

Investigador Principal

Lara Anoa Arroyo Méndez

Licenciada en Ciencias Ambientales por la Universidad Autónoma de Madrid
Doctorada en Silvopascicultura por la Universidad Politécnica de Madrid
Investigadora postdoctoral del Centro de Investigación del Fuego (Fundación General del Medio Ambiente de Castilla-La Mancha)

Equipo Investigador

María Belén Hinojosa Centeno

Licenciada en Biología por la Universidad de Jaén
Doctora en Biología por la Universidad de Jaén
Investigadora postdoctoral del Centro de Investigación del Fuego
(Fundación General del Medio Ambiente de Castilla-La Mancha)

Índice

| | Página |
|--|--------|
| RESUMEN Y PALABRAS CLAVE | 4 |
| 1. INTRODUCCIÓN | 4 |
| 2. OBJETO Y ALCANCE | 5 |
| 3. MATERIALES Y METODOLOGÍA | 5 |
| 3.1. Selección, muestreo y descripción edáfica de los suelos | 5 |
| 3.2. Tratamientos de choque térmico sobre los suelos | 6 |
| 3.3. Análisis físico-químico de las muestras de suelo | 7 |
| 3.4. Análisis espectral de las muestras de suelo | 7 |
| 3.5. Análisis estadísticos | 9 |
| 4. RESULTADOS | 9 |
| 4.1. Descripción edáfica general de los suelos seleccionados para el estudio | 9 |
| 4.2. Efectos visibles de los tratamientos de choque térmico | 10 |
| 4.3. Propiedades físico-químicas medidas en laboratorio | 12 |
| 4.4. Comportamiento espectral de las muestras de suelo | 15 |
| 4.5. Análisis estadísticos comparativos | 17 |
| 5. DISCUSIÓN | 18 |
| 6. CONCLUSIONES | 21 |
| 7. AGRADECIMIENTOS | 21 |
| 8. BIBLIOGRAFÍA | 21 |

RESUMEN

Conocer con precisión la severidad de los incendios es fundamental para programar las tareas de restauración de manera eficaz. El objetivo de este proyecto era evaluar la posibilidad de emplear radiometría VNIR para caracterizar de manera rápida y eficaz el efecto de incendios de diferente severidad en las propiedades de los suelos. Para ello, se llevaron a cabo diferentes tratamientos de choque térmico en condiciones controladas en el laboratorio. Las muestras de suelo fueron entonces analizadas, tanto con técnicas tradicionales (análisis físico-químicos en el laboratorio) como con radiometría VNIR. Los resultados muestran que el contenido en materia orgánica, el nitrógeno total y la capacidad de intercambio catiónico disminuyen durante los tratamientos de choque térmico, mientras que el fósforo disponible y el pH aumentan. Respecto a los análisis radiométricos, el choque térmico produce un descenso de la reflectividad a lo largo de todas las regiones del espectro VNIR y la disminución en la profundidad de los picos de absorción de agua (1400, 1900 y 2200 nm). En general, los cambios observados (tanto en las medidas radiométricas como para las variables estimadas en el laboratorio) dependen significativamente de la severidad del tratamiento, entendiéndose esta como la combinación de la temperatura y el tiempo de exposición. Este trabajo establece una base metodológica sólida para la realización de medidas con radiometría VNIR sobre suelos quemados. Los indicios encontrados en este estudio, así como los avances realizados en aspectos metodológicos, abren una línea de investigación de gran interés para la gestión de áreas quemadas.

PALABRAS CLAVE: Incendios, suelo, radiometría VNIR, intensidad de quema, severidad del fuego

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha detectado un aumento en el número y extensión de los incendios forestales en la cuenca Mediterránea [Moreno *et al.*, 1]. Además, según las previsiones del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC), las condiciones van a ser aún más adversas, con veranos más largos, más periodos de sequía y olas de calor. En este escenario de aumento en el peligro de incendio, el estudio de los incendios forestales, sus efectos y procesos de regeneración es cada vez más importante de cara a una correcta gestión del fuego.

Conocer la severidad de los incendios es fundamental para la gestión post-incendio. En función de la temperatura alcanzada y del tiempo de residencia, se producirán cambios específicos en las propiedades del suelo. Fuegos de baja intensidad (menos de 250°C y corta duración) afectan a las propiedades biológicas y químicas del suelo [Palm *et al.*, 2], mientras que fuegos más intensos pueden alterar propiedades como la textura, la mineralogía o la

capacidad de intercambio catiónico [Palm *et al.*, 2, Ketterings *et al.*, 3]. Esto hace que los tratamientos paliativos y medidas de gestión a tomar tras un incendio (replantaciones, extracciones madereras, protección del suelo contra la erosión, mapas de intervención prioritaria, etc.) no sean generalizables, sino que dependen en gran medida de los efectos concretos del incendio, así como de la distribución espacial de dichos efectos sobre el área afectada. Poder estimar con precisión los cambios ocurridos en los suelos quemados es, por tanto, esencial para programar las tareas de restauración de manera eficaz. Además, conocer los efectos del fuego en el suelo permite también analizar y entender la evolución post-fuego de sus propiedades, la respuesta de la vegetación, los cambios hidrológicos y los procesos de erosión.

Los métodos usados hoy en día para estimar la severidad del fuego suelen resultar costosos, subjetivos y poco precisos [Guerrero, 4]. Es necesario el desarrollo de líneas de investigación para el desarrollo de nuevas técnicas de caracterización de suelos quemados, que aporten resultados rápidos y permitan el estudio, evaluación y tratamiento de los suelos afectados por incendios de distinta intensidad. En este proyecto, hemos estudiado el potencial de la radiometría VNIR como alternativa para la caracterización de suelos quemados.

La radiometría es la ciencia que se ocupa del estudio de la medida de la radiación electromagnética. Más concretamente, la radiometría VNIR (está relacionada con la medición de la radiación electromagnética en las regiones del visible (VIS) (350-750 nm) e infrarrojo cercano (IRC) (750-2500 nm) del espectro. Dichas regiones del espectro abarcan las longitudes de onda en que los componentes del suelo poseen un comportamiento espectral distintivo, lo que permite su identificación y cuantificación [Dematté *et al.*, 5]. Por tanto, esta técnica podría representar una alternativa rápida y precisa para evaluar los cambios ocurridos en las propiedades del suelo tras un incendio forestal.

La radiometría tiene varias ventajas frente a otras técnicas analíticas. En primer lugar, se trata de un *análisis muy rápido* (< 1s). Esta característica es especialmente importante para el estudio de los suelos, ya que éstos tienen una alta heterogeneidad espacial, por lo que poder hacer sólo unas pocas medias muy precisas suele ser peor opción que poder hacer cientos de medidas algo menos precisas [McBratney *et al.*, 6]. Por otra parte, los espectros se obtienen sin necesidad de realizar extracciones con reactivos químicos ni ningún otro procesamiento laborioso. *No es necesario pre-tratamiento de la muestra, si no que la muestra se escanea tal y como es.* Además, por su sencillez, *no hace falta personal especializado* para escanear las muestras. Por tanto, el *coste económico* de obtención de un espectro es mínimo. Sólo existe un coste de amortización del espectro-radiómetro, que es prácticamente el único instrumental necesario. Otra de las características interesantes de esta técnica es la *multiplicidad de análisis*, ya que una vez se ha obtenido el espectro, a partir de éste podemos estimar varios parámetros a la vez [Ben-Dor y Banin, 7]. Por último, cabe destacar que se

trata de una *técnica no destructiva*. No se altera la muestra a medir, puesto que no existe un contacto físico con la misma.

En contraposición, son muchos los factores que inciden en la variabilidad espectral y espacial de una muestra de suelo, por lo que no es sencillo establecer una relación sólida entre las propiedades de los suelos y sus curvas espectrales [García Rodríguez y Muñoz León, 8]. Hasta que no ha habido un desarrollo importante en la capacidad computacional de los ordenadores, el uso de la radiometría como técnica analítica ha sido muy escaso, y el número de aplicaciones limitado [Guerrero, 4]. Cada espectro obtenido mediante radiometría VNIR suele estar formado por cientos o miles de datos, y se requiere de calibraciones relativamente complejas para su análisis. Hasta hace pocos años, estos análisis eran poco accesibles y difíciles de abordar.

En los últimos años se han generado una amplia gama de software (en parte gratuito) con paquetes estadísticos capaces de aplicar métodos de regresión multivariante complejos. Esto ha permitido que las aplicaciones de la radiometría en suelos hayan aumentado de forma notable. Los primeros trabajos eran simples relaciones entre el color de los suelos y el contenido en humedad, la concentración de materia orgánica y/o la presencia de ciertos óxidos de hierro. En la bibliografía más reciente podemos encontrar referencias sobre la utilidad de estas técnicas para el análisis de diversas propiedades edáficas, tanto físicas y químicas como biológicas. Esta técnica se ha empleado para la estimación en distintas propiedades del suelo como: materia orgánica, arcilla, óxidos de hierro [Coleman *et al.*, 9]; capacidad de intercambio catiónico [Bendor y Banin, 7]; calcio, magnesio, fósforo, y contenido en potasio [Janik *et al.*, 10]; pH, ratio Ca:Mg [Dunn *et al.*, 11]; humedad del suelo [Lobell y Asner, 12]; contenido en nitrógeno [Vagen *et al.*, 13]; o conductividad eléctrica del suelo [Shrestha, 14]. Según los resultados obtenidos hasta la fecha, tras realizar calibraciones robustas, la estimación de una propiedad edáfica mediante radiometría puede llegar a ser igual de precisa o más que la obtenida a través de los métodos de análisis clásicos [Viscarra Rossel *et al.*, 15].

En este proyecto, hemos evaluado el potencial de emplear técnicas radiométricas para caracterizar de manera rápida y eficaz el efecto de incendios de diferente intensidad y duración en las propiedades de los suelos. Para ello, hemos investigado qué tratamientos de choque térmico son relevantes de cara al estudio de los efectos de incendios reales y cómo llevar a cabo dichos tratamientos de manera robusta (de forma que las medidas sean comparables entre sí). Además, hemos puesto en práctica tanto técnicas tradicionales de caracterización de suelos quemados (mediante análisis físico-químicos en laboratorio) como las metodologías más recientes de radiometría VNIR (con espectro-radiómetro ASD FieldSpec 3). Eso nos ha permitido caracterizar y analizar los efectos de choques térmicos sobre los suelos, así como evaluar la precisión de la radiometría VNIR para detectar y caracterizar dichos efectos.

2. OBJETO Y ALCANCE

El objetivo de este proyecto era evaluar la posibilidad de emplear técnicas radiométricas para caracterizar de manera rápida y eficaz el efecto de incendios de diferente severidad en las propiedades de los suelos. Para ello, se han abordado los siguientes objetivos específicos:

- Analizar mediante radiometría VNIR el comportamiento espectral de los suelos sometidos a choque térmico.
- Testar la capacidad de la radiometría VNIR de laboratorio para detectar los cambios producidos en los suelos como consecuencia de incendios.

Existen en la actualidad un elevado número de sensores remotos, tanto aerotransportados como en plataformas espaciales, que permiten obtener mediciones espectrales de la cubierta terrestre. Las medidas obtenidas con dichos sensores son de la misma naturaleza que las obtenidas mediante radiometría, aunque con distinta resolución dependiendo de cada sensor. Por tanto, este estudio representa en inicio de una línea de investigación de gran interés para la restauración de áreas quemadas, como es el empleo de técnicas de teledetección para el estudio de la severidad de incendios forestales.

Es importante destacar que este proyecto representa simplemente un punto de partida, pero buena parte de dicha línea de investigación queda fuera del alcance del proyecto que aquí se presenta. Se trata en este punto de evaluar el potencial de la radiometría de laboratorio (es decir, en condiciones controladas) para detectar los efectos del tratamiento de choque térmico sobre el suelo. Lógicamente, puesto que las medidas realizadas en laboratorio son controladas e independientes de factores externos (fuente de iluminación constante, dispersión difusa mínima, interferencias eliminadas, etc.), los resultados de este estudio no son directamente aplicables a medidas realizadas en campo. Si sirven, no obstante, para adquirir el conocimiento necesario para poder abordar con rigor el estudio de la radiometría de campo para la caracterización de suelos quemados.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Selección, muestreo y descripción edáfica de los suelos

El estudio se ha llevado a cabo sobre dos tipos de suelos de propiedades edáficas bien contrastadas: el *Suelo 1* es de carácter calizo y con un elevado contenido en materia orgánica. Este suelo se localiza en un pinsapar del Parque Natural Sierra de las Nieves (Málaga); el *Suelo 2* procede de un matorral de jaras y ericas del Coto de Caza de Quintos de Mora (Toledo) y es de carácter silíceo y con bajo contenido en materia orgánica.

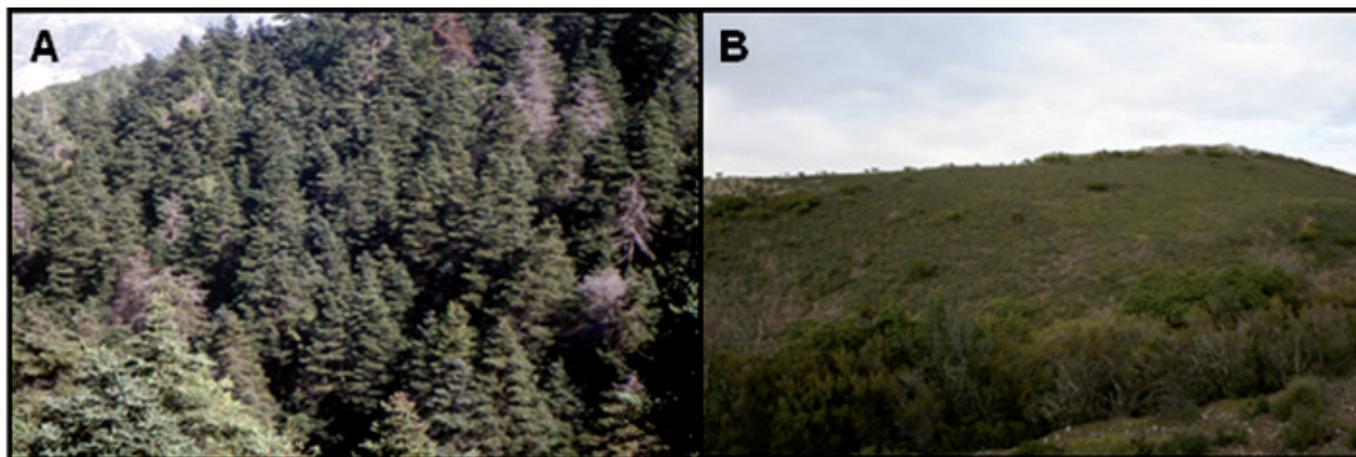


Figura 1. Fotografías de las zonas en las que se tomaron las muestras de suelo utilizadas en este estudio: A) Bosque de Abies Pinsapo Boiss. en el Parque Natural Sierra de las Nieves (Suelo 1) y B) matorral arbustivo del Coto de Caza de Quintos de Mora (Suelo 2)..

En cada una de estas zonas se tomaron muestras de suelo de los primeros 5 centímetros de profundidad del perfil edáfico. Las muestras de suelo se tomaron al azar con un muestreador cilíndrico de 7 cm de diámetro y se mezclaron entre ellas hasta conseguir una cantidad de aproximadamente 25 kg de muestra por cada suelo. Los suelos fueron trasladados al laboratorio en neveras isotérmicas portátiles, donde se secaron al aire, se tamizaron (<2 mm) y se homogeneizaron.

Los suelos muestreados se clasificaron en base a la naturaleza de sus capas y horizontes, reflejo de la acción de diversos agentes y procesos de formación edáfica. Se realizaron para ello perfiles de ambos suelos. Cada perfil realizado se ha considerado representativo de los suelos presentes en las zonas de muestreo. Para la descripción y clasificación de los suelos se emplearon las normas de la FAO.

3.2. Tratamientos de choque térmico sobre los suelos

Para desarrollar un modelo empírico preciso es imprescindible que las muestras empleadas para la construcción del modelo sean representativas. Una revisión bibliográfica permitió identificar los rangos de severidad observados en fuegos reales.

La severidad de un incendio está definida por dos componentes: intensidad y duración [Certini, 16]. La intensidad

hace referencia a la cantidad de energía que se libera durante el incendio, y está directamente relacionada con la temperatura alcanzada. En los incendios forestales, las temperaturas máximas en la superficie del suelo oscilan entre los 200 y los 500°C [Certini, 16, DeBano *et al.*, 17]. Al inicio del incendio, cuando hay humedad en el suelo, el calor se transporta mejor, penetrando a mayor profundidad, pero el calor latente de vaporización evita que la temperatura del suelo supere los 95°C [Campbell *et al.*, 18]. Cuando el agua se evapora completamente, la temperatura sube rápidamente, alcanzando típicamente los 200-300°C [Franklin *et al.*, 19], y pudiendo llegar a valores instantáneos de hasta 850°C si la carga de combustible es elevada [DeBano, 20].

La duración es quizás el componente de la severidad que resulta más dañino en términos de profundidad del suelo [Certini, 16]. Después de un incendio, la temperatura del suelo puede permanecer elevada durante un margen de tiempo que varía entre unos minutos hasta varios días. En la literatura, existen referencias relativas a fuegos prescritos (que se caracterizan por una duración corta) frente a fuegos naturales (de mayor duración y mayor severidad). Sin embargo, apenas se ha encontrado referencias que estudien en detalle este componente de la severidad. En un estudio realizado por Guerrero *et al.* [21] se evaluó la relación entre la temperatura máxima alcanzada y el tiempo de exposición y la respuesta espectral de muestras

Tabla 1. Condiciones (temperatura y tiempo de exposición) de los tratamientos de choque térmico a los que fueron sometidas las muestras de suelo*

| Tratm. | T ^a | Tiempo |
|--------|----------------|--------|--------|----------------|--------|--------|----------------|--------|--------|----------------|--------|
| 100-1 | 100 | 1 min | 100-5 | 100 | 5 min | 100-10 | 100 | 10 min | 100-30 | 100 | 30 min |
| 200-1 | 200 | 1 min | 200-5 | 200 | 5 min | 200-10 | 200 | 10 min | 200-30 | 200 | 30 min |
| 300-1 | 300 | 1 min | 300-5 | 300 | 5 min | 300-10 | 300 | 10 min | 300-30 | 300 | 30 min |
| 400-1 | 400 | 1 min | 400-5 | 400 | 5 min | 400-10 | 400 | 10 min | 400-30 | 400 | 30 min |
| 500-1 | 500 | 1 min | 500-5 | 500 | 5 min | 500-10 | 500 | 10 min | 500-30 | 500 | 30 min |
| 600-1 | 600 | 1 min | 600-5 | 600 | 5 min | 600-10 | 600 | 10 min | 600-30 | 600 | 30 min |
| 700-1 | 700 | 1 min | 700-5 | 700 | 5 min | 700-10 | 700 | 10 min | 700-30 | 700 | 30 min |

* Tratm. = Tratamiento; T^a = Temperatura en °C

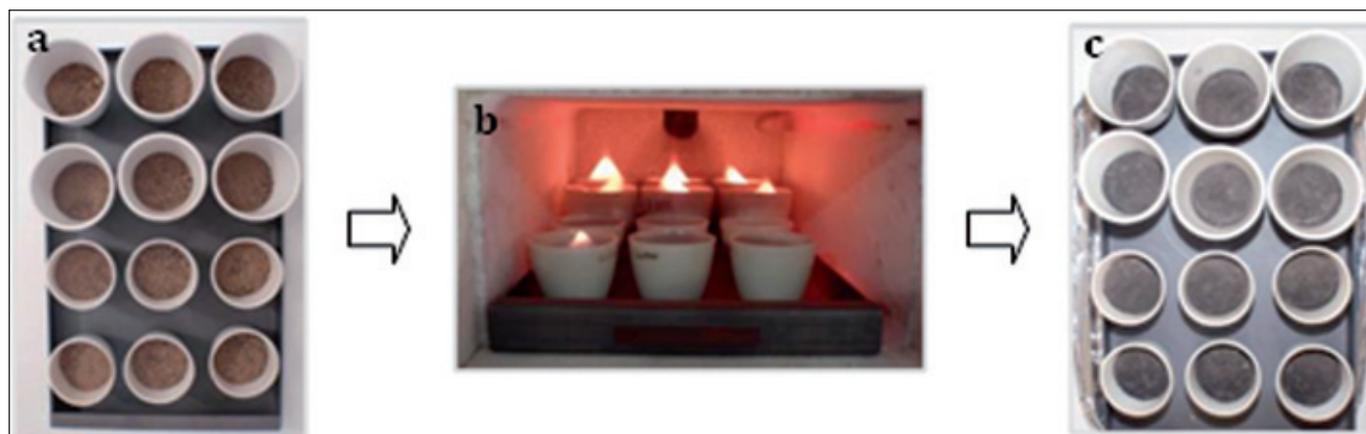


Figura 2. Tratamiento de las muestras de suelo: a) alícuotas de suelo pesadas y listas para el tratamiento; b) tratamiento de choque térmico en horno mufla y c) aspecto de las muestras un vez tratadas.

de suelo sometidas a choque térmico. El rango de temperaturas evaluadas es de 70 a 700°C, y de 10 a 60 minutos para los tiempos de exposición. Estos autores detectaron diferencias significativas en los espectros de suelos sometidos a distinta temperatura, pero no así para los tiempos de exposición evaluados. No se han encontrado estudios que evalúen tiempos de exposición más cortos a 10 minutos.

En base a la revisión bibliográfica, se programaron 28 tratamientos de choque térmico por cada suelo (tabla 1), a los que se añade una muestra control (no tratada) por tipo de suelo. Se evaluaron rangos de temperatura de entre 100 y 700°C y de tiempo de exposición entre 1 y 30 minutos. Con ello pretendemos cubrir los rangos descritos en la bibliografía, tanto para quemaduras prescritas como para incendios naturales/no controlados.

El tratamiento de las muestras se llevó a cabo en alícuotas de 10 gr colocadas en crisoles independientes. Se emplearon con alícuotas pequeñas porque la temperatura alcanzada en la parte superficial de la muestra disminuye al profundizar en la misma [Guerrero, 4]. Utilizando alícuotas pequeñas se minimizaba el gradiente de temperaturas dentro de la muestra. Las muestras se quemaron en horno mufla (C Carbolite, modelo AAF1100) según los tratamientos indicados en la tabla 1. A continuación, todas las alícuotas correspondientes a un mismo tratamiento (48 alícuotas por tratamiento) se mezclaron y homogeneizaron para conformar las muestras que posteriormente serán analizadas físico-químicamente y radiométricamente.

3.3. Análisis físico-químicos de las muestras de suelo

Dado el importante papel que tiene la fertilidad de los suelos en la posterior regeneración de la vegetación, hemos optado por analizar las variables físico-químicas típicamente relacionadas con la fertilidad de los suelos. La tabla 2 resume qué variables físico-químicas estimadas, así como una breve descripción de la metodología empleada. Los análisis se llevaron a cabo en el Laboratorio Agroalimentario de Córdoba (laboratorio oficial certificado

de la Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía).

Tabla 2. Variables físico-químicas estimadas en laboratorio y procedimiento de estimación.

| VARIABLE | PROCEDIMIENTO |
|---|--|
| Materia orgánica | Oxidación con dicromato potásico en presencia de ácido [M.A.P.A., 22]. |
| Nitrógeno total | Kendall [Bremner y Mulvaney, 23] |
| Fósforo inorgánico disponible | Extracción con NaHCO ₃ (0,5N, pH: 8,5), medida de [PO ₄] ³⁻ por espectrofotometría con el método azul complejo fosfomolibdato [Murphy y Riley, 24] |
| Capacidad intercambio catiónico (C.I.C) | Método de acetato sódico (1N, pH :8,2) - acetato amónico (1N, pH: 7) [Rhoades, 25] |
| Ca, Mg, Na y K intercambiables | Método de acetato sódico (1N, pH :8,2) - acetato amónico (1N, pH: 7) [Rhoades, 25] |
| pH | Extracto en KCl (0,01M), [McLean, 26] |
| Textura: % arena, %limo, % arcilla | Método del hidrómetro [Gee y Bauder, 27] |
| Carbonatos totales | Calcímetro Bernard [Nelson, 28] |

3.4. Análisis espectral de las muestras de suelo

El análisis espectral se llevó a cabo con un radiómetro Field Spec 3 de ASD (Analytical Spectral Devices Inc., Boulder (CO), EEUU). Se trata de un radiómetro de alta resolución espectral (3 nm a 700 nm; 10 nm a 2100 nm), que mide en el rango del visible e infrarrojo cercano del espectro (de 350 a 2500 nm).

Los espectros se tomaron sobre muestras molidas en mortero de ágata con el fin de maximizar la homogeneidad interna dentro de la muestra. Las muestras molidas de suelo se colocaron sobre una placa de petri de 3 cm de



Figura 3. Preparación y montaje del laboratorio para las mediciones de reflectividad con el radiómetro ASD.

diámetro pintada con pintura mate negra, formando una capa de aproximadamente 0,5 cm de espesor (hasta enrasar con el borde de la placa). El sensor se situó vertical a la muestra, a una distancia de 27,2 cm. Para cada muestra de suelo se promediaron 5 medidas radiométricas, rotando la muestra 70° entre cada medida, para obtener un único espectro representativo.

La fuente luminosa se suministró por dos lámparas Lowel Pro-Light Code, con bombillas Osram GCA 235W, colocadas ambas a 59,4 cm del contenedor de la muestra y formando un ángulo cenital de 45° . Para reducir la reflectancia especular, las lámparas se situaron a 60° del eje normal a la superficie de la muestra. Puesto que el diámetro de las muestras a medir era relativamente pequeño (3 cm), se incorporó al sensor un convertidor de grados de amplitud (1°), que reduce el tamaño del campo de visión del sensor (FOV). La configuración empleada para las mediciones radiométricas se presenta en las figuras 3 y 4.

Las medidas con el radiómetro VNIR se realizaron en colaboración con el laboratorio SpecLab (del Centro de Ciencias Humanas y Sociales del CSIC), en cuyas instalaciones se llevaron a cabo las mediciones. SpecLab dispone de un laboratorio de radiometría especialmente acondicionado para este tipo de medidas. Además, todos los instrumentos de medida se cubrieron con material negro para eliminar sus posibles interferencias en las medidas y problemas de reflectividad difusa.

La radiación reflejada por un blanco de referencia bajo se midió bajo las mismas condiciones de iluminación y observación que las muestras de suelo. Un blanco de referencia ideal es una superficie perfectamente difusora (lambertiana) y completamente reflectante (reflector perfecto) [Vaughan, 29]. En nuestro caso, se empleó una superficie de Spectralón (Labsphere, North Sutton NH, EEUU), que es el material con los valores más altos de

reflectividad (entre 93,9 y 99,4% según longitud de onda) [Vaughan, 29]. La medición del blanco permitió estimar la radiación incidente, que se empleó para estimar los valores de reflectividad (definida como la fracción de radiación incidente reflejada por la muestra). Esta medida del blanco se realizó cada 2 muestras (cada 10 medidas radiométricas).

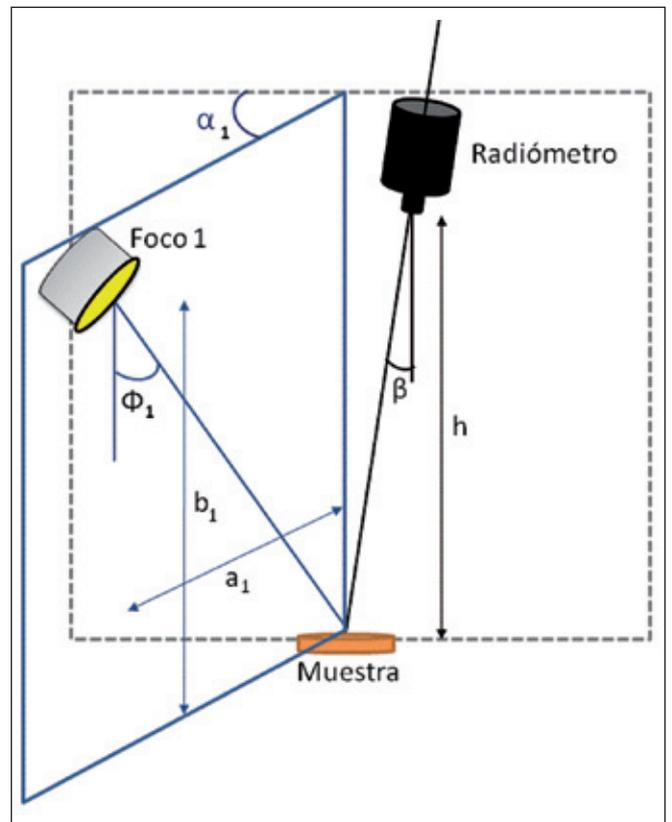


Figura 4. Esquema de la configuración de las mediciones con el radiómetro. * $\beta = 0^\circ$; $h = 20$ cm; $\alpha_1 = \alpha_2 = 45^\circ$; $\Phi_1 = \Phi_2 = 60^\circ$; $a_1 = a_2 = b_1 = b_2 = 42$ cm.

Los espectros resultantes de las medidas radiométricas estaban compuestos de 2150 mediciones de reflectividad individuales. Para la realización de los análisis estadísticos se seleccionaron un total de 11 longitudes de onda representativas de los espectros completos. Esto permitió reducir la elevada dimensionalidad de los análisis, así como limitar los problemas de autocorrelación. La selección de las longitudes de onda se llevó a cabo mediante análisis visual de los espectros obtenidos, a través de los propios análisis estadísticos y considerando la ubicación de las bandas espectrales presentes en el sensor TM del satélite Landsat. Las longitudes de onda seleccionadas para los análisis estadísticos y su interpretación se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Longitudes de onda seleccionadas para los análisis estadísticos y los motivos para su elección.

| Longitud de onda seleccionada | Característica de interés |
|-------------------------------|---|
| 485 nm | Centro de la banda 1 del sensor Landsat TM (Azul) |
| 560 nm | Centro de la banda 2 del sensor Landsat TM (Verde) |
| 660 nm | Centro de la banda 3 del sensor Landsat TM (Rojo) |
| 830 nm | Centro de la banda 4 del sensor Landsat TM (IRC 1) |
| 1350 nm | Comienzo del pico de absorción del agua de los 1400 nm |
| 1400 nm | Pico de absorción del agua de los 1400 nm |
| 1650 nm | Centro de la banda 5 del sensor Landsat TM (IRC 2) |
| 1850 nm | Comienzo del pico de absorción del agua de los 1900 nm |
| 1900 nm | Pico de absorción del agua de los 1900 nm |
| 2100 nm | Comienzo del pico de absorción del agua de los 2200 nm |
| 2215 nm | Centro de la banda 7 del sensor Landsat TM (IRC 3) y pico de absorción del agua |

3.5. Análisis estadísticos

Se utilizaron test ANOVA de dos factores para evaluar si cada una de las variables del suelo estudiadas (variable dependiente) está afectada por los factores considerados o por la interacción entre ambos. Para todos los test ANOVA, los factores considerados fueron la temperatura del tratamiento y el tiempo de exposición. Estos test se aplicaron tanto para las variables físico-químicas estimadas en el laboratorio como para los resultados de los análisis radiométricos. En el caso de los análisis radiométricos, únicamente se utilizaron los valores de reflectividad correspondientes de las 12 longitudes de onda representativas de los espectros.

Además, para reducir la dimensionalidad de los sets de variables físico-químicas y radiométricas, se llevaron a

cabo Análisis de Componentes Principales (ACP). El objeto de este análisis es expresar la covariación de muchas variables en un menor número de variables compuestas mediante la búsqueda de la estructura de correlación lineal más fuerte entre ellas. Los resultados básicos de este análisis explican la varianza recogida por cada eje y las ecuaciones lineales que combinan las variables originales, de forma que cada objeto es proyectado en el nuevo espacio de ordenación usando los vectores propios y la matriz de datos. Así pues, las coordenadas de una determinada muestra en los nuevos ejes del ACP son una combinación lineal de sus coordenadas en el espacio definido por el conjunto de variables.

Finalmente, y con objeto de evaluar el grado de covariación entre las distintas variables consideradas en el estudio, se calcularon los coeficientes de correlación de Pearson entre las variables físico-químicas medidas en el laboratorio; entre los 13 valores de reflectividad representativos de los espectros; y entre las variables físico-químicas y las variables radiométricas. Todos los análisis estadísticos se llevaron a cabo usando el programa Statistica, versión 7 [StatSoft, 30].

4. RESULTADOS

4.1. Descripción edáfica general de los suelos seleccionados para el estudio

Un análisis previo de los perfiles edafológicos de ambos suelos nos confirmó que los dos suelos utilizados para este estudio presentan propiedades en general contrastadas, con diferentes texturas, pH, conductividad y contenidos en materia orgánica, carbonatos y nutrientes. A continuación se detalla la descripción edáfica de los suelos de los que se obtuvieron las muestras para llevar a cabo este estudio:

PERFIL del SUELO 1:

- Se trata de un Cambisol calcárico (FAO). La secuenciación de horizontes es Ah-Bw-Ck-R.
- Ubicación del perfil: pinsapar de Ronda, en la Cañada de las Ánimas. El perfil se tomó en el pie de una pequeña ladera convexa a unos 1200 m de elevación.
- Caracteres topográficos del terreno: terreno montañoso en orientación noroeste y pendiente media del 21%.
- Vegetación: pinsapar (bosque de Abies pinsapo Boiss.) viejo con una regeneración importante de pequeños pinsapos. El sotobosque lo conforman aulagas (*Ulex baeticus* Boiss.) y majuelos (*Crataegus monogyna* Jacq.).
- Material parental: derrubio de ladera de dolomías.
- Pedregosidad: el terreno es muy pedregoso (clase 3) con ninguna roca (clase 0).
- Evidencias de erosión: erosión hídrica laminar severa. Hay grandes raíces de pinsapo al descubierto.

Tabla 4A. Propiedades físicas del perfil edáfico en el Suelo 1 (Sierra de las Nieves).

| Horizonte y profundidad (cm) | Arena (%) | Limo (%) | Arcilla (%) | Gravas (%) | HUMEDAD | | Color |
|------------------------------|-----------|----------|-------------|------------|-----------|-------------|-----------|
| | | | | | 33KPa (%) | 1500KPa (%) | |
| Ah (0-21) | 20,2 | 35,0 | 44,8 | 70 | 46,3 | 20,2 | 5YR 3/2 |
| Bw (21-38) | 19,3 | 34,7 | 45,9 | 74 | 27,6 | 12,1 | 5YR 3/2 |
| Ck (>38) | n.d. | n.d. | n.d. | 86 | n.d. | n.d. | 5YR 2,5/2 |

* n.d. = No detectado.

Tabla 4B. Propiedades químicas del perfil edáfico en el Suelo 1 (Sierra de las Nieves)*.

| Horizonte y profundidad (cm) | pH (H ₂ O) | CE (dS m ⁻¹) | CO (%) | N total (%) | C/N | CO ₃ Ca (%) | MO (%) | P lábil (μg g ⁻¹) | N-NO ₃ ⁻ (μg g ⁻¹) | N-NH ₄ ⁺ (μg g ⁻¹) |
|------------------------------|-----------------------|--------------------------|--------|-------------|------|------------------------|--------|-------------------------------|--|--|
| Ah (0-21) | 7,9 | 0,32 | 7,20 | 0,74 | 9,7 | 12,8 | 19 | 21,6 | 26,6 | 7,6 |
| Bw (21-38) | 7,0 | 0,25 | 2,15 | 0,49 | 4,3 | 13,3 | – | – | – | – |
| Ck (>38) | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | 61,4 | – | – | – | – |

* CE = Conductividad eléctrica; CO = Carbono orgánico; MO = Materia orgánica; n.d. = No detectado

- Descripción físico-química general: Se caracteriza por ser un suelo arcilloso, de color pardo y con una eleva capacidad para almacenar agua, ligeramente básico con carbonatos, con un contenido en materia orgánico elevado y cierta riqueza en nutrientes (P y N) disponibles (tablas 4A y 4B).

PERFIL del SUELO 2:

- Se trata de un Cambisol déstrico (FAO). La secuenciación de horizontes es A-Bt-C-R.
- Ubicación del perfil: Zona de matorral de Quintos de Mora (Toledo). El perfil se tomó en una pequeña ladera cóncava a unos 920 m de elevación.
- Caracteres topográficos del terreno: terreno montañoso en orientación noroeste y pendiente media del 20%.
- Vegetación: matorral constituido fundamentalmente por jaras y brezos (*Cistus ladanifer* L., *Erica arborea* L., *Erica Australis* L., *Rosmarinus officinalis* L.).

- Material parental: derrubio de ladera con esquistos y cuarcitas.
- Pedregosidad: el terreno es muy pedregoso (clase 3) con ninguna roca (clase 0).
- Evidencias de erosión: erosión hídrica laminar leve.
- Descripción físico-química general: Se caracteriza por ser un suelo franco arenoso, con poca capacidad para almacenar agua, ligeramente ácido con poco contenido de carbonatos, pobre en materia orgánica y en nutrientes (P y N) disponibles (tablas 5A y 5B).

4.2. Efectos visibles de los tratamientos de choque térmico

Los dos suelos seleccionados se sometieron a choque térmico según los tratamientos descritos en el apartado de métodos del presente informe (apartado 3.2). El efecto del choque térmico sobre el color de las muestras

Tabla 5A. Propiedades físicas del perfil edáfico en el Suelo 2 (Quintos de Mora).

| Horizonte y profundidad (cm) | Arena (%) | Limo (%) | Arcilla (%) | Gravas (%) | HUMEDAD | | Color |
|------------------------------|-----------|----------|-------------|------------|-----------|-------------|----------|
| | | | | | 33KPa (%) | 1500KPa (%) | |
| A (0-3) | 44,3 | 50,5 | 5,2 | 43 | 16,4 | 10,1 | 10YR 2/2 |
| Bt (3.25) | 41,6 | 49,0 | 9,3 | 63 | – | – | 10YR 5/4 |
| C (25-45) | 41,1 | 50,1 | 8,8 | – | – | – | 10YR 6/2 |

Tabla 5B. Propiedades químicas del perfil edáfico en el Suelo 2 (Quintos de Mora).

| Horizonte y profundidad (cm) | pH (H ₂ O) | CE (dS m ⁻¹) | CO (%) | N total (%) | C/N | CO ₃ Ca (%) | MO (%) | P lábil (μg g ⁻¹) | N-NO ₃ ⁻ (μg g ⁻¹) | N-NH ₄ ⁺ (μg g ⁻¹) |
|------------------------------|-----------------------|--------------------------|--------|-------------|------|------------------------|--------|-------------------------------|--|--|
| A (0-3) | 6,3 | 0,12 | 6,16 | 0,32 | 18,8 | 3,7 | 9,7 | 9,8 | 1,8 | 0,7 |
| Bt (3.25) | 6,4 | 0,004 | 1,33 | 0,08 | 15,7 | – | – | – | – | – |
| C (25-45) | 6,3 | 0,02 | 0,37 | 0,03 | 11,9 | – | – | – | – | – |

* CE = Conductividad eléctrica; CO = Carbono orgánico; MO = Materia orgánica

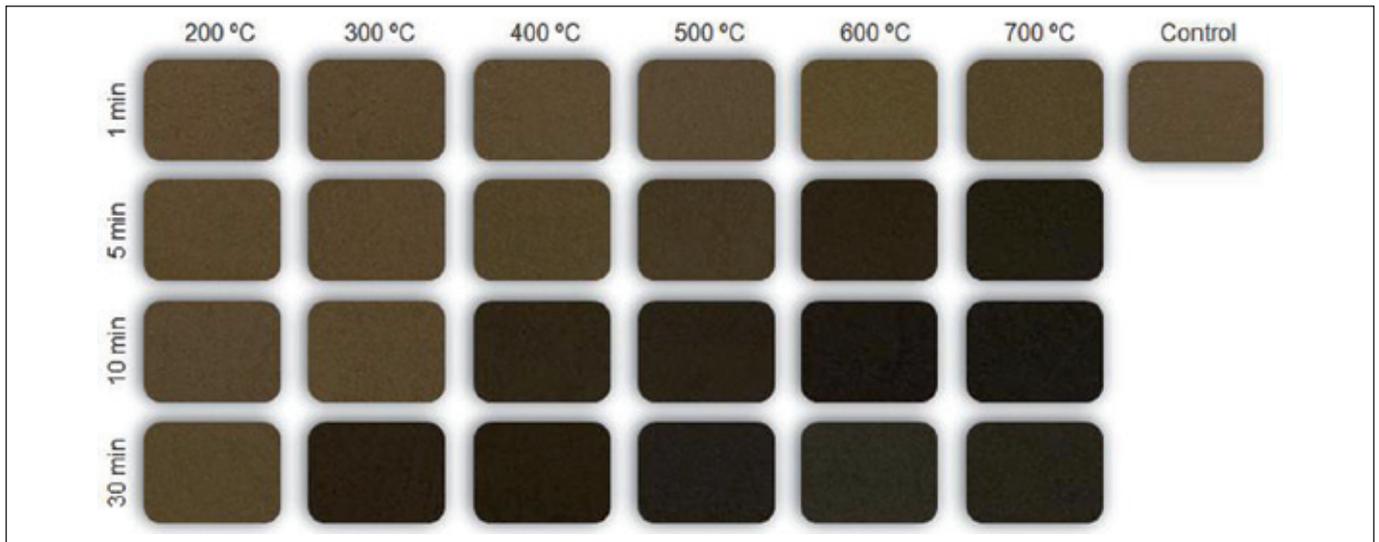


Figura 5. Color de las muestras de suelo 1 (calizo y alto contenido en materia orgánica) después de ser sometidas a los tratamientos de choque térmico. Se representan en filas y columnas los tratamientos de igual tiempo y temperatura de exposición respectivamente. La muestra control se muestra a la derecha.

es apreciable a simple vista (figuras 5 y 6). Estas diferencias de color ponen de manifiesto el hecho de los tratamientos tuvieron un efecto sobre el comportamiento espectral de los suelos, afectando, al menos, a la zona visible del espectro. Para evaluar los efectos de los tratamientos sobre la región del IRC, no apreciables por el ojo humano, es necesario recurrir a la radiometría VNIR. La radiometría VNIR permite además un análisis cuantitativo y preciso de los efectos de los tratamientos sobre la respuesta espectral de los suelos. No obstante, hemos considerado conveniente incluir también estas figuras, pues además de ser visualmente muy ilustrativas, pueden ayudar en la interpretación de los resultados del análisis radiométrico.

Cabe destacar que, a pesar de tratarse de suelos de naturaleza muy distinta (con propiedades edáficas en general contrastadas), se observan tendencias en general similares en los cambios de color. Los tratamientos de un

minuto apenas produjeron cambios de color. Esto sucede para todas las temperaturas de exposición y en ambos suelos. De igual manera, tampoco se observan cambios importantes de color en ninguno de los tratamientos de 200°C. Respecto al resto de casos, se observa un oscurecimiento gradual del suelo, que viene determinado tanto por el tiempo como por la temperatura de exposición. En las figuras 5 y 6 se puede observar como este oscurecimiento sigue una tendencia diagonal, con colores más oscuros hacia la derecha (al aumentar la temperatura) y hacia abajo (al aumentar el tiempo de exposición). Si bien esta tendencia es similar para ambos suelos, los cambios de color son más evidentes en las muestras del suelo 2. Este proceso se invierte para los tratamientos de mayor temperatura y tiempo de exposición, para los que se observan colores más claros. Dicho efecto es más marcado en el suelo 2, siendo apenas apreciable que en el suelo 1.

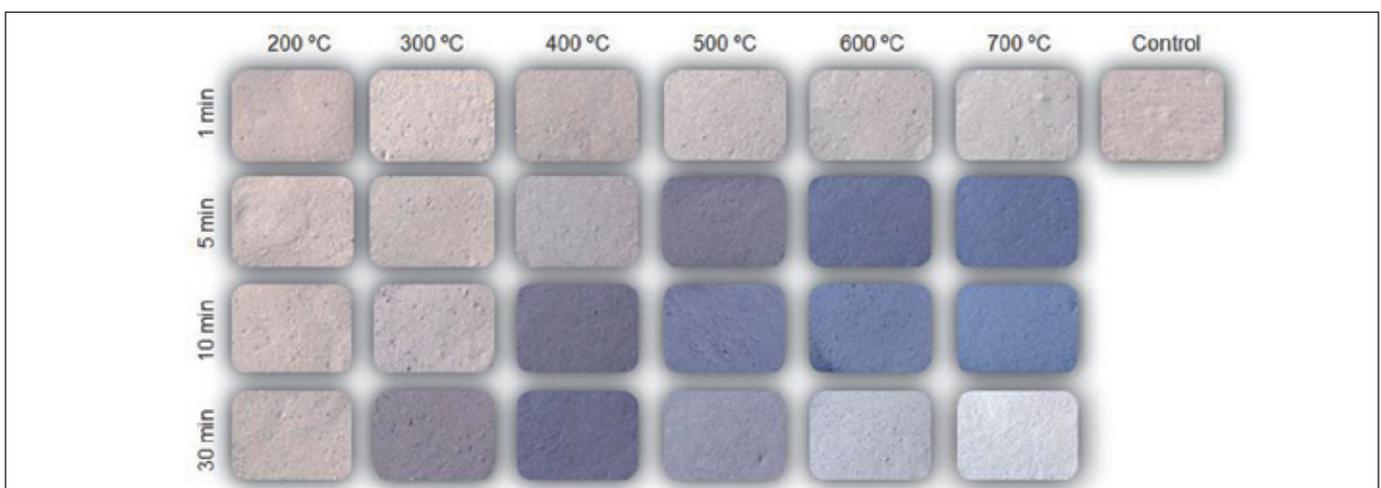


Figura 6. Color de las muestras del suelo 2 (silíceo y bajo contenido en materia orgánica) después de ser sometidas a los tratamientos de choque térmico. Se representan en filas y columnas los tratamientos de igual tiempo y temperatura de exposición respectivamente. La muestra control se muestra a la derecha.

4.3. Propiedades físico-químicas medidas en laboratorio

En las figuras 7 a 9 se representan los resultados obtenidos para las medidas físico-químicas realizadas en el laboratorio. En estas mismas figuras se presentan, además, los valores de los ANOVAs realizados para cada una de estas variables.

El contenido de materia orgánica de los suelos disminuyó significativamente como consecuencia del aumento de la temperatura del tratamiento, para todos los tiempos de exposición a partir de 400°C y a partir de 5 minutos de exposición también para los suelos sometidos a 200 y 300°C; existiendo un efecto significativo de la interacción entre temperatura y tiempo de exposición (Figura 7A).

El contenido de nitrógeno total de los suelos tratados (figura 7B) disminuyó significativamente en los tratamientos de más de 500°C de temperatura y de más 5 minutos de exposición. No se observó en este caso efecto significativo de la interacción de estos dos factores (temperatura y tiempo).

En la figura 7C se puede observar que la cantidad de fósforo asimilable (Olsen) no se vio significativamente afectada cuando el choque térmico se hizo a 200°C (para todos los tiempos) o cuando la duración del tratamiento fue de 1 minuto (para todas las temperaturas). Para tratamientos a 300°C se observó aumento de la concentración de P asimilable (en comparación con el control) a partir de los 10 minutos de exposición, mientras que para tratamientos a temperaturas superiores (400, 500, 600 y 700°C) el aumento de la disponibilidad de P se produjo a partir de los 5 minutos de exposición. Es interesante destacar que, aunque el aumento de disponibilidad de P fue continuado a medida que aumentaba el tiempo de exposición para el caso de las quemaduras a 300°C (hasta los 30 minutos), esta variable se estabilizó 10 minutos de tratamiento en suelos expuestos a 400°C tras, e incluso disminuyó en suelos sometidos a 500, 600 y 700°C. Esta variable mostró dependencias significativas con la interacción de los factores temperatura y tiempo, así como a cada uno de ellos por separado.

La capacidad de intercambio iónico de los suelos se vio significativamente afectada por la temperatura, el tiempo de exposición, y la interacción de ambos factores (figura 7D). No se detectaron efectos significativos cuando los suelos se sometieron a choque térmico de 200°C (independientemente de los tiempos de exposición). Sin embargo, la CIC disminuyó para el resto de tratamientos como consecuencia del aumento de la temperatura y el tiempo de exposición del tratamiento.

En la figura 8A se puede observar que la cantidad de magnesio intercambiable del suelo también se vio significativamente afectada tanto por la interacción de los factores temperatura y tiempo de exposición, como por cada uno de ellos de forma individual. Sin embargo, los comportamientos observados para los diferentes tratamientos testados no siguieron un patrón claro como consecuencia del aumento de temperatura o del tiempo de exposición.

En el caso del potasio intercambiable (figura 8B), no se observaron efectos significativos debidos a la interacción de los factores temperatura y tiempo, aunque sí se observaron efectos debidos a la temperatura y al tiempo de exposición (aunque el grado de significación observado fue muy bajo). Se observa una tendencia a la disminución de potasio intercambiable a medida que aumenta el tiempo y la temperatura de exposición. Sin embargo, esta tendencia se invierte a partir de los 10 minutos para los tratamientos de 600°C y a partir de los 5 minutos para los tratamientos de 700°C.

El contenido de calcio intercambiable de los suelos aumentó con respecto al control cuando estos se vieron expuestos a 200°C (independientemente del tiempo de exposición) (figura 8C). Sin embargo, para temperaturas superiores a 300°C, aunque no se detectaron efectos significativos para un tiempo de exposición de 1 minuto, sí que se observó un descenso en la concentración de esta base de cambio como consecuencia del aumento de la temperatura, estabilizándose dicho efecto entre los 10 y los 30 minutos de exposición.

La concentración de sodio intercambiable no se vio significativamente alterada por ninguno de los tratamientos de choque térmico testados en este trabajo (figura 8D).

El pH de los suelos sufrió cambios significativos debidos a la interacción de los factores temperatura y tiempo, así como al efecto de cada uno de ellos por separado (figura 9A). Los suelos sometidos a 1 minuto de exposición no sufrieron cambios significativos con respecto al control (independientemente de la temperatura del tratamiento). Los efectos en el pH de los suelos sometidos a tratamientos de 200°C tampoco fueron significativos para la mayoría de los tiempos de exposición ensayados ($p < 0,01$). Para suelos tratados con temperaturas de 300 y 400°C los efectos significativos se comenzaron a observar a partir de 10 minutos de exposición, y para el resto de temperaturas a partir de los 5 minutos. Cuando las temperaturas de quema fueron superiores a 500°C los cambios en el pH del suelo llegaron a ser de 3-4 unidades.

La textura de los suelos también se vio modificada como consecuencia de los tratamientos de choque térmico ensayados en el presente estudio. El porcentaje de arcilla del suelo (figura 9B) no sufrió cambios cuando los suelos fueron tratados a 200°C (independientemente de los tiempos de exposición), y se redujo significativamente a partir de los 10 minutos de exposición para los tratamientos de 300°C, a partir de los 5 minutos en los tratamientos de 400°C y para todos los tiempos de exposición para los tratamientos de 600 y 700°C. De forma análoga, el porcentaje de limo de los suelos (figura 9C) aumentó significativamente como consecuencia de tratamientos térmicos de 500, 600 y 700°C (independientemente del tiempo de exposición), aunque los valores de esta variable no sufrieron cambios significativos en los tratamientos con temperaturas menores. Los cambios en el porcentaje de arena en los suelos tratados no fueron tan consistentes (figura 9D). Para esta variable se observaron efectos significativos para la temperatura y para la interacción de la temperatura y el tiempo de exposición, y en menor grado del factor tiempo.

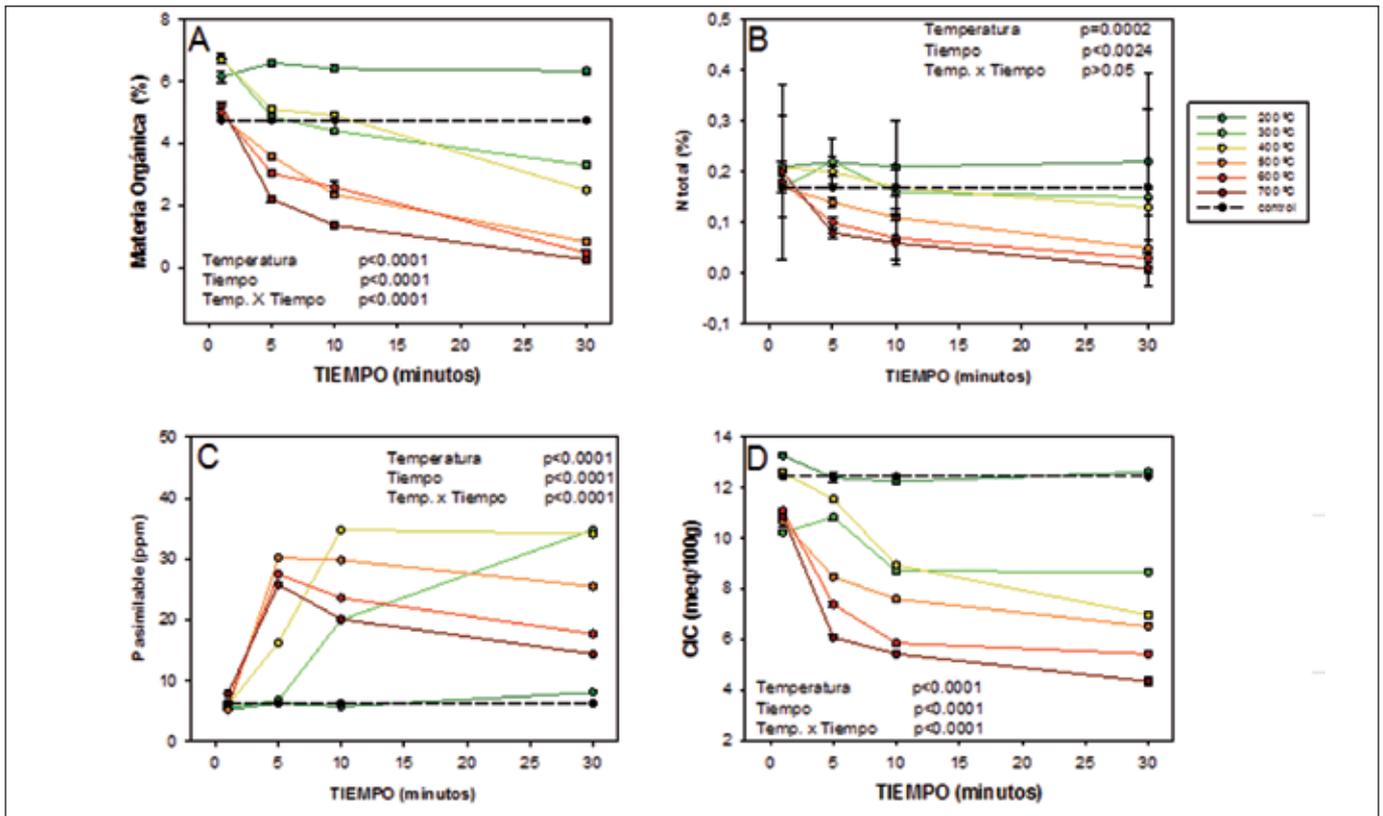


Figura 7. Efecto de la temperatura y el tiempo de exposición de los tratamientos llevados a cabo con el suelo 2 (Quintos de Mora, Toledo), en el contenido en materia orgánica (A); nitrógeno total (B); fósforo asimilable (C); y capacidad de intercambio catiónico (D). Los puntos en las gráficas representan valores medios y las barras indican desviaciones estándar. Para cada caso se incluyen los resultados del test ANOVA de dos factores.

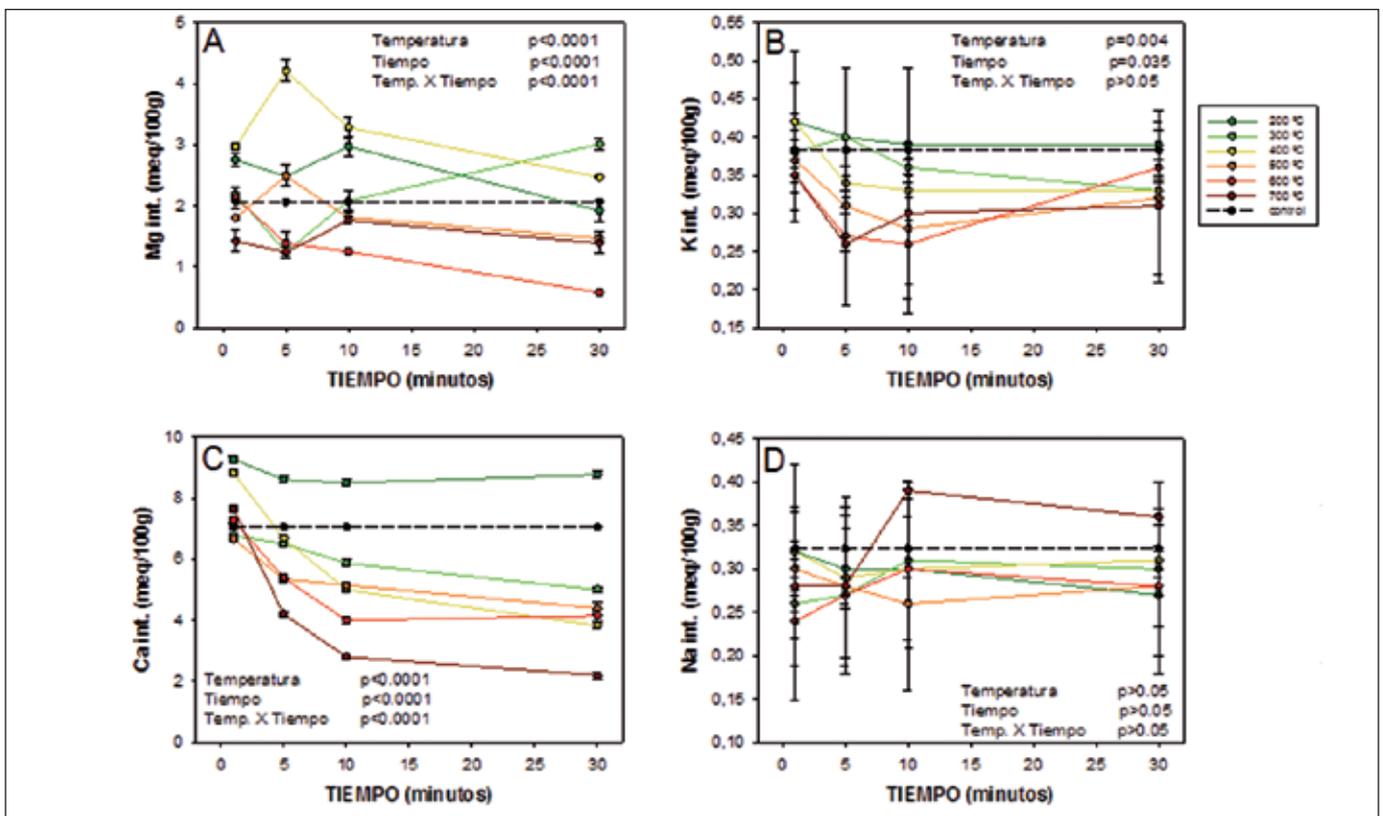


Figura 8. Efecto de la temperatura y el tiempo de exposición de los tratamientos llevados a cabo en el suelo 2 (Quintos de Mora, Toledo) en las formas intercambiables de magnesio (A), potasio (B), calcio (C) y sodio (D). Los puntos en las gráficas representan valores medios y las barras indican desviaciones estándar. Para cada caso se incluyen los resultados del test ANOVA de dos factores.

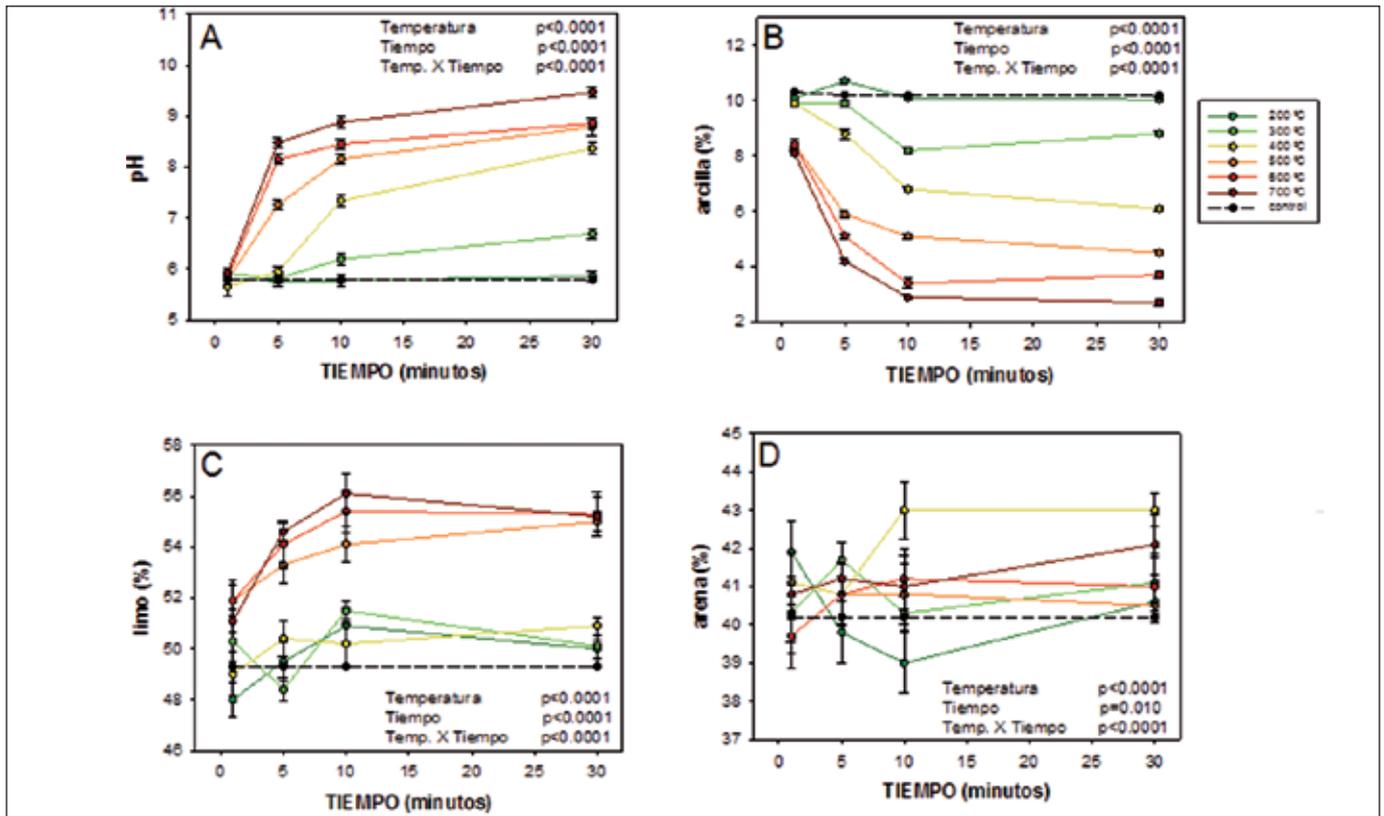


Figura 9. Efecto de la temperatura y el tiempo de exposición de los tratamientos llevados a cabo con el suelo 2 (Quintos de Mora, Toledo), sobre los valores de pH (A) y porcentajes de arcilla (B), limo (C) y arena (D). Los puntos en las gráficas representan valores medios y las barras indican desviaciones estándar. Para cada caso se incluyen los resultados del test ANOVA de dos factores.

El análisis del coeficiente de correlación de Pearson, presentado en la tabla 6, no mostró ninguna correlación significativa entre el sodio intercambiable o el porcentaje de arena y el resto de variables. En contraste, la C.I.C, el porcentaje total de N, el porcentaje en materia orgánica, el pH y el porcentaje de arcilla se correlacionaron significativamente con todas las variables (excepto sodio intercambiable o el porcentaje de

arena). Los valores de Ca, K y P se correlacionaron entre si, además de con el resto variables (excepto sodio, magnesio y porcentaje de arena). La correlación entre variables fue positiva entre todos los casos excepto para el potasio, el pH y del porcentaje de limo, que se correlacionaron negativamente con el resto de variables (excepto entre ellas).

Tabla 6. Matriz de coeficientes de correlación de Pearson entre las variables físico-químicas analizadas en laboratorio. Se indica con * y ** aquellos coeficientes estadísticamente significativos para niveles de significación (α) de 0,01 y 0,001 respectivamente.

| | C.I.C | Ca | Mg | Na | K | P | M.O. | N | pH | Arcilla | Arena | Limo |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|
| C.I.C | **1,00 | | | | | | | | | | | |
| Ca | **0,97 | **1,00 | | | | | | | | | | |
| Mg | **0,55 | 0,40 | **1,00 | | | | | | | | | |
| Na | -0,26 | -0,31 | 0,10 | **1,00 | | | | | | | | |
| K | **0,80 | **0,78 | 0,32 | 0,01 | **1,00 | | | | | | | |
| P | **0,65 | **0,69 | 0,02 | 0,00 | **0,74 | **1,00 | | | | | | |
| M.O. | **0,94 | **0,91 | **0,55 | -0,25 | **0,72 | **0,60 | **1,00 | | | | | |
| N | **0,96 | **0,89 | **0,58 | -0,27 | **0,72 | **0,52 | **0,94 | **1,00 | | | | |
| pH | **0,95 | **0,90 | *0,49 | 0,26 | **0,78 | **0,66 | **0,93 | **0,94 | **1,00 | | | |
| Arcilla | **0,87 | **0,81 | **0,59 | -0,31 | **0,70 | *0,46 | **0,85 | **0,87 | **0,83 | **1,00 | | |
| Arena | -0,15 | -0,18 | 0,03 | -0,13 | -0,21 | 0,28 | -0,12 | -0,12 | 0,25 | 0,26 | **1,00 | |
| Limo | **0,69 | **0,63 | *0,51 | -0,02 | **0,65 | *0,42 | **0,66 | **0,70 | **0,73 | -0,41 | **0,69 | **1,00 |

4.4. Comportamiento espectral de las muestras de suelo

La respuesta espectral de los dos suelos estudiados (sin ser sometidos a tratamientos de choque térmico) se presenta en la figura 10. Se observa que los espectros de uno y otro suelo siguen un patrón similar para las muestras control, con valores de reflectividad menores para todas las longitudes de onda en el suelo 1. Este resultado es coherente con las observaciones realizadas a simple vista (figuras 5 y 6), pues el suelo 1 era más oscuro que el suelo 2 (una mayor reflectividad en la zona del visible se corresponde con colores más claros).

Se observa que los espectros de ambos suelos presentan tres picos de absorbancia situados en la zona del IRC (en torno a los 1400, 1900 y 2200 nm). La presencia de estos picos delata la existencia de agua en las muestras analizadas, pues el agua absorbe radiación precisamente en dichas regiones del espectro. En la figura 10 se representa, además, la ubicación de las longitudes de onda seleccionadas para los análisis estadísticos (ver apartado 3.5 del presente informe). Dichas longitudes de onda, que se corresponden con el centro de las bandas espectrales del sensor Landsat TM y los picos de absorción del agua, se han considerado representativas de los espectros de los suelos.

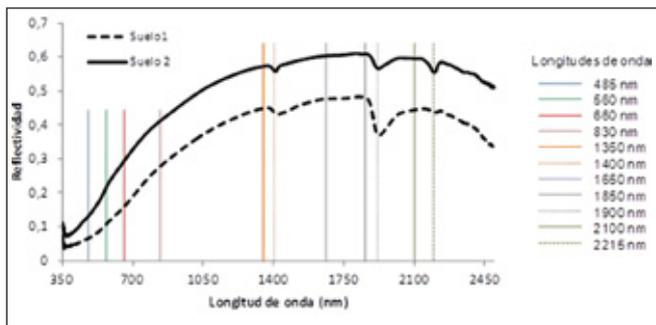


Figura 10. Espectros VNIR de las muestras de los suelos 1 y 2 no tratadas (muestras control); y ubicación de las longitudes de onda seleccionadas para los análisis estadísticos.

Los espectros obtenidos para las muestras de suelos tratadas con choque térmico se presentan en las figuras 11 y 12, correspondientes a los suelos 1 y 2 respectivamente. La tendencia general observada para los tratamientos de choque térmico es el descenso de la reflectividad a lo largo de todas las regiones del espectro analizadas y la disminución de los picos de absorción de agua (para las longitudes de onda de 1400, 1900 y 2200 nm). Ambos procesos tienen lugar de forma gradual, conforme aumenta la temperatura y tiempo de exposición de los tratamientos. Los picos de absorción del agua llegan a desaparecer completamente para los tratamientos de mayor temperatura y tiempo de exposición. Este comportamiento conserva los mismos rasgos generales para los dos suelos estudiados.

Atendiendo a los test ANOVA (realizados para las 11 longitudes de onda seleccionadas), los valores de reflectividad observados eran, en todos los casos, dependientes de los factores temperatura y tiempo de exposición, así como de la interacción entre ambos. El análisis de los coeficientes de correlación de Pearson (tabla 7) mostró que todas las medidas de reflectividad seleccionadas para el estudio se correlacionaron positivamente entre sí, siendo esta correlación significativa en todos los casos ($p < 0,001$).

Los efectos de los tratamientos de choque térmico sobre la respuesta espectral fueron mínimos para los tratamientos de 1 minuto (figuras 11A y 12A). No obstante, ya se detectaron diferencias significativas para las longitudes de onda correspondientes a la región visible del espectro (485, 560, y 660 nm) en los tratamientos de más de 400°C.

Para tratamientos de 5 minutos las diferencias en el comportamiento espectral llegaron a ser bastante evidentes, especialmente para los tratamientos de temperaturas mayores a 400°C. En las figuras 11B y 12B se puede apreciar una disminución en la profundidad de los picos de absorción del agua, que es mayor para los tratamientos de mayor temperatura, y llega a ser apenas apreciable en los tratamientos de

Tabla 7. Matriz de coeficientes de correlación de Pearson entre los valores de reflectividad seleccionados. Todos los coeficientes resultaron estadísticamente significativos para un nivel de significación (α) de 0,001.

| | 485 | 560 | 660 | 830 | 1350 | 1400 | 1650 | 1850 | 1900 | 2100 | 2200 | 2215 |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| 485 | **1,00 | | | | | | | | | | | |
| 560 | **1,00 | **1,00 | | | | | | | | | | |
| 660 | **0,98 | **0,99 | **1,00 | | | | | | | | | |
| 830 | **0,92 | **0,95 | **0,98 | **1,00 | | | | | | | | |
| 1350 | **0,76 | **0,81 | **0,87 | **0,94 | **1,00 | | | | | | | |
| 1400 | **0,75 | **0,80 | **0,87 | **0,94 | **1,00 | **1,00 | | | | | | |
| 1650 | **0,69 | **0,74 | **0,81 | **0,90 | **0,99 | **0,99 | **1,00 | | | | | |
| 1850 | **0,65 | **0,71 | **0,78 | **0,87 | **0,98 | **0,98 | **1,00 | **1,00 | | | | |
| 1900 | **0,63 | **0,69 | **0,76 | **0,84 | **0,96 | **0,97 | **0,99 | **1,00 | **1,00 | | | |
| 2100 | **0,60 | **0,65 | **0,72 | **0,81 | **0,94 | **0,95 | **0,98 | **0,99 | **1,00 | **1,00 | | |
| 2200 | **0,63 | **0,68 | **0,74 | **0,80 | **0,92 | **0,93 | **0,96 | **0,97 | **0,99 | **1,00 | **1,00 | |
| 2215 | **0,61 | **0,66 | **0,73 | **0,80 | **0,92 | **0,94 | **0,96 | **0,98 | **0,99 | **1,00 | **1,00 | *1,00 |

** $p < 0,001$

700°C. En las longitudes de onda más bajas (485, 560, 660 y 830 nm) las diferencias detectadas comenzaron a ser significativas a partir de los tratamientos de 400°C, mientras que para mayores longitudes de onda (1350, 1400, 1650, 1900, 2100 y 2215 nm) estas diferencias no llegaron a ser significativas hasta los tratamientos de 500°C.

A partir de 10 minutos de tratamiento, las diferencias en el comportamiento espectral de los suelos tratados fueron siempre significativas para al menos 3 de las 11 longitudes de onda seleccionadas. En general, las longitudes de onda de la zona del visible, especialmente las correspondientes al verde y al rojo, mostraron cambios significativos para todos los tratamientos de 10 y 30 minutos, con la salvedad de los tratamientos de 200°C, que sólo mostraron diferencias significativas en estas longitudes de onda para el tratamiento de 30 minutos.

Las tendencias descritas para los tratamientos de 5 minutos se mantuvieron constantes para los tratamientos de 10 y 30 minutos en el caso del suelo 1 (figuras 11C y 11D): disminución en la profundidad de los picos de absorción del agua y descenso en los valores de reflectividad para todas las longitudes de onda, siendo ambos efectos gradualmente mayores a medida que aumenta la

temperatura y tiempo de exposición del tratamiento. Sin embargo, los tratamientos de 10 y 30 minutos del suelo 2 mostraron un cambio en esta tendencia. En las figuras 12C y 12D se observa para los tratamientos de 10 minutos y temperaturas a partir de 600°C y los tratamientos de 30 minutos y temperaturas a partir de 500°C que los valores de reflectividad comienzan a aumentar. Este aumento es especialmente acusado en la región visible del espectro y en las longitudes de onda próximas al rojo. De hecho, los valores de reflectividad de las muestras sometidas a los tratamientos más agresivos (de mayor temperatura y tiempo de exposición) mostraron valores de reflectividad más altos que los de las muestras control en las regiones visibles del espectro. De nuevo, estos resultados son coherentes con los presentados en la sección 4.2 de este estudio (en el que se describían los efectos visibles de las muestras de suelo tratadas).

El único efecto que mantuvo una tendencia constante para todos los tratamientos y en ambos suelos fue una disminución gradual en la profundidad de los picos de absorción del agua, que resultó más pronunciada a medida que aumenta la temperatura y tiempo de exposición del tratamiento.

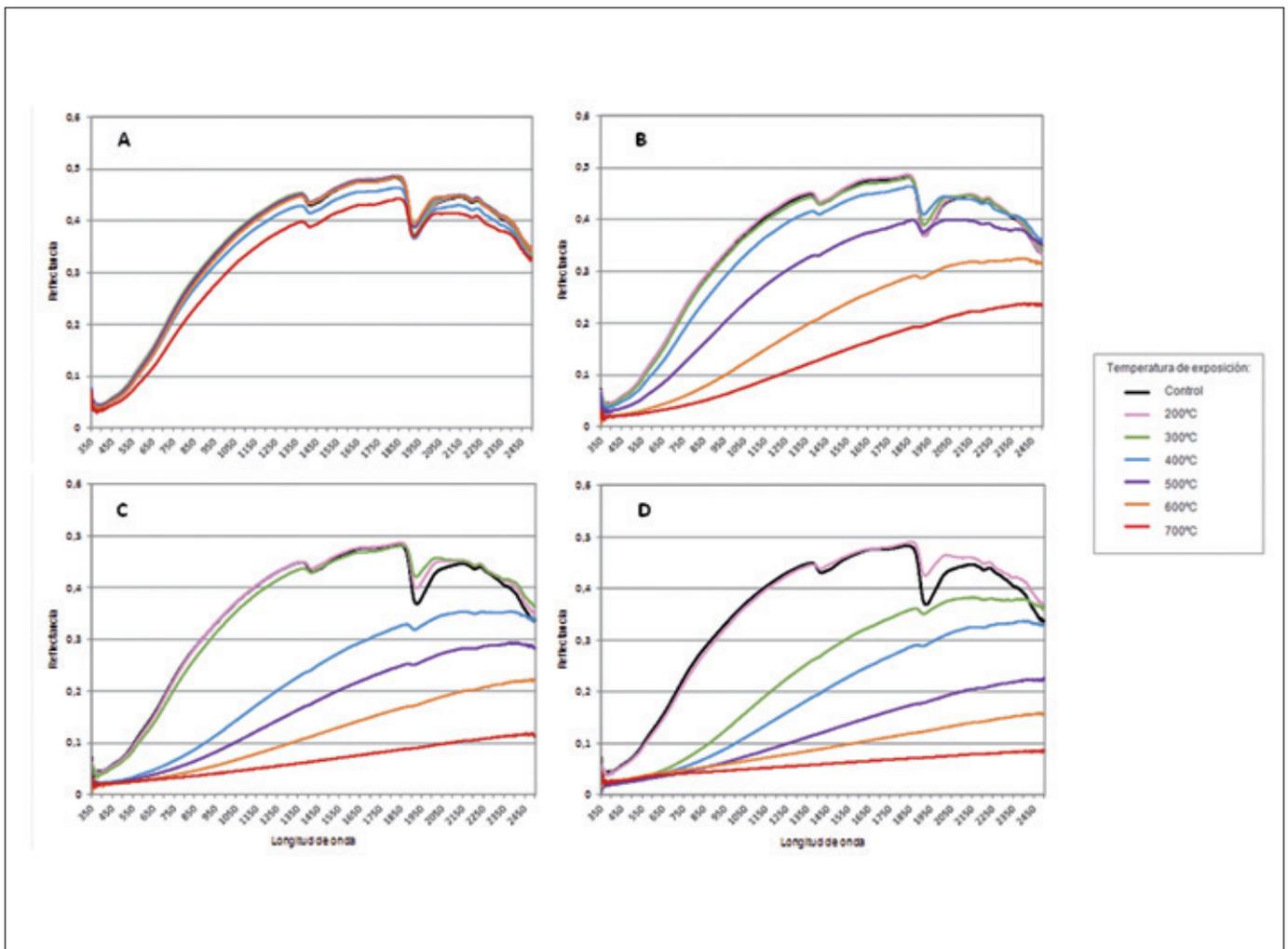


Figura 11. Respuesta espectral de las muestras del suelo1 tras los tratamientos de choque térmico. A, B, C y C: tratamientos de 1, 5, 10 y 30 minutos respectivamente.

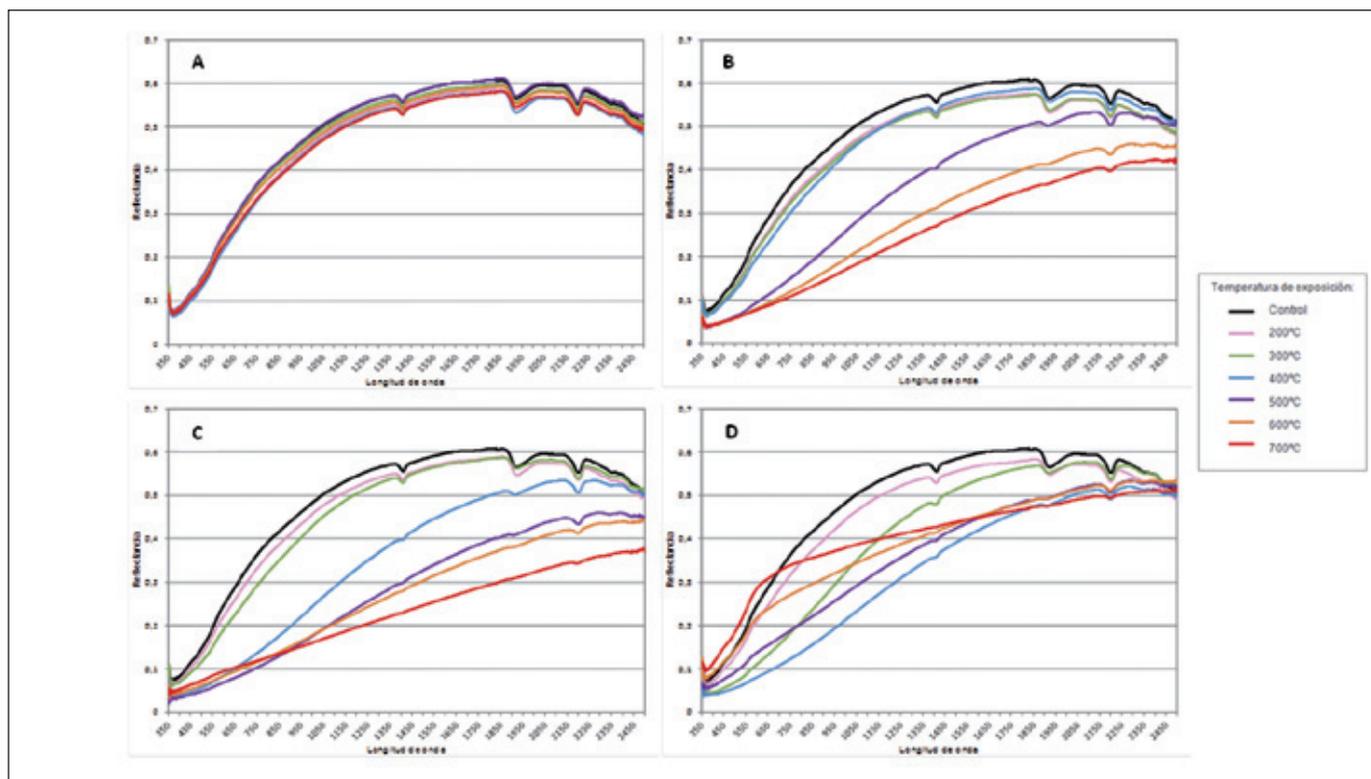


Figura 12. Respuesta espectral de las muestras del suelo 2 tras los tratamientos de choque térmico. A, B, C y D: tratamientos de 1, 5, 10 y 30 minutos respectivamente.

4.5. Análisis estadístico comparativos

Se llevó a cabo un análisis de componentes principales con la matriz de variables fisicoquímicas medidas en el laboratorio. Una elevada proporción de la varianza total (73%) puede ser explicada por los dos primeros componentes principales. La tabla 8 muestra los factores de carga de las variables incluidas en el análisis con estos dos primeros componentes principales.

El porcentaje de materia orgánica, el porcentaje de arcilla, el contenido total de N, la capacidad de intercambio iónico y todas las bases de cambio excepto el Na se relacionaron positivamente con el primer componente principal (CP1), explicando el 59,03% de la varianza. Sin embargo, el resto de variables se relacionaron positivamente con ese eje (principalmente la cantidad de P asimilable, el pH y el porcentaje de limo). El segundo componente principal (CP2), que explicaba el 14,14% de la varianza total, se relacionó principalmente con el P asimilable, el contenido de magnesio intercambiable y el porcentaje de arena, relacionándose con ellos positivamente.

Las nuevas coordenadas asignadas a los tratamientos ensayados tras el ACP, se han representado en la figura 13. Se puede observar que a medida que las muestras de suelo son tratadas a mayores temperaturas, éstas toman valores mayores en el CP1. El mismo modo, el CP1 también representa un gradiente de tiempo de exposición de los tratamientos. Por consiguiente, este componente principal se podría definir como un indicador de severidad del choque térmico (entendiendo severidad del choque tér-

mico como la combinación de la temperatura y el tiempo de exposición).

Tabla 8. Factores de carga resultantes del ACP realizado con todas las variables fisico-químicas analizadas en el laboratorio.

| Variable | CP1 | CP2 |
|--------------------|-------|-------|
| % materia orgánica | -0,96 | 0,02 |
| N total | -0,76 | 0,13 |
| P asimilable | 0,66 | 0,53 |
| CIC | -0,98 | -0,01 |
| Mg | -0,56 | 0,66 |
| K | -0,56 | -0,18 |
| Ca | -0,94 | -0,15 |
| Na | 0,07 | 0,27 |
| pH | 0,96 | 0,10 |
| % arcilla | -0,97 | 0,09 |
| % arena | 0,31 | 0,78 |
| % limo | 0,85 | -0,46 |

En el caso de las variables radiométricas, los primeros dos componentes principales del ACP explicaron el 96% de la varianza total. La Tabla 9 muestra los factores de carga de las variables incluidas en el análisis con estos dos primeros componentes principales. Las medidas de

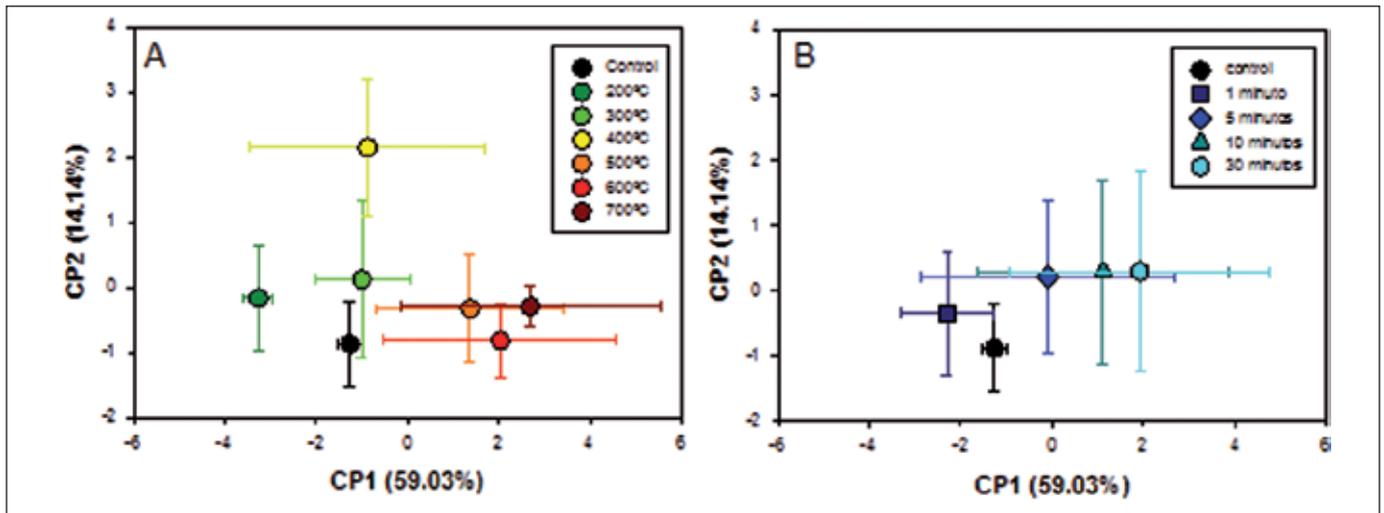


Figura 13. Ordenación de los tratamientos de choque térmico sobre el plano de los componentes principales 1 y 2 del ACP de las variables físico-químicas medidas en el laboratorio. Tratamientos agrupados según temperaturas (A) y tiempos de exposición (B). Los puntos representan valores medios y las barras de error la desviación estándar.

reflectividad de todas las longitudes de onda ensayadas se relacionaron fuertemente y de forma negativa con el primer componente principal (CP1) (explicando el 85,81% de la varianza). El segundo componente principal (CP2), que explicaba el 10,75% de la varianza total, se relacionó principalmente con la reflectividad medida en las longitudes de onda de la región visible del espectro (485, 560 y 660 nm), y mostrando una relación positiva.

Tabla 9. Factores de carga resultantes del ACP realizado con los valores de reflectividad de las longitudes de onda seleccionadas como representativas de los espectros.

| Longitud de onda (nm) | CP1 | CP2 |
|-----------------------|-------|-------|
| 485 | -0,80 | 0,58 |
| 560 | -0,84 | 0,53 |
| 660 | -0,89 | 0,46 |
| 830 | -0,94 | 0,33 |
| 1350 | -0,98 | 0,01 |
| 1400 | -0,99 | -0,01 |
| 1650 | -0,98 | -0,12 |
| 1850 | -0,97 | -0,19 |
| 1900 | -0,97 | -0,23 |
| 2100 | -0,96 | -0,29 |
| 2200 | -0,96 | -0,27 |
| 2215 | -0,96 | -0,28 |

Las nuevas coordenadas asignadas a los tratamientos ensayados tras el ACP, se han representado en la figura 14. Se puede observar que a medida que las muestras de suelo son tratadas con mayores temperaturas, éstas toman valores mayores en el CP1 (al igual que ocurría con el ACP de las variables físico-químicas). El CP1 mostraba un gra-

diente de tiempo de exposición, comprendido entre la muestra control y los 10 minutos de exposición. Sin embargo, dicho gradiente se rompía para los tratamientos de 30 minutos, mostrando una tendencia opuesta. Este cambio detectado para los tratamientos de 30 minutos podría corresponder al cambio de tendencia detectado en el comportamiento espectral del suelo 2 (y en menor medida del suelo 1), por el cual a partir de un determinado nivel de severidad del tratamiento, los niveles de reflectividad comenzaban a aumentar (en lugar de disminuir). Por consiguiente, se podría decir que este componente principal, al igual que en el caso de las variables físico-químicas medidas en el laboratorio, también se podría definir como un indicador de severidad del choque térmico. Sin embargo, la relación en este caso no sería lineal, sino que existiría un punto de inflexión para un cierto grado de severidad.

5. DISCUSIÓN

Los efectos del fuego en las propiedades del suelo deben ser evaluados considerando a este como una compleja matriz compuesta por material orgánico e inorgánico. La magnitud de los cambios que se producen durante un incendio depende en gran medida del nivel de gravedad de los incendios, la combustión y la transferencia de calor, la magnitud y profundidad del suelo y el umbral de la temperatura al que las diferentes propiedades del suelo sufren cambios.

Cuando se habla de los efectos del fuego sobre el recurso suelo es importante diferenciar entre la intensidad del fuego y severidad de los incendios, porque con frecuencia no son lo mismo [Hartford y Frandsen, 31]. El término intensidad del fuego se utiliza para describir la velocidad a la que un incendio libera energía térmica [Chandler *et al.*, 32]. La intensidad del fuego es cuantifi-

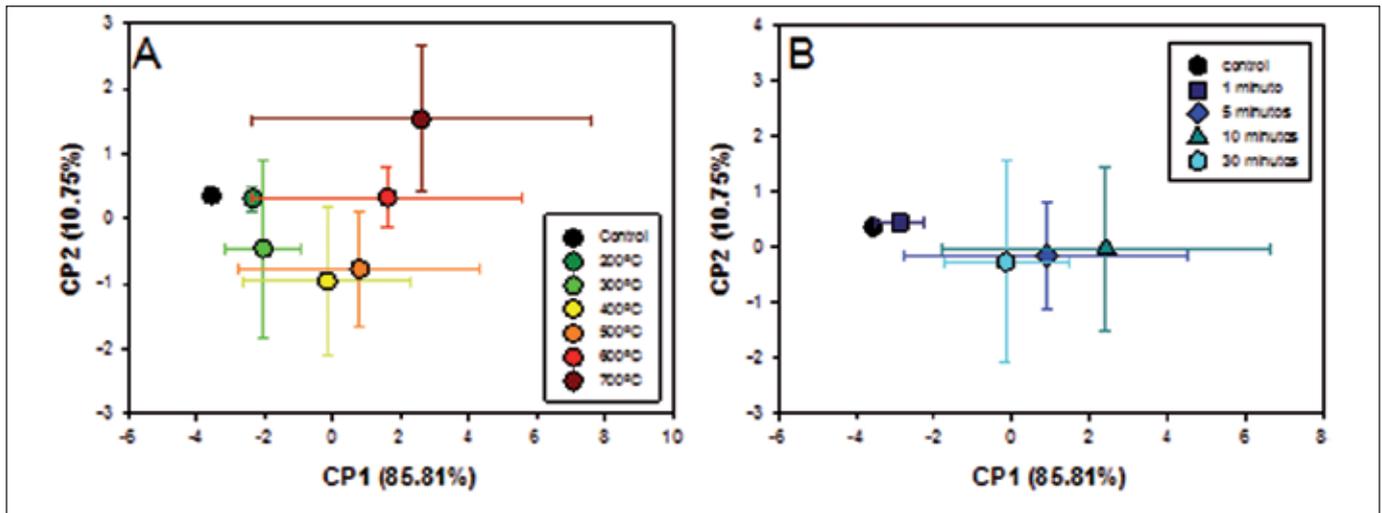


Figura 14. Ordenación de los tratamientos de choque térmico sobre el plano de los componentes principales 1 y 2 del ACP de las variables radiométricas seleccionadas. Tratamientos agrupados según temperaturas (A) y tiempos de exposición (B). Los puntos representan valores medios y las barras de error la desviación estándar.

cada frecuentemente en términos de intensidad de la línea de fuego, ya que esta variable está relacionada con la longitud de la llama, y se puede medir fácilmente [De-Bano, 33]. Por otro lado, el término severidad de los incendios, de carácter más cualitativo, hace referencia a los efectos del fuego sobre los ecosistemas, y es particularmente útil para describir los efectos del fuego sobre el suelo del sistema [Simard, 34]. Los incendios de alta intensidad pueden llegar a producir importantes cambios en el suelo, siendo en esos casos también catalogados como incendios de alta severidad, pero este no es siempre el caso. Por ejemplo, fuegos latentes de baja intensidad pueden causar importantes cambios en el suelo de calefacción, así como en el suelo adyacente. En este caso, el factor determinante de la severidad del incendio es la duración de las temperaturas sostenidas (tiempo de exposición), siendo éste el que más daño provoca en el suelo. Así pues, en el presente estudio se ha evaluado la severidad de los incendios teniendo en cuenta la intensidad (temperatura del tratamiento) y la duración (tiempo de exposición).

Muchas de las propiedades químicas y los procesos que ocurren en los suelos dependen de la presencia de materia orgánica. La materia orgánica no sólo juega un papel clave en la química del suelo, sino que también afecta las propiedades físicas y las propiedades biológicas de los suelos. Así, la materia orgánica del suelo es particularmente importante para el suministro de nutrientes, capacidad de intercambio catiónico, y retención de agua. Además, es importante destacar que la mayor cantidad de materia orgánica del suelo se encuentra en la parte superior del perfil del suelo, donde está expuesta directamente al calor irradiado durante un incendio.

Dada la importancia de esta variable, los cambios sufridos en la materia orgánica del suelo han sido un tema de interés científico durante más de 60 años [Hosking, 35].

Hay diferentes componentes químicos de la materia orgánica que se pierden a medida que va aumentando la temperatura de calentamiento [Nearby *et al.*, 36]: i) A temperaturas mayores de 200°C se pierden los constituyentes volátiles; ii) a temperaturas entre 200-300°C se produce la pérdida de un 85% de materia orgánica en el suelo; iii) a más de 300°C, la mayor parte de la materia orgánica residual consiste en material tipo carbón que se pierde finalmente por ignición y iv) el calentamiento del suelo a 450°C durante dos horas o a 500°C durante media hora elimina el 99% de la materia orgánica. Nuestros resultados concuerdan con los descritos previamente, mostrando un descenso en el contenido de materia orgánica conforme aumentaba la temperatura y tiempo de exposición. La destrucción de la materia orgánica puede ser beneficiosa, pues aporta nutrientes disponibles para las plantas (como el P) aunque por otra parte, provoca la destrucción de la estructura del suelo. Estos cambios son irreversibles y podrían disminuir la porosidad del suelo, su plasticidad y elasticidad, haciéndolo altamente erosionable.

Los efectos que el fuego provoca sobre el N del suelo revisten especial importancia por ser éste uno de los principales nutrientes para las plantas y microorganismos. Existen distintas opiniones acerca del efecto del fuego sobre el N del suelo. Diversos autores, como Kutiel *et al.* [37], sugieren que se produce una disminución del N como efecto directo del fuego. Efectivamente, según los resultados alcanzados en este estudio, se detecta una pérdida de N que es proporcional a la temperatura alcanzada y al grado de combustión de la materia orgánica. Esta pérdida se atribuye generalmente a la formación de compuestos volátiles de nitrógeno durante la pirolisis de la materia orgánica [Kutiel *et al.*, 37, Dyrness y Norum, 38].

Otro elemento de interés biológico y que suele presentarse como factor limitante en el desarrollo de la vegetación es el P. Los estudios referentes al efecto de los incendios forestales sobre el P se centran principalmente en la

alteración de sus formas biodisponibles. En general, la disponibilidad de P aumentó de forma inmediata (tras 5 minutos de tratamiento) y proporcionalmente a la temperatura del choque térmico hasta los 500°C. Este aumento de P disponible se ha relacionado con el grado de combustión de la materia orgánica del suelo, así como con la capacidad de fijación de P por el suelo [Dyrness y Norum, 38]. La pérdida de P observada para tratamientos a partir de 500°C y 10 minutos de exposición podría atribuirse a su volatilización, habiéndose descrito ésta en torno a los 600°C [Breswell, 39].

Según los resultados de nuestro estudio, la capacidad de intercambio catiónico desciende con el aumento de temperatura y tiempo de exposición, correlacionándose positivamente con el contenido materia orgánica, que suministra posiciones de cambio [Badía y Martí, 40, Oswald *et al.*, 41]. Los efectos de los tratamientos de choque térmico se observaron en diferente grado en las principales bases de cambios. Así pues, los efectos fueron mínimos en el caso de los cationes monovalentes (Na^+ y K^+), posiblemente debido a su baja concentración en estos suelos, ya que estos cationes se suelen encontrar como cloruros y carbonatos [Soto y Díaz-Fierros, 42]. La presencia de estos cationes en el suelo era muy baja (de ahí que no se hayan presentado las gráficas correspondientes a sus resultados). Por otro lado, las concentraciones de cationes divalentes, como el Ca^{2+} y el Mg^{2+} , si se vieron significativamente reducidas, a pesar de ser menos móviles. Esto posiblemente sea consecuencia de la destrucción de sus formas químicas como óxidos por el choque térmico.

Los valores de pH, al igual que se describe en la bibliografía, aumentaron de manera proporcional a la temperatura y tiempo de exposición. Dicho aumento es debido a la reducción de ácidos orgánicos y al aporte de cenizas con carácter alcalino. En los tratamientos de baja intensidad, donde la combustión de la materia orgánica es muy baja, los cambios en el pH son mínimos. Este hecho se atribuye a una disminución del poder amortiguador del suelo como consecuencia de la deshidratación de los coloides [Coles y Morrison, 43]. En los casos en los que la intensidad del tratamiento es alta, en los que se produce una gran combustión de la materia orgánica del suelo, el pH llega a aumentar en varias unidades.

En general, y coincidiendo con los estudios llevados a cabo por Giovannini *et al.*, [44], la distribución del tamaño de partículas del suelo permanece inalterada hasta alcanzar 200-400°C de temperatura [Nishita y Haug, 45]. A temperaturas superiores a 460°C se produce la pérdida de los grupos OH de las arcillas. También pueden producirse fusiones térmicas de partículas de tamaño arcilla, incrementándose porcentualmente el tamaño limo [Ulery *et al.*, 46]. Estos cambios se han atribuido a la calcinación en la que se ven implicados los óxidos de hierro, los aluminosilicatos y los carbonatos [Giovannini *et al.*, 47]. Estas reacciones térmicas pueden provocar un daño irreparable en la estructura del mineral y causar alteraciones negativas en el estado químico y nutricional del suelo, lo que afectaría al crecimiento de las plantas [Giovannini, 48].

La radiometría VNIR proporciona una información integrada de los cambios detectados en el suelo. Es destacable el hecho de que se detectaron cambios significativos en los valores de reflectividad de muestras para las que los cambios detectados mediante análisis en el laboratorio no eran significativos. Esto indica que el método radiométrico es ligeramente más sensible a dichos cambios.

El comportamiento espectral de las muestras de suelo está claramente marcado por contenido en humedad de las mismas, que a su vez, depende de la severidad del tratamiento de choque térmico. Estos cambios en el comportamiento espectral asociados a la presencia de agua en la muestra se producen fundamentalmente en la región del NIR.

Son numerosas las investigaciones que han evaluado el potencial de la radiometría NIR (que emplea la región del NIR del espectro) para el análisis de los suelos de forma rápida y eficiente [Dunn *et al.*, 11, Reeves *et al.*, 49], y también en relación con la estimación de la severidad del fuego [Guerrero *et al.*, 21]. Las investigaciones más recientes sugieren que la radiometría VNIR podría proporcionar una predicción sencilla, rápida y económica de las propiedades físicoquímicas del suelo [Islam *et al.*, 50, Shepherd y Walsh, 51]. Según los resultados de este estudio, un elevado número de las variables analizadas en el laboratorio están significativamente correlacionadas con las variables radiométricas analizadas. Este hecho que refuerza la idea anterior: A través del análisis de los espectros de reflectividad de un suelo quemado se podría evaluar la severidad con la que tuvo lugar el fuego y sus efectos sobre el suelo.

En cualquier caso, en este estudio se presentan los resultados de un ensayo llevado a cabo en el laboratorio y bajo condiciones controladas. Hay aún muchos matices que quedan por estudiar para poder llevar a esta tecnología desde el estado actual hasta su uso final en incendios reales. En ese sentido, este estudio representa el primer avance hacia una herramienta que ha mostrado un gran potencial y que sería interesante continuar. En la figura 15 se propone un esquema de los procesos propuestos para, en función de los resultados alcanzados hasta ahora, abordar la siguiente fase de la investigación, encaminada hacia la puesta a punto de una metodología que permitiese evaluar *in situ* la severidad de los incendios de forma rápida, precisa y eficaz mediante radiometría VNIR.

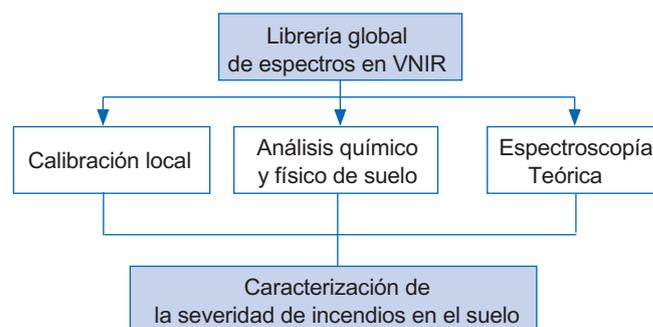


Figura 15. Esquema de los procesos propuestos para obtener estimaciones precisas y robustas de la severidad de los incendios sobre el suelo utilizando radiometría VNIR (modificado de Brown *et al* 2006).

6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio han permitido constatar la capacidad de la radiometría VNIR como herramienta para estimar los efectos de los incendios forestales sobre los suelos. Las ventajas de esta metodología no destructiva (rápida, económica y precisa) hacen de la radiometría VNIR una herramienta de gran potencial de cara a la estimación de la severidad de los incendios. Además, el método radiométrico desarrollado ha mostrado ser más sensible a los efectos del fuego que las estimaciones realizadas mediante técnicas tradicionales en el laboratorio.

Se ha establecido una base metodológica sólida para la realización de medidas con radiometría VNIR sobre suelos quemados. Se ha estudiado qué rangos de temperatura y tiempos de exposición son adecuados para poder desarrollar un modelo empírico representativo de los incendios reales. Asimismo, se ha desarrollado un protocolo para las mediciones radiométricas. Este protocolo incluye aspectos como la distribución espacial de las fuentes de iluminación, o la configuración del propio sensor y el pretratamiento de los espectros obtenidos. Estos avances representan una sólida base científica sobre la que se espera poder seguir avanzando en una investigación que permita estimar la severidad real de un incendio mediante técnicas radiométricas.

Los análisis realizados en el laboratorio sobre las muestras de suelo han permitido, por un lado, evaluar y caracterizar qué efectos se producen en el suelo como consecuencia de los tratamientos testados; y por otro, estudiar la relación entre dichos efectos y los resultados obtenidos con la radiometría VNIR. De los resultados obtenidos se desprende que el contenido en materia orgánica, nitrógeno total y la capacidad de intercambio catiónico disminuyen a consecuencia del choque térmico, mientras que el fósforo disponible y el pH aumentan. Dichos efectos no son significativos para los tratamientos menos agresivos (tratamientos a 200°C, y tratamientos de 1 minuto), y dependen en general de la temperatura, el tiempo de exposición, y las interacciones entre ellos.

Los espectros obtenidos para las muestras de suelos tratadas con choque térmico mostraron una tendencia constante y gradual conforme aumenta la temperatura y tiempo de exposición de los tratamientos, salvo para los tratamientos más agresivos. El choque térmico produce en general un descenso de la reflectividad a lo largo de todas las regiones del espectro analizadas y la disminución en la profundidad de los picos de absorción de agua (1400, 1900 y 2200 nm).

Dichos cambios eran ya detectables en algunos tratamientos de 200°C. Para los tratamientos más agresivos, los picos de absorción del agua llegan a desaparecer completamente, mientras que la tendencia a menores valores de reflectividad se invierte en la región visible del espectro y en las proximidades del rojo.

La investigación desarrollada durante este año, además de aportar resultados de gran interés *per sé* (en relación a los efectos del fuego sobre el suelo y el potencial

para estimar dichos efectos con técnicas radiométricas), sienta las bases y abre el camino para futuros trabajos de investigación dentro de la línea aquí propuesta. Resultaría de gran interés, por ejemplo, evaluar la posibilidad de emplear sensores ubicados en plataformas remotas (i.e., satélites, aviones, grúas) para estudiar in situ la severidad de incendios forestales. El uso de técnicas de teledetección ofrecería, entre otras ventajas, la posibilidad de conocer y estudiar la distribución espacial de los niveles de severidad a lo largo de un territorio.

Los indicios encontrados en este estudio, así como los avances realizados en aspectos metodológicos, abren una línea de investigación de gran interés para la gestión de áreas quemadas, ya que establecer con precisión el grado de severidad del incendio es fundamental de cara a la toma de decisiones y la aplicación de medidas paliativas.

7. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no hubiese sido posible sin la colaboración del laboratorio SpecLab (Centro de Ciencias Humanas y Sociales, Centro Superior de Investigaciones Científicas), que amablemente cedió sus instalaciones para las medidas con el espectro-radiómetro. Queremos agradecer especialmente a María Pilar Martín Isabel, Javier Pacheco Labrador y Elia Durá Candela por su asesoramiento e inestimable ayuda con las mediciones llevadas a cabo en su laboratorio.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Moreno, J. M., Rodríguez-Urbieto, I., G., Z., Cambio Climático y Riesgo de Incendios Forestales en Castilla-La Mancha, en: Impactos del Cambio Climático en Castilla-La Mancha. Primer Informe, JdCdCI Mancha. 2009.
- Palm, C.A., Swift, M.J., Wooster, P.L., Soil biological dynamics in slash-and-burn agriculture. *Agriculture Ecosystems and Environment* 1996; 58: 61-74.
- Ketterings, Q.M., Bigham, J.M., Laperche, V., Changes in soil mineralogy and texture caused by slash-and-burn fires in Sumatra, Indonesia. *Soil Science Society of America Journal* 2000; 64: 1108-17.
- Guerrero, C., Espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR) para la estimación de las temperaturas alcanzadas en suelos quemados, en: Actualización en métodos y técnicas para el estudio de los suelos afectados por incendios forestales A Cerdá y A Jordán, Editors: Valencia. 2010. p. 261-88.
- Dematté, JAM, Campos, R.C., Alves, M.C., Fiorio, P.R., Nanni, M.R., Visible-NIR reflectance: a new approach on soil evaluation. *Geoderma* 2004; 121(1-2): 95-112.
- McBratney, A.B., Minasny, B., Rossel, R.V.. Spectral soil analysis and inference systems: A powerful combination for solving the soil data crisis. *Geoderma* 2006; 136: 272-78.
- Ben-Dor, E., Banin, A., Near-Infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties. *Soil Science Society of America Journal* 1995; 59: 364-72.
- García Rodríguez, M.P., Muñoz León, C., Utilización de la Teledetección y Sistemas de Información Geográfica en la

- Cartografía de suelos. Boletín de la Sociedad Española de la Ciencia del Suelo 1997; 4: 95-105.
9. Coleman, T.L., Agbu, P.A., Montgomery, O.L., Gao, T., Prasad, S., Pectral band selection for quantifying selected properties in highly weathered soils. *Soil Science* 1991; 151: 355-61.
 10. Janik, L.J., Merry, R.H., Skjemstad, J.O., Can mid infrared diffuse reflectance analysis replace soil extractions? *Australian Journal of Experimental Agriculture* 1998; 38: 681-96.
 11. Dunn, B.W., Beecher, H.G., Batten, G.D., Ciavarella, S., The potential of near-infrared reflectance spectroscopy of soil analysis - a case study from the Riverine Plain of south-eastern Australia. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 2002; 42: 607-14.
 12. Lobell, D.B., Asner, G.P. Moisture effects on soil reflectance. *Soil Science Society of America Journal* 2002; 66: 722-27.
 13. Vagen, T.G., Shepherd, K.D., Walsh, M.G., Sensing land Landscape level change in soil fertility following deforestation and conversion in the highlands of Madagascar using Vis-NIR spectroscopy. *Geoderma* 2006; 133(3-4): 281-94.
 14. Shrestha, R.P., Relating soil electrical conductivity to remote sensing and other soil properties for assessing soil salinity in northeast Thailand. *Land Degradation and Development* 2006; 17(6): 677-89.
 15. Viscarra Rossel, R.A., Walvoort, D.J.J., McBratney, A.B., Janik, L.J., Skjemstad, J.O., Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma* 2006; 131: 59-75.
 16. Certini, G., Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia* 2005; 143: 1-10.
 17. DeBano, L.F., Neary, D.G., Ffolliott, P.F. Fire effects on ecosystems. 1998, New York: Wiley.
 18. Campbell, G.S., Jungbauer, J.D.J., Bidlake, W.R., Hungerford, R.D. Soil temperature and water content beneath a surface fire. *Soil Science* 1995; 159: 363-74.
 19. Franklin, S.B., Robertson, P.A., Fralish, J.S., Small-scale fire temperature patterns in Quercus communities. *Journal of Applied Ecology* 1997; 34: 613-30.
 20. DeBano, L.F., The role of fire and soil heating on water repellence in wildland environments: a review. *Journal of Hydrology* 2000; 231: 195-206.
 21. Guerrero, C., Mataix-Solera, J., Arcenegui, V., Mataix-Beneyto, J., Gómez, I., Near-infrared spectroscopy to estimate the maximum temperatures reached on burned soils. *Soil Science Society of America Journal* 2007; 71(3): 1029-37.
 22. M.A.P.A. Métodos oficiales de análisis. Parte III. 1994, Madrid: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
 23. Bremner, J.M., Mulvaney, C.S., Nitrogen-total, en: *Methods of soil analysis. Part 2: Chemical and microbiological properties*, AL Page et al., Editors, American Society of Agronomy: Madison. 1982. p. 595-624.
 24. Murphy, J., Riley, J.P., A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta* 1962; 27: 31-36.
 25. Rhoades, J.D., Cation exchange capacity, en: *Methods of soil analysis. Part 2*, AL Page et al., Editors, American Society of Agronomy: Madison. 1982. p. 149-57.
 26. McLean, E.O. Soil pH and Soil Lime requirement, en: *Methods of soil analysis. Part 2: Chemical and microbiological properties*, AL Page et al., Editors, American Society of Agronomy: Madison. 1982. p. 199-224.
 27. Gee, G.W., Bauder, J.W., Particle size analysis, en: *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*, A Klute, Editor, American Society of Agronomy: Madison. 1986. p. 383-411.
 28. Nelson, R.E., Carbonate and gypsum, en: *Methods of soil analysis. Part 2: Chemical and microbiological properties*, AL Page et al., Editors, American Society of Agronomy: Madison. 1982. p. 181-98.
 29. Vaughan, P., Estimación de contenido de humedad de la vegetación mediante espectro-radiometría. Trabajo de investigación tutelado. 2001, Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares, España.
 30. StatSoft, I (2004) STATISTICA (data analysis software system), version 7.
 31. Hartford, R.A., Frandsen, W.H., When it's hot, it's hot ... or maybe it's not (surface flaming may not portend extensive soil heating). *International Journal of Wildland Fire* 1992; 2: 139-44.
 32. Chandler, C.P., Cheney, P., Thomas, P., Trabaud, L., Williams, D. Volume I: Forest fire behavior and effects, en: *Fire in forestry* John Wiley & Sons, Inc: New York. 1991. p. 450.
 33. DeBano, L.F. The effect of fire on soil, en *Management and productivity of western-montane forest soils*, HA E. y LF Neuenschwander, Editors. 1991, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station: Ogden, UT. pp. 32-50.
 34. Simard, A.J., Fire severity, changing scales, and how things hang together. *International Journal of Wildland Fire* 1991; 1: 23-34.
 35. Hosking, J.S., The ignition at low temperatures of the organic matter in soils. *Journal of Agricultural Science* 1938; 28: 393-400.
 36. Neary, D.G., Klopatek, C.C., DeBano, L.F., Ffolliott, P., Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis. *Forest Ecology and Management* 1999; 122: 51-71.
 37. Kutiel, P., Naveveh, Z., Kutiel, H.