

# Repelencia al agua en suelos afectados por incendio: comparación con experiencias de calentamiento en laboratorio

Gustavo Villarruel<sup>1</sup>, Gabriela A. Sacchi<sup>2</sup> y Vanesa P. Zampar<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Department of Geological Sciences, Harpur College of Arts and Sciences, State University of New York at Binghamton, USA.*

<sup>2</sup>*Departamento de Geología Aplicada, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.*

<sup>3</sup>*Departamento de Química, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.*

Fecha de recepción del manuscrito: 07/02/2022

Fecha de aceptación del manuscrito: 30/12/2022

Fecha de publicación: 30/12/2022

**Resumen**— Los incendios forestales son frecuentes en los ambientes naturales de la provincia de Córdoba, Argentina, siendo la influencia sobre la repelencia al agua (o hidrofobicidad) del suelo poco conocida. El objetivo del trabajo fue analizar las propiedades físicas y químicas de un suelo en condición pre y post incendio/calentamiento para caracterizar los cambios en hidrofobicidad ante el aumento de temperatura. Para ello se utilizaron muestras de suelo incendiadas y no incendiadas provenientes de un bosque de pinos en el Valle de Calamuchita. Las no incendiadas fueron calentadas en condiciones de laboratorio entre 175 °C y 270 °C (suelos calentados). Las propiedades analizadas corresponden a: hidrofobicidad por el método de penetración de la gota de agua (WDPT), granulometría por el método de la pipeta de Robinson, color por notación Munsell, pH por potenciometría y materia orgánica por el método de Walkley y Black. Los resultados indicaron que el aumento de temperatura disminuyó significativamente la repelencia al agua tanto en suelos incendiados como calentados. Esto se asocia principalmente a la descomposición de la materia orgánica original en sustancias de naturaleza hidrofílica, como así también a la disminución en el tamaño de las partículas minerales y aumento del pH del suelo.

**Palabras clave**— incendio forestal, repelencia al agua, temperatura de calentamiento.

**Abstract**— Natural wildfires and controlled fires are frequent in the natural environments of the province of Córdoba, Argentina, being the influence on soil water repellency (or hydrophobicity) poorly understood. The aim of this study was to analyze the physical and chemical properties of a soil on both the pre- and post- fire/heating status to characterize the changes on hydrophobicity that take place with increasing temperature. For that purpose, burned and unburned soil samples from a pine forest in the Calamuchita Valley were used. The latter were heated under laboratory conditions between 175 °C and 270 °C (heated soils). The analyzed properties were hydrophobicity by the Water Drop Penetration Time (WDPT), granulometry by the Robinson pipette method, color by Munsell notation, pH by potentiometry and organic matter by the Walkley and Black method. According to the results, the increase in temperature significantly decreased the water repellency both in burned soils and heated soils. This is mainly associated to the breakdown of the original organic matter into substances of hydrophilic nature, as well as to the decrease of the size of the mineral particles and the increase of the soil pH.

**Keywords**— Wildfires, water repellency, heating temperature.

## INTRODUCCIÓN

La repelencia al agua o hidrofobicidad es una propiedad de los suelos que reduce su afinidad por el agua. De este modo, la superficie de un suelo repelente al agua puede llegar a ofrecer una resistencia intensa a la humectación, lo que hace disminuir la infiltración del agua acumulada en la superficie durante períodos de tiempo que pueden oscilar

desde unos pocos segundos hasta horas, días o semanas (Jordán *et al.*, 2010), lo cual tiene consecuencias hidrológicas y geomorfológicas inmediatas. Por ejemplo, al disminuir la tasa de infiltración en la superficie del suelo, la repelencia al agua contribuye a reducir el tiempo de generación de escorrentía y a intensificar el flujo superficial. Esta situación, tiene a su vez otras consecuencias importantes como el aumento del riesgo de erosión, la irregularidad en el frente de mojado y el desarrollo de vías de flujo preferencial o el lavado acelerado de agroquímicos en el caso de sistemas agrícolas (Imeson *et al.*, 1992). No obstante, la repelencia al agua no siempre tiene efectos negativos, se citan el incremento en la

Dirección de contacto:

Gustavo Villarruel, 4400 Vestal Parkway East, Binghamton University, New York, 13905, gvillar3@binghamton.edu.

estabilidad estructural o el secuestro de carbono entre otros (Blanco-Canqui y Lal, 2009).

Las primeras aproximaciones al estudio de la repelencia en los suelos se produjeron de manera indirecta con anterioridad al siglo XX, mediante el estudio de las sustancias orgánicas del suelo (DeBano, 2000). Sin embargo, fue abordada de manera más intensa a partir de la segunda mitad de dicho siglo. Entre los años 1960 y 1970, se produjo un incremento en la frecuencia de publicaciones científicas en torno a la hidrofobia en suelos y su relación con incendios forestales mediante el uso de muestras de suelo incendiadas (Plaza-Álvarez *et al.*, 2018; Rueda, 2019) y calentadas en laboratorio (Sangucho y Vallejo, 2020). Las investigaciones realizadas hasta la actualidad sobre el tema han confirmado que se trata de un proceso extendido a nivel global, documentado en suelos de todos los continentes (salvo en la Antártida), y con características muy distintas desde el punto de vista de material parental, textura, clima, uso de suelo y tipo de vegetación (González-Peñaloza *et al.*, 2013; Yongfei *et al.*, 2018). Además de su importancia como indicador en los suelos del impacto causado por el fuego, algunos autores han sugerido que por sus relaciones con otras propiedades edáficas y la facilidad de su determinación analítica debería incluirse esta propiedad en los análisis rutinarios de suelos como un indicador de su calidad física (Blanco-Canqui y Lal, 2009). En el caso de la provincia de Córdoba, este es el primer trabajo enfocado en la compleja interacción entre incendios, calentamiento en laboratorio e hidrofobicidad del suelo.

Aunque en numerosas investigaciones se ha observado repelencia al agua en suelos de manera natural, la mayor intensidad observada en suelos afectados por incendios respecto a los suelos no quemados ha sugerido que el fuego puede ser un agente capaz de inducir hidrofobicidad (Jordán *et al.*, 2010). A su vez, el fuego es capaz de incrementar o reducir dicha propiedad en suelos naturalmente hidrofóbicos (Plaza-Álvarez *et al.*, 2018). También es posible que el fuego no provoque cambios en la repelencia al agua (Vergara, 2020) o que dichos cambios varíen con la profundidad en el perfil del suelo (Rodríguez, 2020). Los efectos del fuego sobre la repelencia al agua del suelo dependen fundamentalmente de la temperatura de la combustión, el tiempo de residencia del calor, la cantidad y el tipo de combustible y la humedad del suelo previa a la acción del fuego, así como el tipo de suelo (Doerr *et al.*, 2000).

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar la variación en la repelencia al agua de un suelo ante un evento de incendio en la región del Valle de Calamuchita, Córdoba, Argentina. Para ello, también se evalúa el comportamiento de ciertas propiedades edáficas (granulometría, color, pH y materia orgánica) como condicionantes de la repelencia al agua.

## ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se ubica a 2,5 km hacia el oeste de la localidad Los Reartes, Córdoba, Argentina. Geográficamente está comprendida entre las coordenadas  $31^{\circ} 55' 6.66''$  -  $31^{\circ} 55' 8.70''$  latitud sur y  $64^{\circ} 36' 12.30''$  -  $64^{\circ} 36' 14.88''$  longitud oeste (Fig. 1), a una altura de aproximadamente 850 msnm. Dicha área corresponde a una

plantación de bosque de pinos (*Pinus elliottis*, *Pinus tadea* y *Pinus radiata*), afectado por un incendio ocurrido el día 13 de diciembre de 2007. Se encuentra en el ambiente geomorfológico de Sierra Grande, donde el sistema litológico está compuesto principalmente por un complejo metamórfico de edad Proterozoico formado por mármoles, anfibolitas, gneises, esquistos cuarcíticos y rocas ígneas de composición granítica que han intruido el complejo metamórfico (SEGEMAR, 1999). Los suelos dominantes son los Ustorthentes líticos, siendo suelos jóvenes de escaso desarrollo, con el contacto de la roca dura a una profundidad menor de 50 cm. El régimen de humedad de los suelos es ústico, y el de temperatura térmico. El clima predominante en la región es templado con inviernos secos. La temperatura media anual es de  $14^{\circ}\text{C}$ , con una temperatura máxima anual de  $20^{\circ}\text{C}$ , y una temperatura mínima media de  $9^{\circ}\text{C}$ . El promedio anual de lluvia es de 789 mm, siendo el período estival el de máximas precipitaciones (noviembre-marzo). En esta región se concentran los incendios forestales más preocupantes a nivel provincial, cuya ocurrencia coincide con la estación seca, que se extiende desde comienzos del invierno hasta fines de primavera (diciembre). Este período se caracteriza por la presencia de abundante material vegetal seco, el cual crece durante la época lluviosa estival y luego muere por la falta de agua y por las heladas durante la época seca invernal. A las condiciones de falta de humedad y de disponibilidad de combustible seco, hay que agregar los frecuentes vientos de agosto y septiembre, que agravan los incendios cuando estos se inician, ya que renuevan el aporte de oxígeno y favorecen su propagación (Gorgas y Tassile, 2003).

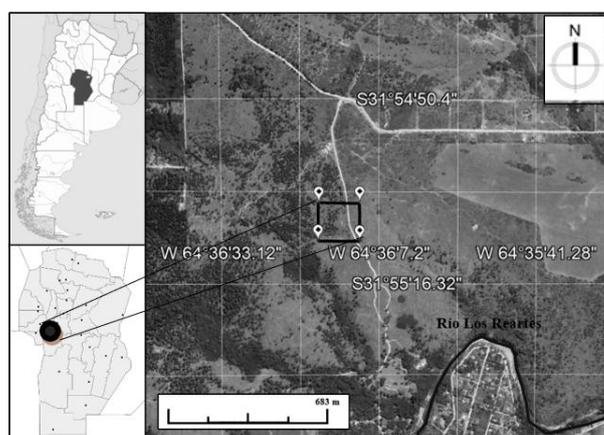


Fig. 1: Ubicación del área de estudio.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Muestreo de suelos

Se seleccionaron tres unidades de estudio, dos ubicadas en el bosque incendiado y la otra en el bosque sin incendiar (muestra control). Las mismas se definieron como unidades homogéneas de paisaje donde los factores de formación de suelos se consideraron similares de tal forma que la variable independiente de estudio es el impacto de los incendios en el suelo. En cada unidad se realizaron transectas de

muestreo de 30 m de longitud, dispuestas de manera diagonal a la pendiente general del paisaje, para minimizar los efectos de degradación de los procesos de erosión hídrica. De cada transecta, se obtuvo una muestra compuesta formada por quince muestras simples disturbadas, denominadas T1, T2 y T3 de acuerdo a la unidad de estudio que pertenecían (Tabla 1). La extracción de cada submuestra fue realizada a una profundidad de 0-5 cm y cada 2 m, eliminando de esta manera un posible comportamiento sectorizado de las variables edáficas (Sacchi *et al.*, 2015; Sacchi *et al.*, 2018). El suelo estudiado fue clasificado taxonómicamente según el Soil Survey Staff (2014), como Ustorthent lítico arenoso franco a franco arenoso.

**Tabla 1.** Nomenclatura y localización de unidades de estudio.

Transectas	Nomenclatura	Coordenadas	Altura (msnm)
Transecta 1 - área incendiada	T1	31° 55' 6.66"	872
		64° 36' 12.3"	
Transecta 2 - área incendiada	T2	31° 55' 7.38"	867
		64° 36' 13.14"	
Transecta 3 - área control	T3	31° 55' 8.7"	856
		64° 36' 14.88"	

### Análisis de laboratorio

Las muestras extraídas fueron secadas al aire y tamizadas por malla 2 mm (Tamiz #10). La fracción pasante del tamiz fue la utilizada para realizar las diferentes determinaciones analíticas. El calentamiento controlado en laboratorio se realizó utilizando una mufla marca Indef modelo 332. La temperatura de calentamiento fue mantenida durante 5 minutos, siendo las elegidas: 175 °C, 190 °C, 205 °C, 220 °C y 270 °C. Estas temperaturas se seleccionaron en base a estudios previos en diferentes suelos que registraron cambios en la repelencia al agua (Mataix-Solera *et al.*, 2014). En las muestras de suelos sin calentar (control) y en las afectadas por incendio se determinaron las siguientes propiedades físicas: granulometría por el método de la pipeta de Robinson (Schlichting *et al.*, 1995) y tamizado en húmedo luego de destruir la materia orgánica con peróxido de hidrógeno sin dispersar las muestras, separándose las siguientes fracciones: arcilla (< 2 µm), limo (2-50 µm) y arena (50-2000 µm); color en seco y húmedo utilizando notación Munsell (Munsell Color, 1975) y repelencia al agua por la prueba del tiempo de penetración de la gota de agua (Water Drop Penetration Time, WDPT) (Doerr, 1998) (Tabla 2). Para eliminar el efecto potencial en las mediciones de la repelencia al agua de cualquier variación de la humedad atmosférica las muestras fueron dejadas a secar al aire durante una semana (Doerr *et al.*, 2005). Se determinó la variación del ángulo de contacto de una gota con la superficie del suelo. Para ello, se tomaron fotografías del ángulo de contacto al comienzo del ensayo y luego cada 10 min hasta que la gota de agua bidestilada (~0,05 ml) penetró completamente en la muestra. Las propiedades químicas analizadas fueron: pH H<sub>2</sub>O (1:2,5) y pH KCl (1:2,5) por potenciometría; materia orgánica total (MOT) y

en sus fracciones vieja (MOV) y joven (MOJ) por el método de Walkley y Black (1934). Las determinaciones fueron realizadas por triplicado. En las muestras sometidas a calentamiento en laboratorio se efectuaron las mismas determinaciones analíticas que en las muestras incendiadas y control, con excepción de los análisis granulométricos.

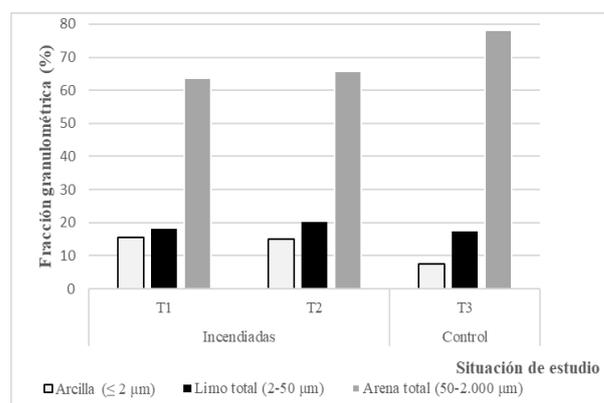
**Tabla 2.** Clases de tiempo de penetración de la gota de agua (WDPT) según Doerr *et al.* (1998).

Clase	Grado	Tiempo (seg)
0	No repelente al agua o hidrofílico	< 5
1A	Ligeramente repelente al agua	5 – 10
1B		10 – 30
1C		30 – 60
2A	Fuertemente repelente al agua	60 – 180
2B		180 – 300
2C		300 – 600
3A	Severamente repelente al agua	600 – 900
3B		900 – 3.600
4A	Extremadamente repelente al agua	3.600 – 18.000
4B		> 18.000

## RESULTADOS

### Propiedades físicas

**Granulometría.** La muestra control presentó una textura areno franca y las incendiadas franco arenosas, siendo en la primera muestra mayores las proporciones de la fracción arena y menores las de arcilla y limo (Fig. 2).

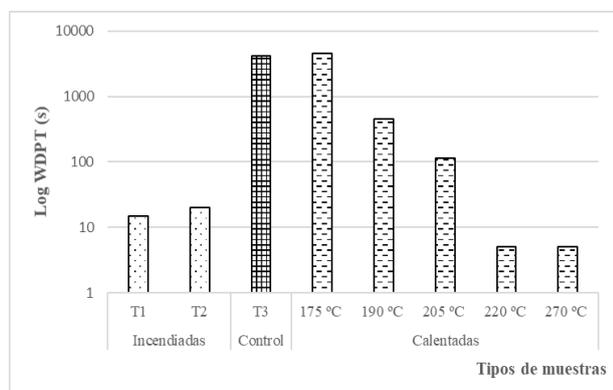


**Fig. 2:** Granulometría de muestras incendiadas y control.

**Color.** Todas las muestras, control, incendiadas y quemadas presentan el mismo Hue (10YR). Se observa que el suelo incendiado T2 es más oscuro que el T1, lo cual queda de manifiesto en el valor del Chroma. Con respecto a la muestra T3 y sus correspondientes calentadas, se registra un oscurecimiento con el aumento de temperatura (Tabla 3 del Anexo).

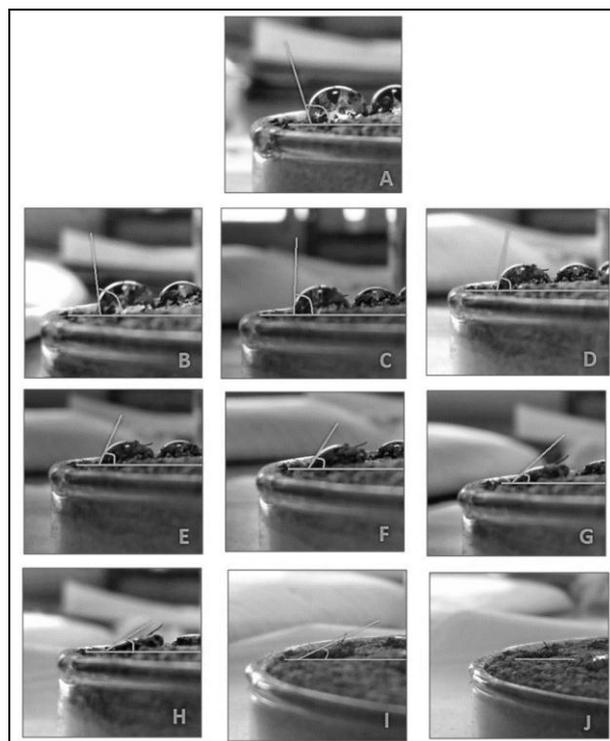
**Repelencia al agua.** Las muestras procedentes de suelos que han sido afectados por un efecto de incendio natural (T1 y T2) poseen una baja repelencia al agua, con valores de WDPT entre 5-60 seg, y por lo tanto se clasifican como suelos de clase 1 - ligeramente repelentes. Por otro lado, la muestra control (T3), presenta valores de medianas de WDPT de 3943, 4284 y 4405 seg y se clasifica como un suelo clase 4A - extremadamente repelente (Fig. 3).

En las muestras calentadas, los valores del WDPT a los 175 °C se aproximan a los de la muestra T3, con tiempos de penetración de 3603, 4851 y 5158 seg, es decir, también pertenecen a la clase 4A - extremadamente repelente. A la temperatura de 190 °C se registra una rápida disminución del tiempo de penetración de las gotas de agua, con valores de mediana de WDPT de 235, 441 y 696 seg. Según el promedio de estos valores (457 seg), la muestra se clasifica como un suelo clase 2C - fuertemente repelente. A los 205 °C los valores de WDPT son aún menores, alcanzando medianas de 98, 101 y 147 seg, clasificándose como un suelo de clase 2A - fuertemente repelente al agua. A mayores temperaturas de 220 °C y 270 °C se observan valores de WDPT menores a 5 seg en todos los casos, clasificándose ambos como suelos de clase 0 - no repelentes (Fig. 3).



**Fig. 3:** Variación de la repelencia al agua en muestras incendiadas, control y calentadas.

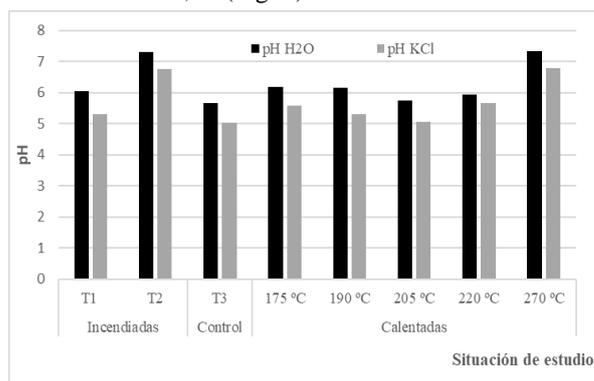
En las muestras con un comportamiento extremadamente repelentes (T3 y calentada a 175 °C), se observa el mismo comportamiento de la variación del ángulo de contacto de las gotas. En ambos casos, se registra una disminución del ángulo de repelencia con el tiempo de penetración, llegando el mismo a un valor nulo a los 5.040 seg en la muestra T3, y a los 3.960 seg en la calentada (Fig. 4).



**Fig. 4:** Variación del ángulo de contacto en muestra T3. Inicio del ensayo: 110° (A); 10': 98° (B); 20': 86° (C); 30': 77° (D); 40': 66° (E); 50': 55° (F); 60': 43° (G); 70': 30°(H); 80': 16° (I); 90': 0° (J).

### Propiedades Químicas

**pH H<sub>2</sub>O – pH KCl.** Los valores de pH H<sub>2</sub>O de las muestras de suelo T1 y T2, afectadas por incendio, son de 6,06 y 7,30 respectivamente, clasificándose como ligeramente ácidos a neutros. Ambos valores resultan mayores a comparación a la muestra T3, de 5,67, calificada como moderadamente ácida. En cuanto al pH en KCl, resulta menor en todos los casos, siendo de 5,32 en la muestra T1 y de 6,77 en T2. En el caso de la muestra T3, dicho valor es de 5,05 (Fig. 5).



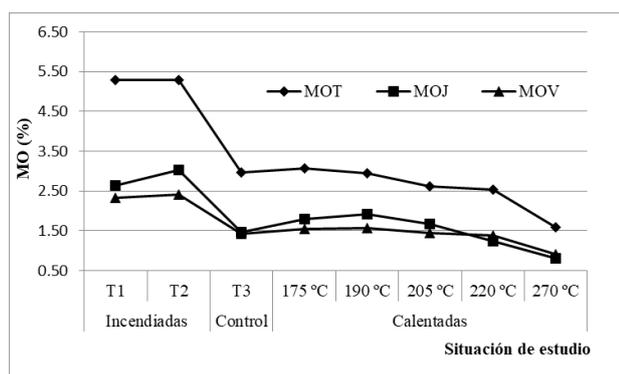
**Fig. 5:** Variación de la repelencia al agua en muestras incendiadas, control y calentadas.

En el caso de las muestras calentadas, a los 175 °C el pH H<sub>2</sub>O aumenta llegando a un valor de 6,18 (ligeramente ácido), el cual se mantiene prácticamente constante hasta los 190 °C. A los 205 °C se registra una disminución del pH a 5,75, el cual aumenta levemente a los 220 °C siendo el suelo a ambas temperaturas calificado como moderadamente ácido. Finalmente, hacia los 270 °C se

produce un incremento a un valor de 7,33, siendo el valor más alto registrado y clasificándose como un suelo neutro (Fig. 5).

Respecto al pH KCl, presenta un comportamiento similar al pH H<sub>2</sub>O con el incremento de la temperatura. A los 175 °C se registra un incremento de esta propiedad, llegando a un valor de 5,59. A los 190 °C y 205 °C el pH KCl disminuye hasta llegar a 5,06. Luego, a los 220 °C y 270 °C se registra un incremento mucho más significativo, alcanzando un valor máximo de 6,79 (Fig. 5).

**Materia orgánica.** Las muestras afectadas por incendio presentaron valores de MOT de 5,29 %, en ambas muestras los porcentajes de MOJ superan los de MOV (Fig. 6). En la muestra control, T3, los valores disminuyen y los porcentajes de MOV y MOJ se equiparan. En las muestras calentadas, se observa una tendencia general de disminución de todas las fracciones consideradas de la materia orgánica versus temperatura. Los valores de MOJ en las situaciones estudiadas son mayores con respecto a los de MOV, esto se mantiene hasta los 220 °C donde se observa un comportamiento opuesto de estas fracciones de materia orgánica (Fig. 6).



**Fig. 6:** Variación de MOT y de MO en sus fracciones joven (MOJ) y vieja (MOV) con la temperatura.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores extremadamente repelentes al agua de la muestra control se asocian con una vegetación forestal resinosa típica de la unidad de muestreo, estos árboles perennes aportan al suelo una considerable cantidad de compuestos hidrofóbicos tales como resinas, ceras o aceites aromáticos (Doerr *et al.*, 2005; Jordán *et al.*, 2010). La disminución de la repelencia al agua sea por efecto de la temperatura del incendio o por calentamiento en laboratorio (Fig. 3) se asocia principalmente a cambios en la naturaleza hidrofóbica de la materia orgánica del suelo, la cual da lugar a cenizas y restos de hojarasca hidrofílicos con el aumento de la temperatura (Cerdà y Doerr, 2008). En muestras calentadas, la disminución del grado de repelencia a partir de ~ 190 °C (Fig. 3) podría asociarse con la descomposición de las sustancias orgánicas responsables de la hidrofobicidad, lo cual es consistente también con una disminución de los porcentajes de MOT (Yongfei *et al.*, 2018) (Fig. 6). Varios autores han demostrado que

alrededor de los 200 °C empiezan a destruirse los compuestos orgánicos del suelo, aunque los cambios sustanciales en los contenidos de MOT se registran a partir de los 300 °C (Ulery y Graham, 1993; Sacchi *et al.*, 2015). En las muestras incendiadas, el comportamiento es distinto, en estas últimas la hidrofobicidad disminuyó notablemente, pero la cantidad de materia orgánica es mucho mayor. Esto podría explicarse por el aumento del carbono orgánico que tiene lugar en las áreas quemadas a causa de las cenizas después de unos meses del incendio, así como también a un posible restablecimiento de la vegetación del suelo y de nuevos microorganismos, que favorecería el incremento de la fracción orgánica (Paricio, 2007). Es la naturaleza hidrofílica/hidrofóbica de la materia orgánica más que su cantidad lo que controla el grado de hidrofobicidad de los suelos (Jaramillo, 2004).

Al analizar los cambios de MOJ y MOV en las distintas muestras, puede notarse que en las muestras control, incendiadas y calentadas entre 175 °C y 205 °C, la cantidad de MOJ es mayor a la MOV, lo cual indica que en dichas muestras predominan los compuestos orgánicos más lábiles, recientemente incorporados al suelo. En cambio, en las muestras calentadas entre 220 °C y 270 °C, la situación se invierte (MOV > MOJ), predominando las sustancias orgánicas más resistentes (Fig. 6). Este comportamiento indicaría que las sustancias orgánicas más jóvenes y lábiles (MOV) son las primeras en destruirse por efecto del fuego, enriqueciéndose el suelo relativamente en la materia orgánica más resistente (MOV).

Respecto al color, el oscurecimiento de las muestras con la temperatura tanto de calentamiento como de incendio (Tabla 3 del Anexo) es producto de la reducción de materia orgánica a cenizas, pudiendo también estar relacionado al incremento de la MOV a mayores temperaturas ( $\geq 220^{\circ}\text{C}$ ) (Ulery y Graham, 1993).

Respecto a la granulometría (Fig. 2), las texturas más finas de las muestras incendiadas implican una menor susceptibilidad de las mismas a desarrollar repelencia al agua, debido a la mayor superficie específica de las partículas dominantes ( $\leq 2 \mu\text{m}$ ). Los suelos más arenosos están más propensos a desarrollar hidrofobicidad debido a la baja superficie específica que debe ser cubierta por sustancias hidrofóbicas (Doerr *et al.*, 2005; González-Peñaloza *et al.*, 2013). A su vez, la disminución de las fracciones granulométricas más gruesas ( $> 50 \mu\text{m}$ ) en las muestras incendiadas podría asociarse con la ruptura de los feldespatos y otros minerales del suelo por acción del calentamiento (thermal shock), formándose partículas de menor tamaño (Sacchi *et al.*, 2015).

El pH H<sub>2</sub>O moderadamente ácido (5,67) de la muestra control se asocia a la vegetación de pinos, que favorece la acidificación del suelo (Broquen *et al.*, 2005). La acidez de esta muestra favorece su hidrofobicidad, debido a la mayor actividad fúngica que aporta compuestos hidrofóbicos y a la menor humidificación de la materia orgánica en los suelos ácidos (Rodríguez-Alleres *et al.*, 2007). En las muestras incendiadas y calentadas, el incremento del pH H<sub>2</sub>O y pH KCl con respecto a la situación control (el cual se torna significativo y con tendencia al aumento a partir de los 220 °C) (Fig. 5), podría atribuirse a la formación de óxidos de varios elementos y a la liberación de cationes básicos de

la materia orgánica por aumento de la temperatura (Rovira, 2008).

Por otra parte, los mayores porcentajes de arcilla en las muestras incendiadas junto con los mayores valores de pH indicarían mayor contenido de bases intercambiables. Esta situación en el paisaje natural le habría otorgado al suelo propiedades hidrofílicas protegiéndolo de la erosión y en consecuencia permitiendo la recuperación de la materia orgánica (Cerdà y Doerr, 2008). Por el contrario, en la zona no incendiada, el suelo se caracterizó por ser extremadamente hidrofóbico y, por lo tanto, con velocidades de infiltración muy lentas, lo cual se comprueba a partir de las mediciones de los cambios en el ángulo de contacto de la gota de agua a lo largo del ensayo WDPT en las muestras extremadamente repelentes (control y calentada a 175 °C). Según estos ensayos, una vez que la gota se deposita sobre la superficie del suelo, demora más de 60' en infiltrarse en el suelo, anulándose el ángulo de contacto (Fig. 4). La baja tasa de infiltración contribuye a reducir el tiempo de generación de escorrentía y a intensificar el flujo superficial, lo que tiene a su vez otras consecuencias importantes relacionadas con el riesgo de erosión y la pérdida de suelo (Imeson *et al.*, 1992).

## CONCLUSIONES

La repelencia al agua de la muestra control se encuentra afectada tanto por efecto del incendio, como por efecto del calentamiento en laboratorio. En ambos casos, la hidrofobicidad disminuyó al estar el suelo modificado por un evento de incremento de temperatura. Con respecto al incendio, el suelo se comportó extremadamente repelente (WDPT > 3600 seg) en la zona control, a ligeramente repelente (5 seg < WDPT < 60 seg) en la zona quemada. En relación con el calentamiento, la repelencia al agua del suelo control disminuyó progresivamente con el aumento de temperatura hasta tornarse hidrofílico (WDPT < 5 seg) a los 220°C (temperatura crítica). El carácter hidrofílico del suelo incendiado habría protegido al mismo de la erosión hídrica, favoreciendo la recuperación de la materia orgánica.

Esta disminución significativa de la hidrofobicidad con la temperatura se asocia principalmente a los cambios relacionados con la materia orgánica, la cual se descompone dando lugar a cenizas y restos de hojarasca de carácter hidrofílico. Sin embargo, cambios inducidos por incendios y calentamiento en otras propiedades edáficas, tales como el incremento de pH y la presencia de granulometrías más finas, también habrían influido en el decrecimiento registrado de la repelencia al agua del suelo.

## AGRADECIMIENTOS

A los docentes del laboratorio de la cátedra de Química Aplicada y del Laboratorio de Geotecnia de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, por su colaboración.

## REFERENCIAS

- [1] Blanco-Canqui H. y Lal R. (2009), "Extent of soil water repellency under long-term no-till soils", *Geoderma*, 149: 171-180.
- [2] Broquen P., Candan F., Falbo G., Girardin J. L. y Pellegrini V. (2005), "Impacto del *Pinus ponderosa* sobre la acidificación de los suelos de la transición bosque-estepa, SO del Neuquén, Argentina" *Bosque*, 26: 63-74.
- [3] Cerdà A. y Doerr S. H. (2008), "The effect of ash and needle cover on surface runoff and erosion in the immediate post-fire period" *Catena*, 74: 256-263.
- [4] DeBano L. F. (2000), "Water repellency in soils: a historical overview", *Journal of Hydrology*, 231-232: 4-32.
- [5] Doerr S.H. (1998), "On standardizing the 'Water Drop Penetration Time' and the 'Molarity of an Ethanol Droplet' techniques to classify soil hydrophobicity: a case study using medium textured soils", *Earth Surface Processes and Landforms*, 23: 663-668.
- [6] Doerr S.H., Douglas P., Evans R., Morley C., Mullinger N. J., Bryant R. y Shakesby R. A. (2005), "Effects of heating and post-heating equilibration times on soil water repellency", *Australian Journal of Soil Research*, 43: 261-267.
- [7] Doerr S.H., Shakesby R. A. y Walsh R. P. D. (2000), "Soil water repellency: its causes, characteristics and hydrogeomorphological significance", *Earth Science*, 51: 33-65.
- [8] González-Peñaloza F. A., Zavala L. M., Jordán A., Bellinfante N., Bárcenas-Moreno G., Mataix-Solera J., Granged A. J. P., Granja-Martins F. M., Neto-Paixão H. M. (2013), "Water repellency as conditioned by particle size and drying in hydrophobized sand", *Geoderma*, 209-210: 31-40.
- [9] Gorgas J. A. y Tassile J. L. (2003), *Recursos Naturales de la Provincia de Córdoba: Los Suelos, nivel de Reconocimiento 1:500.000*, Córdoba: Agencia Córdoba D.A.C y T.S.E.M.
- [10] Imeson A. C., Verstraten J. M., Van Mullingen E. J. y Sevink J. (1992), "The effects of fire and water repellency on infiltration and runoff under Mediterranean type forests" *Catena*, 19: 345-361.
- [11] Jaramillo D. (2004), "Repelencia al agua en suelos con énfasis en Andisoles de Antioquia". Escuela de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia,
- [12] Jordán A., Zavala L. M., González F. A., Bárcenas-Moreno G. y Mataix-Solera J. (2010), "Repelencia al agua en suelos afectados por incendios: métodos sencillos de determinación e interpretación" en *Actualización en métodos y técnicas para el estudio de suelos afectados por incendios forestales*. Valencia, Càtedra de Divulgació de la Ciència, Universitat de Valencia, pp. 145-183.
- [13] Mataix-Solera J., Arcenegui V., Zavala L. M., Pérez-Bejarano A., Jordán A., Morugán-Coronado A., Bárcenas-Moreno G., Jiménez-Pinilla P., Lozano E., Granged A. J. P. y Gil-Torres J. (2014), "Small variations in soil properties control fire-induced water repellency", *Spanish Journal of Soil Science*, 4: 51-60.
- [14] Munsell Color (1975), Munsell Soil Color Chart. Macbeth a Division of Kollmorgen Corporation, Baltimore.
- [15] Paricio S. (2007), "Comparació d'un sòl cremat i d'un de no cremat de l'incendi de Sant Llorenç del Munt i l'Obac de l'agost del 2003", en *VI Encuentro de Estudiosos de Sant Llorenç del Munt i l'Obac*, Oficina Técnica de Parques Naturales, Barcelona. pp. 253-259.
- [16] Plaza-Álvarez P. A., Lucas-Borja M. E., Sagra J., Moya D., Alfaro-Sánchez R., González-Romero J. y De las Heras J. (2018), "Changes in soil water repellency after prescribed burnings in three different Mediterranean forest ecosystems", *Science of The Total Environment*, 644: 247-255.
- [17] Rodríguez-Alleres M., de Blas E. y Benito E. (2007), "Estimation of soil water repellency of different particle size fractions in relation with carbon content by different methods", *Science of the Total Environment*, 378: 147-150.

- [18] Rodríguez J. S. (2020), “Efecto de los incendios forestales sobre la pérdida de suelo superficial por erosión hídrica en la Cuenca del Arroyo Ventana”. Tesis de grado. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad Nacional de La Plata.
- [19] Rovira L. (2008), “Evaluación del Impacto de los incendios rurales sobre suelos en el Valle de Calamuchita, Córdoba (Argentina)”. Tesis de grado. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba.
- [20] Rueda L. J. E. (2019), “Caracterización de propiedades físicas y químicas en suelos afectados por acción del Incendio Forestal Aguas Claras en los Cerros Orientales de Bogotá”. Tesis de grado. Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- [21] Sacchi G., Campitelli P., Soria P. y Ceppi S. (2015), “Influencia de temperaturas de calentamiento sobre propiedades físicas y químicas de suelos con distinto material parental y uso antrópico”, *Spanish Journal of Soil Science*, 5: 214-226.
- [22] Sacchi G., Zampar V. y Formica S. (2018), Efecto del calentamiento de suelos de la Reserva Natural Urbana General San Martín, Córdoba, Argentina. Resúmenes Ampliados. Libro 1. Periurbanos hacia el consenso. Ciudad, ambiente y producción de alimentos: propuestas para reordenar el territorio. 1º Encuentro Nacional sobre Periurbanos e Interfases Críticas, 2ª Reunión Científica del PNNAT y 3ra Reunión de la Red Periurba. Ediciones INTA. ISBN 978-987-521-945-8. pp. 414-417.
- [23] Sangucho K. A. U. y Vallejo N. F. M. (2020), “Comparación de la repelencia al agua del suelo de zonas afectadas por incendios forestales, en análisis realizados in situ y en laboratorio” Tesis de grado. Universidad Politécnica Salesiana.
- [24] Schlichting E., Blume H. P. y Stahr K. (1995), “Bodenkundliches Praktikum”, Blackwell Wissenschafts-Verlag. Berlín.
- [25] SEGEMAR (1999), *Geología Argentina*. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Buenos Aires.
- [26] Soil Survey Staff (2014), *Keys to Soil Taxonomy*. Twelfth Edition, U.S. Government Printing Office. Washington, DC.
- [27] Ulery A. L. y Graham R. C. (1993), “Forest fire effects on soil color and texture”, *Soil Science Society of America Journal*, 57: 135-140.
- [28] Vergara R. E. R. (2020), “Calidad microbiológica de suelos afectados por quema/incendio en la región centro-sur de Chile”. Tesis de maestría. Facultad de Agronomía. Universidad de Concepción.
- [29] Walkley A. y Black I. A. (1934), “An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method”, *Soil Science*, 37: 29-38.
- [30] Yongfei G., Honglin L., W Hongxin, Alamus. (2018), “Seasonal changes in soil water repellency of different land use types in Inner Mongolia grassland”, *Soil and Tillage Research*, 177: 37-44.

**ANEXO**

***Color de muestras de suelo de acuerdo con la notación Munsell (1975).***

**Tabla 3.** Color en seco y húmedo de las en muestras incendiadas, control y calentadas.

Unidad de estudio	T1	T2	T3	Muestras calentadas				
				175 °C	190 °C	205 °C	220 °C	270 °C
Color en seco	10YR 5/2	10YR 4/2	10YR 6/3	10YR 5/3	10YR 5/3	10YR 5/2	10YR 4/2	10YR 3/2
Color en húmedo	10YR 3/2	10YR 3/1	10YR 4/3	10YR 3/3	10YR 3/2	10YR 2/2	10YR 2/1,5	10YR 2/1