

Estudio sobre el potencial de la radiometría para estimar la severidad del fuego

EFECTOS DEL FUEGO

sobre las propiedades de los suelos y su comportamiento espectral

Conocer los efectos del fuego sobre el suelo es fundamental de cara a la aplicación de medidas paliativas. Sin embargo, los métodos usados hoy en día para estimar la severidad del fuego suelen resultar costosos, subjetivos y poco precisos. En el Centro de Investigación del Fuego (CIFU) se ha evaluado el potencial de la radiometría VNIR (visible e infrarrojo cercano) para caracterizar de manera rápida y eficaz el efecto de incendios de diferente duración e intensidad sobre las propiedades de los suelos.

Poder estimar con precisión los cambios ocurridos en los suelos tras un incendio forestal es esencial para programar las tareas de restauración de manera eficaz. La gestión post-incendio y los tratamientos paliativos a realizar tras un incendio (repoblaciones, extracciones madereras, protección contra la erosión, mapas de intervención prioritaria, etc.) no son siempre los mismos, sino que dependen en gran medida de la severidad del incendio y de los efectos ocurridos sobre los suelos afect-

tados. Además, la severidad del fuego no es homogénea para toda la superficie del incendio. Dentro de un mismo incendio suele haber áreas afectadas en mayor o menos medida por el fuego. Por este motivo, también es importante conocer la distribución espacial de la severidad del fuego sobre el área afectada.

Pese a la importancia de poder evaluar los efectos del fuego sobre el suelo, los métodos usados hoy en día para estimar su severidad suelen resultar costosos, subjetivos y poco precisos⁽¹⁾. Motivados por esa



Por **L. A. ARROYO**. Doctorada en Silvopascicultura por la Universidad Politécnica de Madrid; Investigadora postdoctoral del Centro de Investigación del Fuego. lara.arroyo@uclm.es.
M. B. HINOJOSA. Doctora en Ecología por la Universidad de Jaén; Investigadora postdoctoral del Centro de Investigación del Fuego.



En el Centro de Investigación del Fuego (CIFU) se ha evaluado el potencial de la radiometría visible y de infrarrojo cercano para caracterizar de manera rápida y eficaz el efecto del fuego sobre las propiedades de los suelos

necesidad metodológica, en el Centro de Investigación del Fuego (CIFU) se ha llevado a cabo un estudio que evalúa el potencial de la radiometría VNIR para caracterizar de manera rápida y eficaz el efecto del fuego sobre las propiedades de los suelos. Para ello, se ha investigado qué tratamientos de choque térmico son relevantes de cara al estudio de los efectos de incendios reales y cómo poner en práctica dichos tratamientos de manera robusta (es decir, de forma que las medidas sean comparables entre sí). Además, se han

llevado a cabo tanto técnicas tradicionales de caracterización de los efectos del fuego en suelos (mediante análisis físico-químicos en laboratorio) como las metodologías más recientes de radiometría VNIR (usando un espectro-radiómetro ASD FieldSpec 3). Este trabajo de investigación, de 12 meses de duración y financiado por FUNDACIÓN MAPFRE, ha permitido caracterizar y analizar los efectos del fuego sobre los suelos, así como evaluar la precisión de la radiometría VNIR para detectar y caracterizar dichos efectos.

La radiometría VNIR

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 comporta-

miento espectral distintivo, lo que permite su identificación y cuantificación⁽²⁾. Esta técnica representa una alternativa rápida y precisa para evaluar los cambios ocurridos en las propiedades del suelo tras un incendio forestal.

La radiometría VNIR ofrece 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 estos tienen una alta heterogeneidad espacial, por lo que poder hacer sólo unas pocas medidas precisas suele ser peor opción que poder hacer cientos de medidas algo menos precisas⁽³⁾. 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, sino que la muestra se escanea tal y como es. Además, por su sencillez, no ha-

ce 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⁽⁴⁾. Por último, cabe destacar que se trata de una técnica no destructiva. No se altera la muestra a medir.

En contraposición, son muchos los factores que inciden en la variabilidad es-

pectral 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⁽⁵⁾. 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⁽¹⁾. 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.

Este estudio representa el 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 análisis de la severidad de incendios forestales



La severidad del fuego

Cuando se habla de los efectos del fuego es importante diferenciar entre intensidad y severidad de los incendios, porque con frecuencia no son lo mismo⁽⁶⁾. El término intensidad se utiliza para describir la velocidad a la que un fuego libera energía térmica⁽⁷⁾. Habitualmente se cuantifica en relación con la intensidad de la línea de fuego, ya que esta variable está relacionada con la longitud de la llama y se puede medir fácilmente⁽⁸⁾. Por otro lado, el término severidad, de carácter más cualitativo, hace referencia a los efectos del fuego sobre los ecosistemas. Así, incendios de alta intensidad pueden llegar a producir importantes cam-

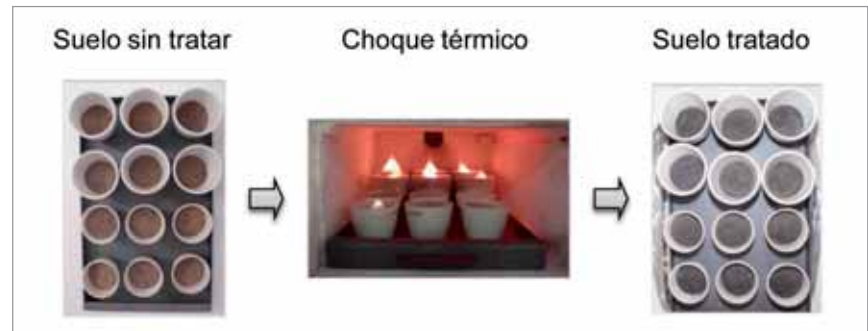


Figura 2. Tratamiento de las muestras de suelo: alícuotas de suelo pesadas y listas para el tratamiento; tratamiento de choque térmico en horno mufla y aspecto de las muestras un vez tratadas.

bios en el suelo, siendo en esos casos también catalogados como incendios de alta severidad. Sin embargo, este no es siempre el caso. Por ejemplo, fuegos latentes de baja intensidad pueden resultar de al-

ta severidad si llegan a causar cambios importantes en el suelo de calefacción, o incluso en el suelo adyacente. En ese caso, el factor determinante de la severidad del incendio no sería tanto la intensidad del mismo como la duración de las temperaturas sostenidas (es decir, el tiempo de exposición). Por tanto, conocer la severidad de un incendio es particularmente útil para describir los efectos del fuego sobre el suelo del sistema⁽⁹⁾.

Metodología del estudio

La metodología del estudio realizado se resume en la figura 1. En primer lugar, se seleccionaron y muestrearon dos tipos de suelos de propiedades edáficas bien contrastadas: un suelo de carácter calizo y con un elevado contenido en materia orgánica (suelo 1). Este suelo se localiza en un pinsapar del Parque Natural Sierra de las Nieves (Málaga). En contraposición, el suelo 2 es de carácter silíceo y bajo contenido en materia orgánica. Este suelo procede de un matorral de jaras y ericas del coto de caza de Quintos de Mora (Toledo).

Para poder evaluar el efecto del fuego sobre las muestras de suelo, las muestras fueron expuestas a tratamientos de choque térmico en un horno mufla (figura 2). De acuerdo a la revisión bibliográfica, se programaron 28 tratamientos de

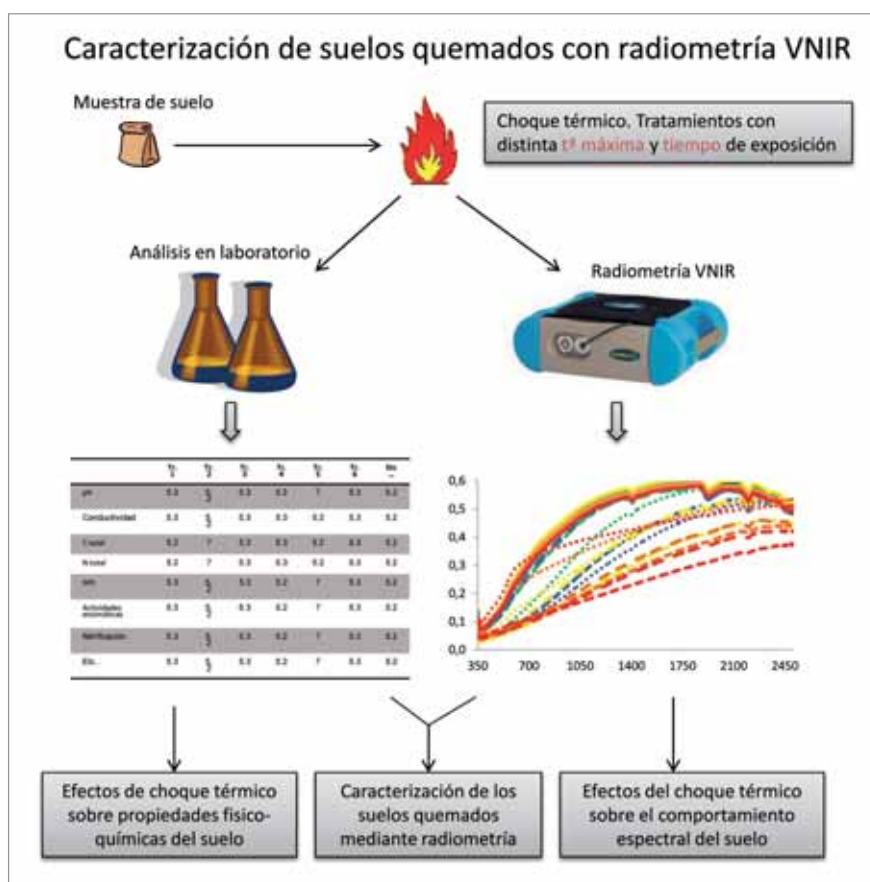


Figura 1. Metodología de trabajo llevada a cabo para el proyecto «Caracterización de suelos quemados mediante radiometría VNIR».



El suelo del Parque Nacional Sierra de Nieves (Malaga), de carácter calizo y alto contenido en materia orgánica, fue uno de los dos seleccionados para el estudio.

Dado el importante papel que tiene la fertilidad de los suelos en la posterior regeneración de la vegetación, los análisis físico-químicos tradicionales se centraron en aquellas variables típicamente relacionadas con la fertilidad de los suelos. Se evaluó el contenido en materia orgánica, el nitrógeno total, el fósforo inorgánico disponible, la capacidad de intercambio catiónico, los contenidos en calcio, magnesio, sodio y potasio intercambiables, el pH, la textura y los carbonatos totales. Los análisis realizados en el laboratorio permitían, por un lado, evaluar y caracterizar los efectos que 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.

choque térmico (tabla 1), a los que se añadió una muestra control (no tratada) por cada tipo de suelo. Se evaluaron rangos de temperatura de entre 100° C y 700° C y de tiempo de exposición de entre 1 y 30 minutos. Este rango de temperaturas y tiempos de exposición cubre los rangos de severidad descritos tanto para quemaduras prescritas como para incendios naturales (no controlados).

Todas las muestras tratadas (más las muestras control) fueron entonces analizadas. Se hicieron, por un lado, análisis tradicionales en el laboratorio, y de forma paralela, análisis con radiometría VNIR.



El suelo de matorral y jaras del coto de caza Quintos de Mora (Toledo), de carácter silíceo y bajo contenido orgánico, fue seleccionado en contraposición al anterior para completar el estudio.

Tabla 1. Condiciones (temperatura y tiempo de exposición) de los tratamientos de choque térmico a los que fueron sometidas las muestras de suelo (Tratm. = Tratamiento; Tª = Temperatura en °C).

Tratm.	Tª	Tiempo	Tratm.	Tª	Tiempo	Tratm.	Tª	Tiempo	Tratm.	Tª	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

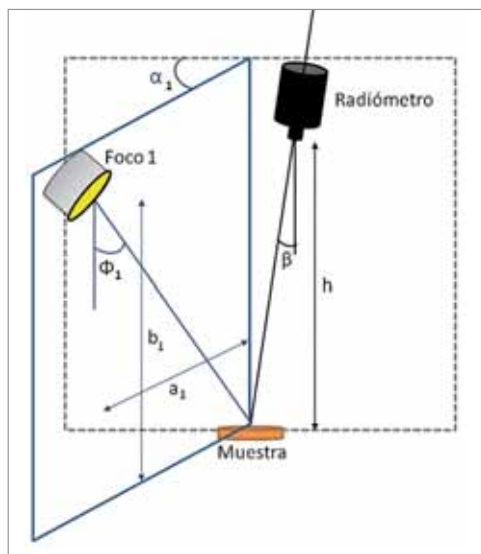


Figura 3. Esquema de la configuración de las mediciones con el radiómetro VNIR ($\beta = 0^\circ$; $h = 20$ cm; $\alpha_1 = \alpha_2 = 45^\circ$; $\phi_1 = \phi_2 = 60^\circ$; $a_1 = a_2 = b_1 = b_2 = 42$ cm).

El análisis espectral se llevó a cabo usando un radiómetro FieldSpec 3 de ASD (Analytical Spectral Devices Inc., Boulder, CO, EE UU) sobre las mismas muestras que los análisis tradicionales en laboratorio. Para las mediciones radiométricas se diseñó un protocolo de medidas. Este protocolo contemplaba la preparación de las muestras para su medida, el acondicionamiento de la sala de medidas (minimizando los problemas de reflectividad difusa), la disposición espacial de los focos de iluminación respecto al sensor y la muestra (figura 3), y la configuración de las medidas radiométricas propiamente dichas. Estas medidas permitían evaluar el efecto del choque térmico sobre el comportamiento espectral del suelo.

Resultados obtenidos

Los tratamientos de choque térmico produjeron cambios de color apreciables a simple vista (figura 4). Estas diferencias de color ponen de manifiesto

el efecto que el fuego tiene sobre el comportamiento espectral de los suelos, afectando, al menos, a la zona visible del espectro (hasta los 750 nm). Para poder evaluar cuantitativamente los cambios en el comportamiento espectral de los suelos tratados, así como para poder evaluar los cambios en la región del IRC (no apreciables por el ojo humano), es necesario recurrir a la radiometría.

La respuesta espectral de los suelos estudiados (sin ser sometidos a tratamientos de choque térmico) se presenta en la figura 5. Los espectros resultantes de las

Poder estimar con precisión los cambios ocurridos en los suelos tras un incendio forestal es esencial para programar las tareas de restauración de manera eficaz

medidas radiométricas estaban compuestas de 2.150 mediciones de reflectividad individuales. Para los análisis estadísticos se seleccionaron 11 longitudes de onda representativas de los

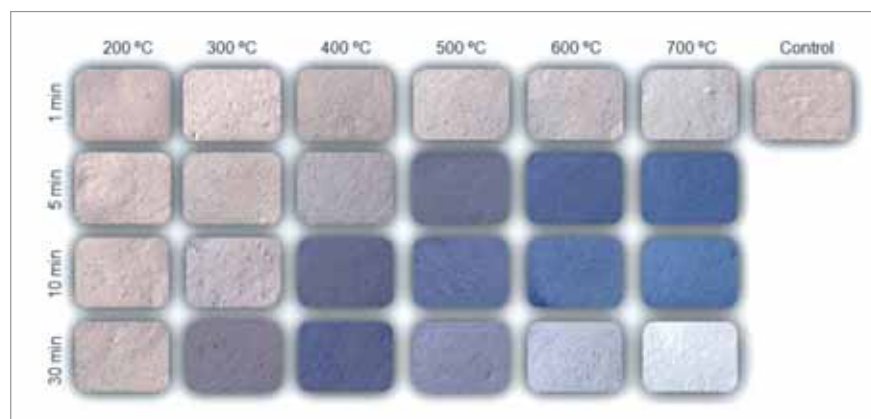


Figura 4. Aspecto de las muestras del suelo 2 después de ser sometidas a los tratamientos de choque térmico. Se representan en filas y columnas los tratamientos de igual tiempo y temperatura de exposición respectivamente. La muestra control se encuentra a la derecha.

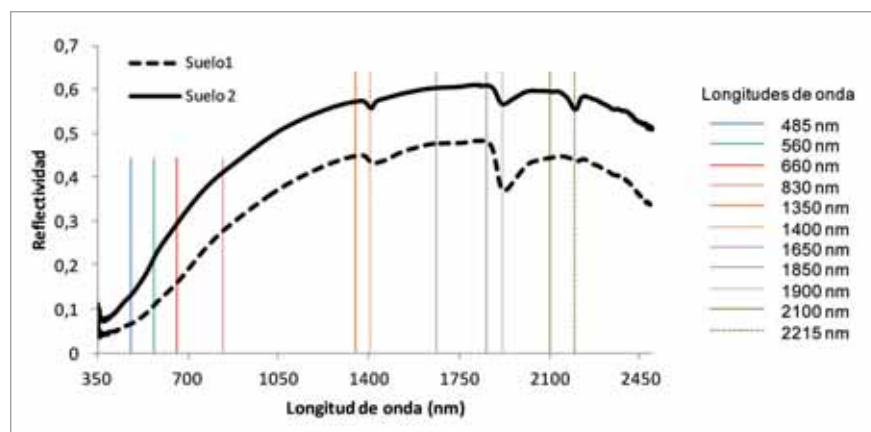


Figura 5. Espectros VNIR de las muestras de los suelos no tratadas (muestras control) y ubicación de las longitudes de onda seleccionadas para los análisis estadísticos.

espectros completos (las longitudes de onda seleccionadas se indican en la figura 5). 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.

Los espectros obtenidos para las muestras tratadas con choque térmico (figura 6) muestran un descenso de los valores de reflectividad a lo largo de todas las regiones del espectro analizadas, así co-



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

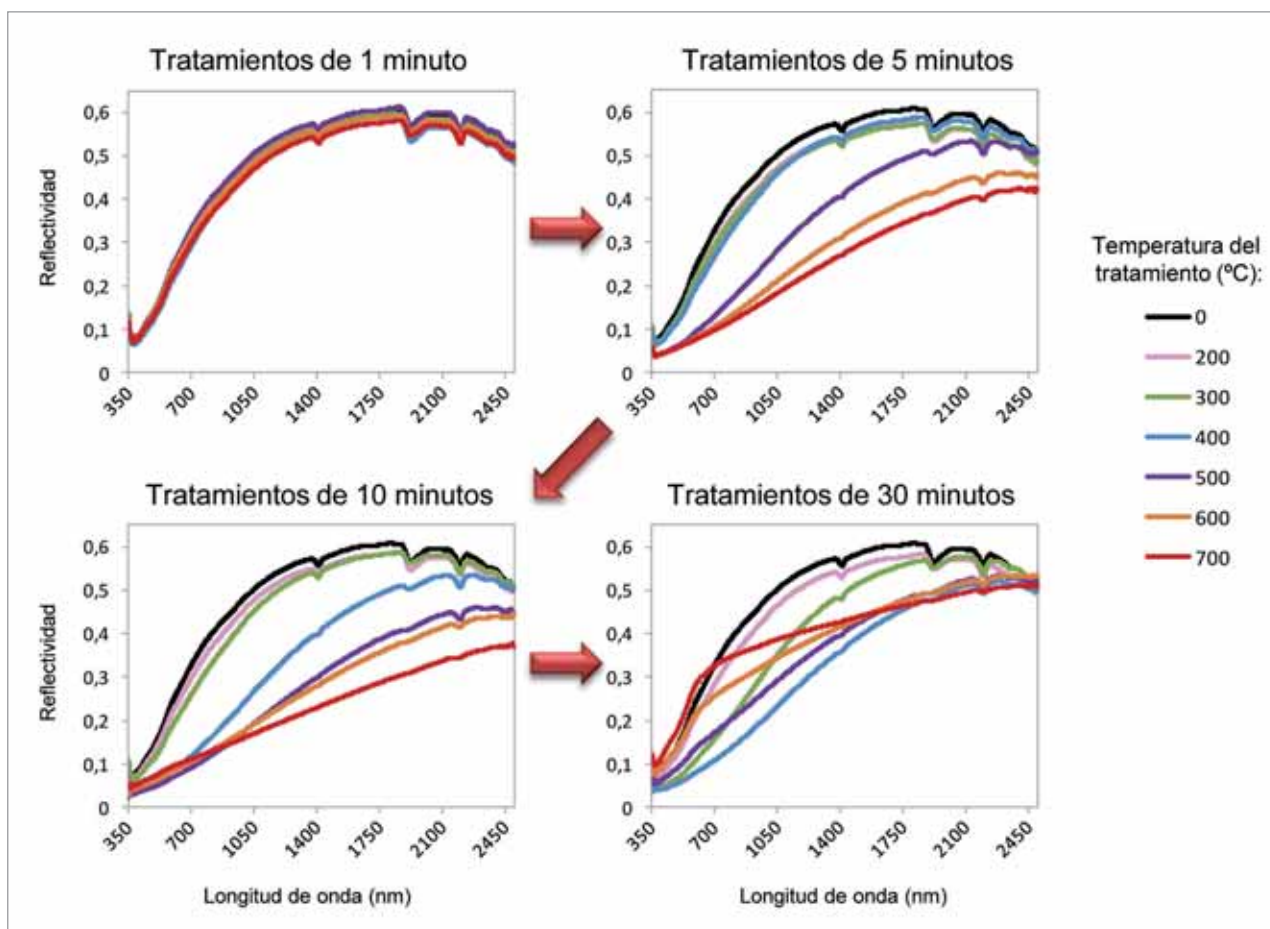


Figura 6. Respuesta espectral de las muestras del suelo 2 tras los tratamientos de choque térmico.

Tabla 2. Tendencias generales observadas en las variables físico-químicas analizadas en laboratorio. Resumen de resultados obtenidos para un test ANOVA de dos factores ($\alpha=0.01$).

	Aumento de temperatura De 200 a 700°C	Aumento de tiempo de exposición De 1 a 30 min.	Interacción temperatura x tiempo
% M.O.	↓	↓	●
N total	↓	↓	○
P asimilable	↑	↑	●
CIC*	↓	↓	●
Mg	≈	≈	●
K	↓	↓	○
Ca	↓	↓	●
Na	○	○	○
pH	↑	↑	●
% arcilla	↓	↓	●
% limo	↑	↑	●
% arena	≈	≈	●

*CIC = Capacidad de Intercambio Catiónico.

↑ = Existen diferencias significativas y la mayoría aumenta.

↓ = Existen diferencias significativas y la mayoría disminuye.

≈ = No existe patrón claro de comportamiento o no hay diferencias significativas.

● = Existe interacción entre los factores de temperatura y tiempo.

○ = No hay diferencias significativas.

mo una disminución en la profundidad de los picos de absorción de agua (para las longitudes de onda de 1.400, 1.900 y 2.200 nm). Ambos procesos tienen lugar de forma gradual, conforme aumenta la temperatura y tiempo de exposición de los tratamientos. Así, los picos de absorción del agua llegan a desaparecer completamente para los tratamientos de mayor temperatura y tiempo de exposición. Los cambios en el comportamiento espectral asociados a la presencia de agua en la muestra se producen fundamentalmente en la región del NIR (infrarrojo cercano) (en los picos de absorción del agua) y no son, por tanto, apreciables a simple vista. En cuanto al descenso en los valores de reflectividad, esta tendencia se invierte para los tratamientos de mayor severidad (es decir, mayor tiempo y temperatura de exposición). En los tratamientos de mayor severidad, los valores de reflectividad aumentan, especialmente en la región del espectro correspondiente al rojo y al in-

frarrojo cercano próximo. Este comportamiento conserva los mismos rasgos generales para los dos suelos estudiados. Según los análisis estadísticos realizados sobre las 11 longitudes de onda seleccionadas, las diferencias encontradas en los valores de reflectividad de las muestras tratadas eran estadísticamente significativas ($\alpha=0,01$). La radiometría VNIR es, por tanto, una técnica muy sensible a los cambios sufridos en los suelos a consecuencia del fuego.

Respecto a los análisis físico-químicos llevados a cabo en el laboratorio, se detectó un descenso en el contenido de materia orgánica, en la capacidad de intercambio catiónico y en el porcentaje de arcilla. Estos cambios no fueron sig-

La relevancia de estos avances es de especial interés ante el actual escenario de cambio climático

nificativos, en general, para los tratamientos menos severos (por ejemplo, los tratamientos de 200° C o los de 1 minuto de duración). De la misma forma, se detectó también un aumento significativo (aunque por lo general sólo para los tratamientos de más de 200° C y 1 minuto) en el pH y en el contenido de fósforo asimilable y las formas intercambiables de calcio. En el caso del K intercambiable, se detectó un descenso inicial de la concentración de esta base de cambio (para los tratamientos de una severidad intermedia), pero esta tendencia se invirtió a partir de los 5 y 10 minutos de duración para los tratamientos de 700 y 600° C respectivamente. No se detectaron diferencias significativas o un patrón claro en el comportamiento de la concentración de nitrógeno total, o las formas intercambiables de sodio y magnesio. La tabla 2 resume las tendencias generales observadas en este grupo de variables en función de un aumento del tiempo de exposición o de la temperatura alcanzada durante el tratamiento.

Conclusiones y propuesta de líneas de trabajo a seguir en un futuro

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. Además, se ha establecido una base metodológica sólida para la realización de medidas con radiometría VNIR sobre suelos quemados. 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

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

efectos del fuego que las estimaciones realizadas mediante técnicas tradicionales en el laboratorio.

Es importante destacar que los ensayos llevados a cabo para este estudio se han realizado en el laboratorio, bajo condiciones controladas e independientes de factores externos (fuente de iluminación constante, dispersión difusa mínima, interferencias eliminadas, etc.). Por tanto, los resultados de este trabajo no son directamente aplicables a medidas realizadas en campo o sobre incendios reales. Quedan aún muchos aspectos a investigar para poder trasladar esta tecnología desde su estado actual hasta su posible uso final en incendios reales. Los resultados hasta ahora alcanzados han permitido, no obstante, adquirir el conocimiento necesario para poder abordar con rigor el estudio de

la radiometría de campo para la caracterización de suelos quemados.

La relevancia de estos avances es de especial interés ante el actual escenario de cambio climático, puesto que, de acuerdo a las previsiones del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático, las condiciones futuras van a ser todavía más adversas: veranos más largos, más periodos de sequía y olas de calor. No en vano, durante los últimos años se ha detectado un aumento en el número y extensión de los incendios forestales en la cuenca mediterránea⁽¹⁰⁾, y se prevé que esta tendencia se mantenga, o incluso se agrave, para los próximos años. Por tanto, 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.



Teniendo en cuenta los alentadores resultados alcanzados en este proyecto, los autores del trabajo consideramos conveniente la puesta en marcha de las siguientes fases de la investigación (fi-

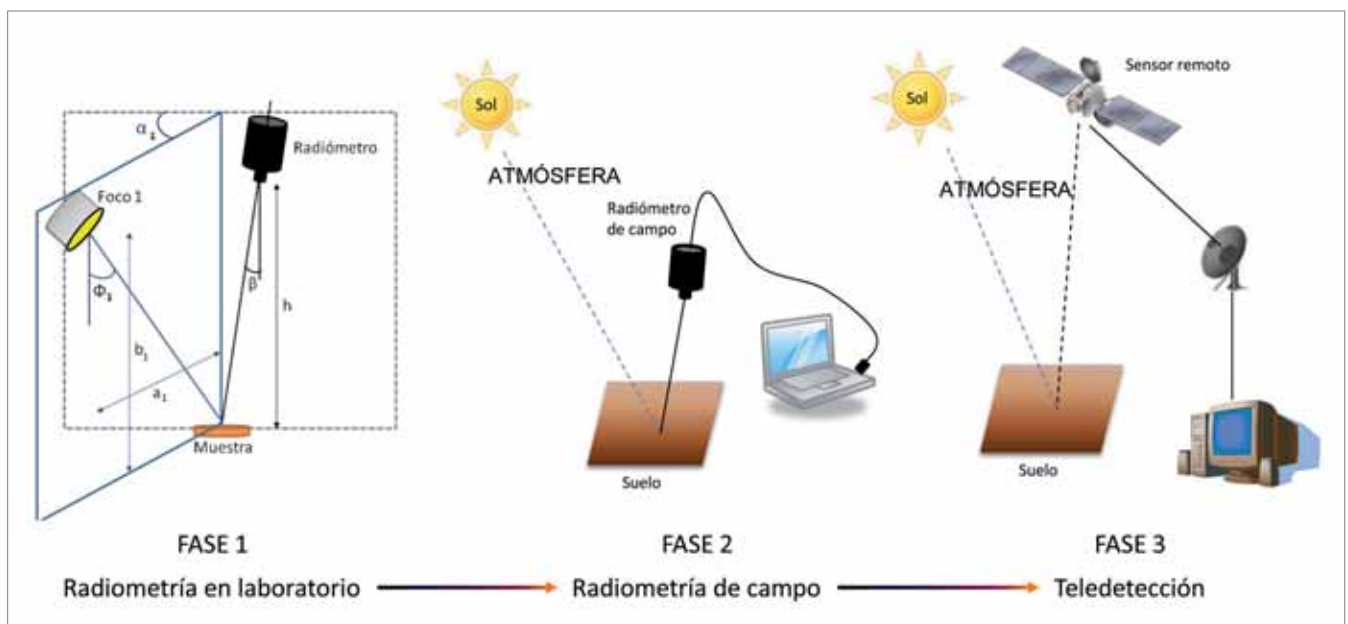


Figura 7. Fases de investigación propuestas según los resultados alcanzados hasta la fecha. El trabajo presentado en este artículo corresponde a la fase 1.



gura 7), encaminadas a la puesta a punto de una metodología que permita evaluar *in situ* la severidad de los incendios de forma rápida, precisa y eficaz mediante radiometría VNIR de campo (fase 2); y evaluar la posibilidad de utilizar técnicas de teledetección e imágenes adquiridas desde plataformas remotas para obtener mapas de severidad de los incendios forestales (fase 3). Mientras que en la primera fase (llevada a cabo en este proyecto) todos los parámetros de las medidas radiométricas eran bien conocidos, e incluso fijados por el propio usuario (de tal forma que maximizaban la eficacia de la medida), con la radiometría de campo (en la fase 2) empieza a haber factores que quedan fuera de nuestro control (por ejemplo, la cantidad de radiación que incide sobre la muestra, la presencia de nubes el día de la medida o el ángulo de inclinación solar). En esta fase, los conocimientos alcanzados durante la fase experimental en el laboratorio (fase 1) ayudarían a compensar las limitaciones asociadas a esta falta de

control sobre las condiciones de medida. De forma análoga, los conocimientos alcanzados durante la fase 2 ayudarían a compensar las mayores limitaciones asociadas a la fase 3.

El empleo 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. Por lo tanto, la investigación desarrollada en el Centro de Investigación del Fuego, además de aportar resultados de gran interés *per se* (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. Los indicios encontrados en este estudio, así como los avances realizados en aspectos metodológicos, representan el inicio de una línea de investigación de gran interés para la gestión de áreas quemadas. De hecho, establecer con precisión del grado de severidad del incendio es fundamental de cara a la toma de decisiones y la aplicación de medidas paliativas. ♦

AGRADECIMIENTOS

Investigación desarrollada con una ayuda de FUNDACIÓN MAPFRE.

PARA SABER MÁS

- [1] Guerrero, César. 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.
- [2] Demattê, J. A. M.; 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Chandler, C. P.; Cheney, P.; Thomas, P.; Traubaud, L.; Williams, D. Volume I: Forest fire behavior and effects, en: *Fire in Forestry*, John Wiley & Sons, Inc: New York. 1991. p. 450.
- [8] DeBano, L. F. The effect of fire on soil, en *Management and productivity of western-montane forest soils*, Harvey. A. E. y L. F. Neuenschwander, Editors. 1991, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station: Ogden, UT. p. 32–50.
- [9] Simard, A. J. Fire severity, changing scales, and how things hang together. *International Journal of Wildland Fire* 1991; 1: 23–34.
- [10] Moreno, J.M.; Rodríguez-Urbieto, I.; Zabala, G. Cambio climático y riesgo de incendios forestales en Castilla-La Mancha, en: *Impactos del Cambio Climático en Castilla-La Mancha*. Primer Informe, Junta de Comunidades de Castilla la Mancha, Editor. 2009.
- [11] 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.
- [12] 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.