-168.
- Rodríguez-Alleres, M., Benito, E., de Blas, E. 2007. Extent and persistence of water repellency in north-western Spanish soils. *Hydrological Processes* 21, 2291-2299.
- 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.
- Shakesby, R.A., Doerr, S.H. 2006. Wildfire as a hydrological and geomorphological agent. *Earth-Science Reviews* 74, 269-307.
- Soto, B., Benito, E., Díaz-Fierros, F. 1991. Heat-induced degradation processes in forest soils. *International Journal of Wildland Fire* 1, 147-152.
- Soto, B., Basanta, R., Benito, E., Pérez, R., Diaz-Fierros, F. 1994. Runoff and erosion from burnt soils in N.W. Spain. En *Soil Erosion and Degradation as a Consequence of Forest Fires*, M. Sala, J.L. Rubio (eds.), Geoforma Ediciones, Logroño, pp. 91-98.
- Tisdall, J.M., Oades, J.M. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science* 33, 141-163.
- Varela, M.E., Benito, E., de Blas, E. 2005. Impact of wildfires on surface water repellency in soils of northwest Spain. *Hydrological Processes* 19, 3649-3657.

- Varela, M.E., Benito, E., Keizer, J. 2010 a. Wildfire effects on soil erodibility of woodlands in NW Spain. *Land Degradation and Development* 21, 75-82.
- Varela, M.E., Benito, E., Keizer, J. 2010 b. Effects of wildfire and laboratory heating on soil aggregate stability of pine forest in Galicia: the role of lithology, soil organic matter content and water repellency. *Catena* 83, 127-134.
- Vega, J.A., Bará, S., Villamuera, M.A., Alonso, M. 1982. *Erosión después de un incendio forestal*. Dep. Forestal de Zonas Húmedas, 24 pp.
- Vega, J.A., Fernández, C., Fonturbel, T. 2005. Throughfall, runoff and soil erosion after prescribed burning in gorse shrubland in Galicia (NW Spain). *Land Degradation and Development* 15, 1-15.
- Vega, J.A., Fonturbel, T., Fernández C., Arellano, A., Díaz-Raviña M., Carballas, M.T., Martín, A., González-Prieto, S., Merino, A., Benito, E. 2013. *Acciones urgentes contra la erosión en áreas forestales quemadas. Guía para su planificación en Galicia*. Santiago de Compostela, 139 pp.
- Wischmeier, W.H., Johnson, C.B., Cross, B.V. 1971. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *Journal of Soil and Water Conservation* 26, 189-192.