

# Influencia de temperaturas de calentamiento sobre propiedades físicas y químicas de suelos con distinto material parental y uso antrópico

*The influence of heating temperature on the physical and chemical properties of soils with different parent materials and anthropogenic uses*

*Influencia de temperaturas de calentamiento sobre las propiedades físicas e químicas de solos con diferente material parental e uso antrópico*

## AUTORES

Sacchi G.<sup>@,1</sup>  
gsacchi@efn.uncor.edu

Campitelli P.<sup>2</sup>

Soria P.<sup>1</sup>

Ceppi S.<sup>2</sup>

<sup>@</sup> Corresponding Author

<sup>1</sup> Departamento de Geología Básica. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina.

<sup>2</sup> Departamento Recursos Naturales. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina.

Received: 29.12.2014 | Revised: 07.08.2015 | Accepted: 21.08.2015

## RESUMEN

Los fuegos naturales y controlados son frecuentes en los ambientes naturales de la provincia de Córdoba (Argentina), siendo la influencia sobre las propiedades edáficas físicas y químicas poco conocida. En este trabajo se estudiaron los efectos del calentamiento en horizontes superficiales de suelos desarrollados a partir de dos materiales parentales, representativos del ambiente geomorfológico Piedemonte Oriental de la Sierra Chica (Córdoba, Argentina). El objetivo fue cuantificar los cambios provocados por distintas temperaturas de calentamiento (entre 100 °C y 500 °C), bajo condiciones de laboratorio, en propiedades físicas y químicas de dos suelos con diferente composición granulométrica y uso antrópico. Los suelos se clasificaron como Haplustoll údico, con textura franca fina (suelos aluviales), y Argiustoll údico, con textura limosa fina (suelos loessoides). La profundidad analizada correspondió a los 5 cm superiores del horizonte superficial. La propiedad física determinada fue la composición granulométrica (arcilla, limo total y arena total) y las propiedades químicas fueron pH, carbono oxidable (Cox), nitrógeno total (Nt), capacidad de intercambio catiónico (CIC), cationes de intercambio (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>), fósforo extractable (Pe) y conductividad eléctrica (CE). Este análisis comprendió tanto las muestras sin calentamiento (control) como las sometidas a distintas temperaturas. Las variables que presentaron similar comportamiento frente a las diferentes temperaturas de calentamiento analizadas, independientemente del material parental y las condiciones de uso del suelo, fueron Cox, pH, CE y CIC. El análisis estadístico permitió concluir que las variables edáficas que describieron el comportamiento de los suelos frente al calentamiento fueron el Cox, el pH, el Nt y la CIC. A 300 °C se registraron cambios estadísticamente significativos para los parámetros edáficos analizados con respecto al suelo control. A 500 °C estas modificaciones son complejas de revertir debido al colapso de la fracción inorgánica coloidal y la disminución del 90% de la fracción orgánica.

## ABSTRACT

*Although natural and controlled fires are common in natural environments of the Province of Córdoba (Argentina), the effects on the physical and chemical soil properties are not well known. Warming effects were studied in two representative soil parent materials located in the piedmont of the Sierra Chica, Córdoba, Argentina. The aim of this study was to quantify the changes caused by different heating temperatures (100 °C and 500 °C), under laboratory conditions, on physical and chemical properties of two soils with different granulometric compositions and anthropic uses. The soils were classified as Udic Haplustoll, fine loamy (alluvial soils) and Udic Argiustoll, fine silty (loessoides soils). The depth analyzed corresponded to the upper 5 cm of the surface horizon. The physical property was granulometric composition (clay, silt and sand content) and the chemical properties: pH, oxidizable carbon (Cox), total nitrogen (Nt), cation exchange capacity (CEC), exchangeable cations (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>), extractable phosphorus (Pe) and electrical conductivity (EC). These analyses included both unheated samples (control) and those heated at different temperatures. Cox, pH, EC and CEC showed similar behavior at the different heating temperatures, despite*

DOI: 10.3232/SJSS.2015.V5.N3.03

*the parent materials and the soil use conditions. Cox, pH, Nt and CEC could statistically explain the differences in edaphic properties at the temperatures analyzed. At 300 °C statistically significant differences were recorded for the analyzed soil parameters. At 500 °C, the temperature induced changes are difficult to reverse due to the inorganic colloidal fraction collapse and the decrease (90%) of the organic fraction.*

## RESUMO

*Os fogos naturais e controlados são frequentes nos ambientes naturais da província de Córdoba (Argentina), sendo a influência sobre as suas propriedades edáficas físicas e químicas pouco conhecida. Estudaram-se os efeitos do aquecimento nos horizontes superficiais de solos desenvolvidos a partir dos materiais parentais, representativos do ambiente geomorfológico Piedemonte Oriental da Serra Chica (Córdoba, Argentina). O objetivo foi quantificar as alterações provocadas por diferentes temperaturas de aquecimento (entre 100 °C e 500 °C) em condições laboratoriais, nas propriedades físicas e químicas de dois solos com diferente composição granulométrica e uso antrópico. Os solos classificavam-se como Haplustoll údico, textura franca fina (solos de aluvião), e Argiustoll údico, textura limosa fina (solos loessoides). A profundidade analisada correspondeu aos 5 cm superiores do horizonte superficial. A propriedade física determinada foi a composição granulométrica (argila, limo total e areia total) e as propriedades químicas foram o pH, carbono oxidável (Cox), azoto total (Nt), capacidade de troca catiónica (CTC), cátions de troca (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>), fósforo extraível (Pe) e condutividade eléctrica (CE). Esta análise incluiu tanto as amostras sem aquecimento (controlo) como as submetidas a diferentes temperaturas. As variáveis que apresentaram um comportamento semelhante face às diferentes temperaturas de aquecimento analisadas, independentemente do material parental e das condições de uso do solo, foram o Cox, pH, CE e a CTC. A análise estatística permitiu concluir que as variáveis edáficas que descreveram o comportamento dos solos face ao aquecimento foram o Cox, o pH, o Nt e a CTC. A 300 °C registaram-se alterações estatisticamente significativas para os parâmetros edáficos analisados relativamente ao solo controlo. A 500 °C estas modificações são difíceis de reverter devido ao colapso da fração inorgânica coloidal e à redução de 90% da fração orgânica.*

## 1. Introducción

Los fuegos naturales y los controlados por el hombre son frecuentes en los ambientes de llanuras y sierras de la provincia de Córdoba (Argentina), siendo uno de los mayores problemas ecológicos que sufren los bosques debido a su elevada frecuencia e intensidad. En el área de estudio, las estadísticas del año 2012 citan hasta doce eventos de incendios, afectando una superficie máxima de 3154 ha (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación 2013). El efecto más importante y significativo del fuego en bosques, matorrales y pastizales es la transferencia de calor desde la biomasa incendiada hacia el suelo. La cantidad y duración de esa transferencia de calor determina la severidad del impacto del fuego en las propiedades físicas, químicas y biológicas del sistema edáfico (DeBano et al. 1998; Neary et al. 2005; Urretaviscaya 2010).

Existen distintas estrategias para el estudio de los cambios que se producen en las variables físicas y químicas del suelo como consecuencia del fuego: una es el estudio in situ de una quema prescrita o de incendio natural, y otra es someter el suelo a un calentamiento controlado en laboratorio. La ventaja que tiene esta última estrategia es poder determinar los valores iniciales de los distintos parámetros físicos, químicos y biológicos medidos, que son los que corresponden a los suelos sin calentamiento, es decir, suelos control (Iglesias et al. 1997; Hepper et al. 2008; Urioste et al. 2009; Varela et al. 2010).

**PALABRAS CLAVE**  
Incendios forestales, Córdoba, Argentina, propiedades edáficas, ACP

**KEYWORDS**  
Forest fire, Córdoba, Argentina, edaphic properties, PCA

**PALAVRAS-CHAVE**  
Incendios florestais, Córdoba, Argentina, propriedades edáficas, ACP

Los eventos de fuego pueden tener diferentes impactos sobre las características químicas, físicas y biológicas de los suelos. Algunos autores describen estos impactos como positivos (Certini 2005; Gómez-Rey et al. 2013), mientras que otros señalan solamente efectos negativos (Zabala et al. 2010; Chen et al. 2010; Shakesby et al. 2013), lo cual crea controversias sobre el efecto del fuego en el suelo que dependen del punto de vista del análisis.

A partir de los estudios realizados por Heyward (1938) y hasta los análisis de Gómez-Rey et al. (2013), se puede concluir que la temperatura alcanzada en un incendio sólo tiene consecuencias en los primeros cinco centímetros del epipedón. Otros autores señalan que solamente los dos primeros centímetros de profundidad del horizonte superficial son afectados por el calentamiento debido a la baja conductividad térmica de los suelos (Badía et al. 2014).

El fuego altera el ciclo de nutrientes, ya que la combustión del mantillo y la materia orgánica incrementan la disponibilidad de algunos mientras otros son volatilizados (DeBano et al. 1998; González-Pérez et al. 2004). Los componentes biológicos resultan los más susceptibles al calentamiento, siendo afectados severamente a temperaturas en el rango de 100 °C y 150 °C; en la materia orgánica se registran cambios sustanciales a partir de los 300 °C y mayores temperaturas afectan la composición mineral y textural del suelo, que es la componente inorgánica del sistema (Sertsu y Sanchez 1978; Ghuman y Lal 1989; Ulery y Gram 1993; Iglesias et al. 1997; Ketterings et al. 2000).

La estructura, el contenido de materia orgánica y la composición química de los suelos puede ser alterada por la ceniza depositada, la mineralización de las fracciones orgánicas y, con el tiempo transcurrido después del evento, a través de una nueva composición florística (Dube 2009).

Los cambios físicos son atribuidos, en gran medida, a cambios químicos y mineralógicos producidos por el aumento de la temperatura

y la pérdida de materia orgánica (MO) (Úbeda 2001). Estas variaciones en la granulometría se refieren a una disminución en el contenido de la fracción arcilla y a un aumento significativo en el contenido de la fracción arena (Úbeda y Sala 1996; Afif y Oliveira 2006; Hepper et al. 2008).

El conocimiento e interpretación de los efectos que producen diferentes temperaturas sobre las propiedades de cada suelo en particular contribuye al conocimiento de la dinámica edáfica debido al impacto de la temperatura, siendo el estudio de estas modificaciones complejo de analizar durante un incendio forestal natural. De esta forma, se planteó el objetivo de cuantificar los cambios provocados en la granulometría y en las propiedades químicas de dos suelos con diferente composición litológica y uso antrópico, debido a la exposición a distintas temperaturas de calentamiento en el rango 100-500 °C bajo condiciones controladas de laboratorio.

## 2. Materiales y Métodos

### 2.1. Área de estudio

Se tomaron muestras compuestas de dos suelos y con diferente uso (cultivado y monte natural) ubicados en diferentes ambientes geomorfológicos correspondientes al Piedemonte Oriental de la Sierra Chica de Córdoba (Argentina), situados geográficamente entre las coordenadas 30° 55' 43" S y 64° 12' 34" O (Figura 1).

Los suelos bajo estudio corresponden a zonas climáticas transicionales entre el dominio semi-húmedo con tendencia al semi-seco. La temperatura mínima absoluta en invierno (julio) es de -6.2 °C y la máxima absoluta durante el verano (enero) es de 26.9 °C, con una temperatura media anual de 13-14 °C. Las precipitaciones en la zona oscilan entre 750 y 850 mm anuales, siendo el período estival el de máximas precipitaciones (noviembre-marzo).

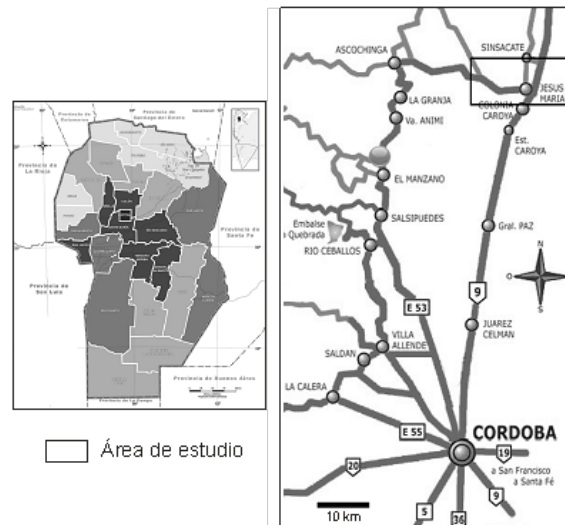


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio.

## 2.2. Selección de muestras

Los suelos fueron clasificados según el sistema americano Soil Taxonomy (Soil Survey Staff 2014) como Argiustoll údico, de textura limosa fina con cubierta loessoide, y Haplustoll údico, de textura franca fina ubicado en el ambiente de Derrames del río Ascochinga. Para cada suelo, con cubierta loessoide y aluvial, se delimitaron dos parcelas, una para cada uso de suelo, cultivado (SC) y monte (SM). En los suelos correspondientes a la zona de monte (SM), el muestreo se restringió a transectas delimitadas en las cercanías de los alambrados de los campos debido a la escasa representación aérea de la vegetación nativa en este ambiente del piedemonte. Estos suelos no se encontraron a lo largo de su historia bajo uso agrícola o ganadero y las especies más comunes son *Celtis tala* (tala), *Lithraea ternifolia* (molle), *Condalia microphylla* (piquillín) y *Acacia caven* (aromito), entre otras. El uso de la tierra en las parcelas de SC es predominantemente agrícola, con rotación de cultivos maíz-soja que se realiza desde el ciclo 1996-1997 y que se mantiene hasta la actualidad. Se maneja el suelo con labranza cero, control de malezas con herbicidas y barbecho químico después de la cosecha (Sacchi 2001). En este uso del suelo se definieron parcelas rectangulares de 120 m<sup>2</sup>

de superficie, atravesadas por dos transectas definidas de manera diagonal a la pendiente general del sitio de estudio. La orientación de las mismas es para minimizar los efectos de la erosión hídrica característica del área. En cada transecta de los SM y SC, se tomaron 15 submuestras con el fin de obtener una muestra compuesta. La extracción de cada submuestra fue realizada cada 2 m, eliminando de esta manera un posible comportamiento sectorizado de las variables edáficas (Kachanoski et al. 1985; Anderson y Cassel 1986; Bachmeier y Buffa 1992; Sacchi 2001).

## 2.3. Análisis de laboratorio

Las muestras extraídas fueron secadas al aire y tamizadas por malla de 2 mm. El calentamiento controlado en laboratorio se realizó en cápsulas de porcelana de 10 cm de diámetro en las que se colocó una masa de suelo que no superaba los 4 cm de espesor, para mayor homogeneidad en el calentamiento. Las temperaturas de calentamiento fueron 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C y 500 °C, y se realizaron en un horno eléctrico (Indef modelo 134) manteniendo durante 5 minutos la temperatura máxima. En las muestras de suelos sin calentar (control) y las sometidas a distintas temperaturas se

### 3. Resultados y discusión

determinó: pH (relación 1:2,5 suelo:agua), carbono orgánico oxidable (Cox) por el método de Walkey y Black (1934), nitrógeno total (Nt) por el método de Kjeldahl (Bremner y Mulvaney 1982), capacidad de intercambio catiónico (CIC) por extracción con solución de acetato de amonio 1 mol L<sup>-1</sup> ajustado a pH 7,0 (Page et al. 1982), cationes intercambiables, calcio (Ca<sup>+2</sup>) y magnesio (Mg<sup>+2</sup>) por quelatometría, y potasio (K<sup>+</sup>) y sodio (Na<sup>+</sup>) por fometría de llama, fósforo extractable (Pe) por el método de Bray y Kurtz (1945) y conductividad eléctrica (CE) (relación 1:2,5 suelo:agua). La propiedad física determinada fue la granulometría, arcilla (< 2 µ), limo total (2-50 µ) y arena total (50-2000 µ), expresadas en % v/v, para lo cual se utilizó el analizador de partículas por difracción laser Horiba LA-950 (Horiba Instruments Inc. 2014). Las mismas fueron determinadas en las muestras de control y en las de 200 °C y 500 °C, debido a que en dichas temperaturas se registraron las variaciones más importantes en las propiedades químicas analizadas. Los intervalos de calificación de pH fueron los establecidos según el USDA (Porta et al. 2003). Todas las determinaciones fueron realizadas por triplicado.

#### 2.4. Análisis estadístico

El análisis estadístico de los variables físicas y químicas definidas se realizó con el programa Infostat/Profesional versión 2007 (Grupo Infostat 2007). Se realizó Análisis de Componentes Principales (ACP) y Análisis Multivariado de Correlación de Pearson para verificar la existencia de diferencias entre los parámetros experimentales medidos y las distintas temperaturas de calentamiento de las muestras.

#### 3.1. Caracterización física: composición granulométrica

En el suelo loessoide, tanto en las situaciones de uso de SC y de SM, se produjeron disminuciones significativas ( $p < 0,05$ ) en la fracción del tamaño de las arcillas a partir de los 200 °C, no detectándose dicha fracción a una temperatura de 500 °C. En el SC, la disminución de dicha fracción granulométrica a 200 °C alcanzó un porcentaje del 98%, mientras que en el SM la disminución fue del 52%. La fracción limo incrementó el contenido de manera significativa a los 200 °C y se produjo una disminución también significativa a los 500 °C, mientras que el contenido de la fracción arena se incrementó de manera significativa con el aumento de la temperatura (Tabla 1). La disminución del contenido de arcillas y el incremento de la fracción arena puede ser debido a la agregación de partículas ocasionada por el aumento de la temperatura de calentamiento (Bemetrioux et al. 1960; Giovannini 1994; Úbeda 2001; Terefe et al. 2008; Capulín et al. 2009). La aglutinación o fusión de partículas de arcilla generando partículas de mayor tamaño es el resultado de la modificación térmica del hierro y de los aluminosilicatos (Giovannini y Lucchesi 1997; Hepper et al. 2008). En el suelo aluvial, a diferencia del suelo loessoide, la fracción arcilla no registró un aumento estadísticamente significativo a los 200 °C en SC. Sin embargo, en SM el incremento a 200 °C de dicha fracción fue estadísticamente significativo. La fracción limo experimentó un incremento del 29% en SC y del 21% en SM con el aumento de la temperatura en el gradiente analizado. La fracción arena presentó una disminución entre el suelo control y el sometido a temperaturas de 500 °C del 59,5% en SC y del 63% en el SM (Tabla 1). La disminución de esta fracción puede estar relacionada con la ruptura de los feldespatos y otros minerales del suelo por acción del calentamiento (thermal shock), formándose partículas de menor tamaño como lo evidencia el aumento de las fracciones arcilla y limo. El comportamiento fue contrario para el suelo loessoide, donde se observó una disminución de la fracción arcilla a partir del efecto del calentamiento. Sin embargo,

en ambos tipos de suelo, loessoide y aluvial, se incrementó el contenido de la fracción limo a causa de las mayores temperaturas, lo cual expone a los suelos quemados a mayores

riesgos de erosión por el mayor contenido de fracciones granulométricas que no desarrollan cargas superficiales y, por lo tanto, menor posibilidad de la formación de microagregados.

**Tabla 1.** Fracción granulométrica (% v/v) de suelos loessoide y aluvial calentados a diferentes temperaturas

	Manejo	Suelo loessoide			Suelo aluvial		
		Control	200 °C	500 °C	Control	200 °C	500 °C
<b>Arcilla (&lt; 2 µm)</b>	SC	23,92	0,51a	nd	0,27	0,31	nd
	SM	7,46	3,54b	nd	0,03	0,16a	nd
<b>Limo (2-50 µm)</b>	SC	75,99	95,96d	82,62c	57,67	74,33b	74,20a
	SM	84,89	93,38d	86,18c	62,58	64,10a	75,58b
<b>Arena (50-2000 µm)</b>	SC	0,09	3,53a	17,38b	42,06	25,36c	25,80d
	SM	7,65	3,08a	13,82b	37,39	35,74d	24,42c

nd: no detectado; letras distintas indican diferencias significativas entre el control y cada una de las temperaturas ( $p < 0,05$ ).

### 3.2. Caracterización química

En las **Tablas 2 y 3** se presentan los datos analíticos de las diferentes variables edáficas analizadas en el rango de temperaturas entre control (sin calentamiento) y 500 °C para los diferentes materiales parentales estudiados, loessoide y aluvial.

#### • Efecto de la temperatura en el pH

El valor del pH tanto en el suelo loessoide como en el aluvial, para ambos usos (SC y SM), experimentó un incremento significativo ( $p < 0,05$ ) a partir de los 300 °C, obteniéndose los máximos valores a los 400 °C (**Tablas 2 y 3**). La variación de pH está directamente relacionada con la intensidad del calentamiento, presentado valores de pHs neutros y/o ligeramente ácidos para los suelos de control y pHs ligeramente alcalinos y/o básicos a temperaturas de calentamiento de 500 °C. En los suelos analizados, a temperaturas menores de 300 °C donde la combustión de la materia orgánica es incompleta, las variaciones de pH no fueron significativas (Sertsu y Sánchez 1978; Giovanini et al. 1990), debido a que la cantidad

y la composición de las cenizas generadas no son capaces de producir modificaciones en el pH del suelo (Owensby y Wyrill 1973). Por el contrario, a temperaturas mayores de 300 °C donde la combustión se incrementa, los valores de pH aumentaron en casi dos unidades independientemente del tipo de suelo y manejo estudiados. Ulery y Gram (1993) encontraron que en la zona superficial de un suelo se incrementó en tres unidades el valor de pH inmediatamente después de un incendio, probablemente debido a la producción de óxidos de  $K^+$  y  $Na^+$ , hidróxidos y carbonatos, y a la desnaturalización de los ácidos orgánicos que ocurre a partir de esta temperatura. Sin embargo, el incremento más significativo tiene lugar a las temperaturas de 400 °C y 500 °C, rango en el cual ocurre la combustión completa de los restos vegetales y la consecuente liberación de bases que, además, genera un incremento en la saturación de bases (Arocena y Opio 2003).

**Tabla 2.** Suelo loessoid: propiedades químicas del suelo cultivado (SC) y de monte (SM) calentados a diferentes temperaturas (valores promedios)

Variable	Manejo	Control	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C
pH	SC	6,47	6,17	6,02	7,81a	8,50c	8,18b
	SM	7,34	7,10b	6,68a	8,48c	9,04e	8,86d
Cox (g kg <sup>-1</sup> )	SC	20,8	21,5	13,6	6,8c	4,4b	2,8a
	SM	30,3	24,9	17,6d	9,6c	7,3b	3,2a
Nt (g kg <sup>-1</sup> )	SC	2,2	2,3	2,1	1,6c	1,2b	0,5a
	SM	4,0	4,0	3,3	2,8c	1,8b	0,6a
CIC (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	SC	29,37	23,66	25,77	21,22b	22,13c	19,13a
	SM	32,95	32,29	27,86c	28,76d	27,23b	23,33a
(Ca <sup>+2</sup> + Mg <sup>+2</sup> ) (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	SC	16,45	17,00	18,75	15,35	14,75	11,98
	SM	24,85	26,73	27,88	26,10	22,43	21,70
(Na <sup>+</sup> + K <sup>+</sup> ) (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	SC	2,27	2,15	2,59	2,34	2,89	3,38
	SM	2,72	2,59	2,85	3,06	3,06	3,49
Pe (mg kg <sup>-1</sup> )	SC	31,8	43,7	112,7b	108,2a	94,7	53,8
	SM	99,1	102,0	144,9b	119,3a	115,3	86,9
CE (dS m <sup>-1</sup> )	SC	0,14	0,29a	1,26e	0,73b	0,82c	0,89d
	SM	0,30	0,47a	1,12e	0,92d	0,87b	0,89c

Letras distintas indican diferencias significativas entre el control y cada una de las temperaturas (p < 0,05).

**Tabla 3.** Suelo aluvial: propiedades químicas del suelo cultivado (SC) y de monte (SM) calentados a diferentes temperaturas (valores promedios)

Variable	Manejo	Control	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C
pH	SC	6,62	6,33b	6,14a	8,23c	8,95e	8,70d
	SM	6,52	6,27	6,15	8,08a	8,88c	8,82b
Cox (g kg <sup>-1</sup> )	SC	17,0	16,8	8,7d	3,0c	1,0a	2,9b
	SM	21,1	21,0	14,4	5,7c	4,9b	1,4a
Nt (g kg <sup>-1</sup> )	SC	1,6	1,5	1,6	1,3	0,7b	0,3a
	SM	2,5	2,5	2,4	1,8	1,1b	0,5a
CIC (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	SC	21,02	21,50	18,37	14,1c	12,78b	11,59a
	SM	24,72	23,41	18,35	17,23b	14,94a	17,49c
Ca <sup>+2</sup> + Mg <sup>+2</sup> (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	SC	11,53	11,18	14,08	11,78	11,78	7,75
	SM	14,13	13,13	13,98	13,53	14,05	11,35
Na <sup>+</sup> + K <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	SC	1,35	1,44	1,63	1,50	1,57	1,57
	SM	2,21	2,02	2,14	1,95	1,99	1,95
Pe (mg kg <sup>-1</sup> )	SC	29,15	36,60	107,1d	106,3c	95,4a	97,95b
	SM	110,00	125,20	143,80	140,10	134,30	111,70
CE (dS m <sup>-1</sup> )	SC	0,01	0,27a	0,87e	0,56b	0,63d	0,61c
	SM	0,17	0,29	0,83d	0,77b	0,67a	0,82c

Letras distintas indican diferencias significativas entre el control y cada una de las temperaturas (p < 0,05).

#### • Efecto de la temperatura en Cox

En el suelo loessoides, los contenidos de Cox para ambos usos (SC y SM) disminuyeron significativamente con el calentamiento, a partir de los 200 °C en el SM y de los 300 °C en los SC. En el suelo aluvial el Cox presentó una disminución significativa a partir de los 200 °C en el SC, mientras que en el SM la disminución se observó a partir de los 300 °C (Tablas 3 y 4). La pérdida en el contenido de Cox es ocasionada por la combustión de la MO del suelo (Smith et al. 2001; Hepper et al. 2008). A partir de los 200 °C y 300 °C, según el tipo de suelo y manejo, estas diferencias son estadísticamente significativas (Certini 2005) y a partir de los 500 °C se producen pérdidas aproximadas entre 80% y 90% de Cox debido a la combustión casi total de la MO, afectándose también la composición textural del suelo (Giovaninni 1994; Iglesias et al. 1997; Ketterings et al. 2000; Afif y Oliveira 2006). Para ambos suelos y usos, la relación temperatura y composición granulométrica también se establece con la fracción coloidal inorgánica, la cual no es detectada a los 500 °C (Tabla 1). Para ambos suelos, se observa una disminución estadísticamente significativa del Cox en los suelos cultivados (SC) respecto a los suelos de monte (SM) al aumentar la temperatura de calentamiento, lo que indicaría una disminución de la estabilidad de la MO cuando el suelo cambia de uso aunque el manejo sea con siembra directa.

#### • Efecto de la temperatura en Nt

El contenido de Nt presenta un comportamiento similar al Cox debido a que el Nt es mayoritariamente N orgánico. Para ambos suelos y usos, el contenido de Nt registró una disminución a partir de los 300 °C que se hizo estadísticamente significativa ( $p < 0,05$ ) en la mayoría de los casos estudiados a partir de los 400 °C (Tablas 2 y 3). En todas las muestras estudiadas, la variación siempre fue mayor en los suelos cultivados, indicando la mayor fragilidad del recurso suelo. La disminución del contenido de Nt que ocurre a causa del aumento de las temperaturas de calentamiento puede ser debida, entre otras causas, a la volatilización del nitrógeno en forma de  $N_2$  y/o su transformación en formas más complejas (Fisher y Binkley 2000; Úbeda 2001). En el suelo loessoides, incendios

de menor intensidad podrían causar pérdidas más importantes en el contenido de Nt que en el suelo aluvial. Debido a que una proporción del nitrógeno orgánico resiste la descomposición, a fuegos de menor intensidad el nitrógeno que no es completamente volatilizado permanece como parte de los combustibles no quemados o es convertido a la forma más disponible como  $NO_3^-$  o  $NH_4^+$ , permaneciendo en el suelo (Certini 2005; Urretavizcaya 2010). El  $NH_4^+$  es un producto directo de la combustión, mientras que el  $NO_3^-$  se produce a partir del  $NH_4^+$  después de algunas semanas o meses de los eventos de incendios como resultado de reacciones químicas y/o bioquímicas de oxidación y/o nitrificación (Covington y Sackett 1992). Cuanto más intenso es el calentamiento mayor es la pérdida de Nt, a 500 °C la pérdida osciló entre un 78% y un 85% del contenido de nitrógeno existente en el suelo. La cantidad de nitrógeno que es perdido durante la combustión se correlaciona positivamente con el contenido de MO consumida ( $r = 0,854$  y  $p < 0,05$ ). El destino de la MO y el Nt es importante por su influencia directa sobre las propiedades físicas y químicas, las que están relacionadas con la magnitud del calentamiento del suelo.

#### • Efecto de la temperatura en CIC y cationes intercambiables

Los valores de CIC en ambos usos del suelo loessoides disminuyeron con el aumento de la temperatura, y la disminución estadísticamente significativa ( $p < 0,05$ ) fue a partir de los 300 °C en el SC y a partir de los 200 °C en el SM (Tabla 2). En el suelo aluvial, la CIC mostró una disminución significativa ( $p < 0,05$ ) a partir de los 300 °C, tanto en SC como SM (Tabla 3). La disminución en la capacidad de intercambiar cationes con el incremento de la temperatura puede estar relacionado con la disminución de las fracciones granulométricas más finas, particularmente arcilla (Tabla 1), y con las disminuciones del contenido de Cox (Tablas 2 y 3), los cuales aportan la mayor cantidad de sitios de intercambio en los suelos (Iglesias et al. 1998; Hepper et al. 2008; Cancelo-González et al. 2012). En el suelo loessoides, la suma de cationes ( $Ca^{+2} + Mg^{+2}$ ) en el SC y el SM aumenta hasta los 200 °C, lo cual puede ser debido a la combustión de material orgánico y liberación de



sales solubles. A partir de los 500 °C la suma de estos cationes disminuye, probablemente debido a que el método de extracción para su determinación no logra solubilizar los fosfatos de calcio y magnesio (Iglesias et al. 1998). El contenido de ( $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ) tiene un comportamiento similar, probablemente por la misma causa. En general, a bajas temperaturas de calentamiento la concentración de los cationes bivalentes aumenta y disminuye la concentración de los monovalentes, mientras que el comportamiento es inverso a elevadas temperaturas de calentamiento. En el suelo aluvial, el comportamiento de los cationes fue diferente a lo observado en el suelo loessoides. El contenido de ( $\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2}$ ) disminuyó inicialmente a 100 °C, incrementándose a 200 °C. El contenido de los cationes monovalentes en el SC se incrementó hasta 200 °C, y a temperaturas superiores no se observó modificación, mientras que en el SM la temperatura provocó una disminución en el contenido de ( $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ). La disminución en el contenido de ( $\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2}$ ) en ambos suelos se encuentra relacionada con la formación de compuestos insolubles como fosfatos, al valor de pH que alcanza el suelo a esa temperatura (> 8,0) (Iglesias et al. 1998).

#### • Efecto de la temperatura en Pe

En el suelo loessoides, el Pe tiene un comportamiento similar frente al calentamiento para ambos usos (SC y SM), observándose un incremento estadísticamente significativo entre los 200 °C y 300 °C. A partir de los 400 °C y 500 °C, las diferencias con el suelo control no son significativas estadísticamente, registrándose contenidos de fósforo inferiores a las temperaturas de 200 °C y 300 °C (Tabla 2). En el caso del suelo aluvial (Tabla 3), a medida que se incrementa la temperatura de calentamiento aumentan los contenidos de Pe, y solamente en el SC el incremento es significativo a partir de la temperatura de 200 °C ( $p < 0,05$ ). El incremento en el contenido de Pe que es particularmente importante a partir de los 200 °C, sobre todo en los SC de ambos tipos de materiales parentales, puede ser atribuido principalmente a la mineralización del fósforo orgánico con el aumento de la temperatura (Afif y Oliveira 2006). El efecto del calentamiento a

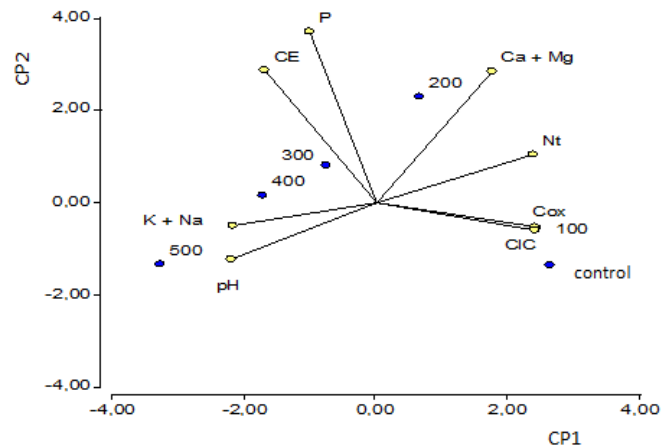
bajas temperaturas transforma la reserva de fósforo orgánicos a ortofosfatos (Cade-Menun et al. 2000), que corresponde a la forma de fósforo disponible para la biota. En la medida que la temperatura de calentamiento se incrementa a 400 °C, el Pe disminuye probablemente debido a su inmovilización temporal por la formación de fosfatos de calcio y/o magnesio (Amiotti 2005). Cuando la temperatura de calentamiento se incrementa, también se incrementa el valor del pH; por eso el Pe se encuentra menos disponible, pero es un problema referido a la variable edáfica del pH.

#### • Efecto de la temperatura en CE

En los valores de la CE de los suelos estudiados, se observó un máximo incremento a una temperatura de calentamiento de 200 °C a partir de la cual los valores de CE disminuyen, manteniéndose mayores a los correspondientes a suelos controles (Badía y Martí 2003; Terefe et al. 2008) (Tablas 2 y 3). El incremento en los valores de CE puede ocurrir como resultado de la liberación de iones inorgánicos, óxidos y/o carbonatos originados por la combustión de la MO que aumenta la concentración de las sales contenidas en la solución del suelo (Kutiel et al. 1990; Andreu et al. 1996). Sin embargo, en los suelos estudiados, para ambos usos SC y SM, el contenido de sales no alcanza los valores críticos ( $\text{CE} > 4 \text{ dS/m}$ ) como para considerar que el calentamiento pueda haber producido efectos salinos indeseados.

### 3.3. Discusión general: Análisis estadístico

Se utilizó un método de estadística multivariada de tipo exploratoria denominada Análisis de Componentes Principales (ACP) para determinar la existencia de diferencias entre los parámetros experimentales medidos y las distintas temperaturas de calentamiento. Con la utilización de dos componentes principales (CP) se logró explicar el 94% de la variabilidad existente, la CP1 explicó el 69% y la CP2 el 25% restante. Los resultados alcanzados a través del uso del ACP se muestran como gráficos de dispersión de las muestras de suelo de los distintos tratamientos y las variables (Figura 2).



**Figura 2.** Distribución ortogonal del Análisis de Componentes Principales (ACP) para todos los suelos, analizados a las distintas temperaturas de exposición. CP1 y CP2 explican el 94% de la variabilidad total.

En la **Figura 2** se muestra que las menores temperaturas (control y 100 °C) están asociadas a un incremento en los contenidos de Cox, CIC y Nt, como así también a una disminución de los valores de pH y, en general, a menores contenidos de los cationes monovalentes ( $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ). Las temperaturas de 200 °C y 300 °C están asociadas a incrementos significativos de los valores de CE y Pe. Las temperaturas a partir de los 400 °C se asocian a valores elevados de pH y de contenido de ( $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ) (**Figura 2**). En función de la correlación estadística entre las variables analizadas y su posible selección como indicadores del comportamiento de los suelos frente a las temperaturas de calentamiento, los contenidos de Cox y CIC mostraron una elevada correlación positiva, siendo posible seleccionar al Cox para explicar la variabilidad de los sistemas edáficos estudiados por su sencillez en la determinación de laboratorio. La determinación de CE, si bien se correlaciona positivamente con el contenido de Pe, es una variable de sencilla determinación que puede ser medida en el mismo extracto de pH y que además es sensible para explicar la ocurrencia de incendios de baja intensidad, en los casos que la determinación de pH no sufre grandes modificaciones. La determinación de ( $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ) tiene correlación positiva con el pH por lo

que la determinación de este último podría ser seleccionada como variable indicadora por su simpleza en la determinación analítica.

Además, se realizó un Análisis Multivariado de Correlación de Pearson de todas las variables químicas estudiadas. Las variables no mostraron valores de sesgo estandarizado y de curtosis estandarizada fuera del rango esperado (-2 a +2), lo cual determina que las muestras presentan una distribución normal. Las variables químicas con altos valores de correlación con el parámetro temperatura ( $p < 0,05$ ) fueron: CIC ( $r = -0,56$ ), Cox ( $r = -0,91$ ), Nt ( $r = -0,73$ ) y pH ( $r = 0,82$ ).

Al analizar como variable dependiente a la temperatura (T) y variables independientes seleccionadas a partir de los análisis de CP y multivariados, como pH, Nt, Cox, y CIC, se definió la siguiente ecuación del modelo ajustado:

$$T \text{ (}^\circ\text{C)} = 11,5762 + 44,997 * \text{pH} - 66,9719 * \text{Nt} - 155,896 * \text{Cox} + 4,30729 * \text{CIC}$$

$$R^2 = 88,0632\%$$

$$R^2 \text{ (ajustado para g.l.)} = 85,5501\%$$

## 4. Conclusiones

Los suelos desarrollados a partir de materiales parentales loessoides y aluviales presentaron variables físicas (granulometría) y químicas (Cox, pH, CE y CIC) que mostraron un patrón de comportamiento similar frente al rango de temperaturas de calentamiento entre 100 °C y 500 °C. A la temperatura de calentamiento de 300 °C estas variables presentaron diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) con respecto al suelo control.

A la temperatura de 200 °C comienza el cambio inducido por el calentamiento sobre la composición granulométrica del horizonte superficial, lo cual en su ambiente natural podría afectar las condiciones hidrológicas y de erosionabilidad del suelo (dinámica de procesos post-incendios). Los cambios inducidos a la temperatura de calentamiento de 500 °C pueden resultar difíciles de revertir, debido a que se produce el colapso de la fracción inorgánica coloidal (arcillas) y la fracción orgánica (Cox) disminuye ~ 90%. A esta temperatura se modifica en forma significativa el componente de la fase sólida donde se desarrollan fundamentalmente los procesos de adsorción e intercambio iónico, como así también todos los procesos relacionados a la fertilidad física, química y biológica de los suelos. El análisis estadístico permitió concluir que las variables edáficas que caracterizaron el comportamiento de los suelos frente al calentamiento resultaron ser pH, Nt, Cox y CIC.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Afif Khouri E, Oliveira Prendes J. 2006. Efectos del fuego prescrito sobre matorral en las propiedades del suelo. *Investigaciones Agrarias: Sistemas Recursos Forestales* 15(3):262-270.
- Amiotti N, Bravo O, Giorgetti H, Montenegro O, Rodríguez G. 2005. Efectos del fuego controlado sobre propiedades del suelo en pastizales naturales del sur bonaerense. *Revista Argentina de Producción Animal* 25(1):403-404.
- Anderson S, Cassel D. 1986. Statistical and autoregressive analysis of soil physical properties of Portsmouth Sandy loam. *Soil Science* 50:1096-1104.
- Andreu V, Rubio J, Corteza J, Cerni R. 1996. Post fire effects on soil properties and nutrients losses. *International Journal of Wildland Fire* 6:53-58.
- Arocena J, Opio C. 2003. Prescribed fire – induced changes in properties of sub-boreal forest soils. *Geoderma* 113:1-16.
- Bachmeier O, Buffa E. 1992. Variabilidad especial de suelos bajo vegetación de *Prosopis* sp. *Turrialba* 42(3):365-370.
- Badía Villas D, González Pérez J, Aznar J, Arjona Gracia B, Martí Dalmau C. 2014. Changes in water repellency, aggregation and organic matter of a mollic horizon burned in laboratory: Soil depth affected by fire. *Geoderma* 213:400-407.
- Badía D, Martí C. 2003. Plant ash and heat intensity effects on chemical and physical properties of two contrasting soils. *Arid Land Research and Management* 17:23-41.
- Bemetréux R, Le Borgne E, Monnier G. 1960. Evolution de certaines propriétés du sol sous l'influence du chauffage. *Academia de Ciencias Paris* 251:2753-2755.
- Bray B, Kurtz L. 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorous in soils. *Soil Science* 59:39-45.
- Bremmer J, Mulvaney C. 1982. Nitrogen total. In: Page A, Miller R, editors. *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. Madison, Wisconsin: American Society of Agronomy, Inc. p. 595-624.
- Cade-Menun B, Berch S, Preston C, Lavkulich L. 2000. Phosphorus forms and related soil chemistry of Podzolic soils on northern Vancouver Island. *Canadian Journal of Forest Research* 30:1726-1741.

- Cancelo-González J, Rial-Rivas M, Barros N, Díaz-Fierros F. 2012. Assessment of the impact of soil heating on soil cations using the degree hours method. Spanish Journal of Soil Science (3):32-44.
- Capulín Grande J, Mohedano Caballero L, Razo Zarate R. 2009. Cambios en el suelo y vegetación de un bosque de pino afectado por incendio. Revista Terra Latinoamericana 28:79-87.
- Certini G. 2005. Effects of fire on properties of forest soils: a review. Oecologia 143:1-10.
- Chen S, Peng S, Chen B, Chen D, Cheng J. 2010. Effects of fire disturbance on the soil physical and chemical properties and vegetation of *Pinus massoniana* forest in south subtropical area. Acta Ecologica Sinica 30:184-189.
- Covington W, Sackett S. 1992. Soil mineral nitrogen changes following prescribed burning in ponderosa pine. Forest Ecology and Management 54:175-191.
- DeBano L, Neary D, Folliott P. 1998. Fire's effects on ecosystems. New York: John Wiley and Sons. 333 p.
- Dube P. 2009. Linking fire and climate: interactions with land use, vegetation and soil. Environmental Sustainability 1(2):161-169.
- Fisher R, Binkley D. 2000. Ecology and Management of Forest Soils. New York: John Wiley and Sons. 489 p.
- Ghuman B, Lal R. 1989. Soil temperature effects of biomass burning in windrows after clearing a tropical rainforest. Field Crops Research 22:1-10.
- Giovannini G. 1994. The effect of fire on soil quality. In: Rubio J, Calvo A, editors. Soil degradation and desertification in Mediterranean environments. Logroño: Geofoma Ediciones. p. 9-12.
- Giovannini G, Lucchesi S. 1997. Modifications induced in soil physico-chemical parameters by experimental fires at different intensities. Soil Science 162:479-486.
- Giovannini G, Lucchesi S, Giachetti M. 1990. Effects of heating on chemical parameters related to soil fertility and plant growth. Soil Science 149(6):344-350.
- Gómez-Rey M, Couto-Vázquez S, García-Marco S, González-Prieto S. 2013. Impact of fire and post-fire management techniques on soil chemical properties. Geoderma 195-196:155-164.
- González-Pérez J, González-Vila F, Almendros G, Knicker H. 2004. The effect of fire on soil organic matter-a review. Environment International 30:855-870.
- Grupo InfoStat. 2007. InfoStat/Profesional versión 2007. Universidad Nacional de Córdoba. Facultad Ciencias Agrarias. Córdoba, Argentina. Disponible en: <http://www.infostat.com.ar>.
- Hepper E, Urioste A, Belmonte V, Buschiazzo D. 2008. Temperaturas de quema y propiedades físicas y químicas de suelos de la Región Semiárida Pampeana Central. Ciencia del Suelo 26(1):29-34.
- Heyward F. 1938. Soil temperatures during forest fires in the longleaf pine forest. Journal of Forestry 36:478-491.
- Horiba Instruments Inc. 2014. A Guidebook to Particle Size Analysis (Internet). Available from: [http://www.horiba.com/fileadmin/uploads/Scientific/eMag/PSA/Guidebook/pdf/PSA\\_Guidebook.pdf](http://www.horiba.com/fileadmin/uploads/Scientific/eMag/PSA/Guidebook/pdf/PSA_Guidebook.pdf) (accessed 2015-07-16).
- Iglesias T, Cala V, González J. 1997. Mineralogical and chemical modifications in soils affected by a forest fire in the Mediterranean area. The Science of the Total Environment 204:89-96.
- Iglesias T, Cala V, Walter I, González J. 1998. Efectos de la temperatura y vegetación en suelos calentados en condiciones controladas de laboratorio. Ecología 12:105-111.
- Kachanoski R, Rolston D, Jong E. 1985. Spatial and spectral relationships of soil properties and microtopography. Soil Science 49:804-811.
- Ketterings Q, Bigham J, Laperche V. 2000. Changes in soil mineralogy and texture caused by slash and burn fires in Sumatra, Indonesia. Soil Science Society of America Journal 64:1108-1117.
- Kutiel P, Naveh Z, Kutiel H. 1990. The effect of a wildfire on soil nutrients and vegetation in an *aleppo pine* forest on Mount Carmel, Israel. In: Goldammer J, Jenkins M, editors. Fire and Ecosystem dynamics. The Netherlands: SPB Academic Publishing. p. 85-94.
- Neary D, Ryan K, DeBano L. 2005. Wildland fire in ecosystems: effects of fire on soils and water. Rocky Mountain Research Station: USDA Forests Service. p. 1-17.
- Owensby C, Wyrill J. 1973. Effects of range burning on Kansas flint hill soils. Range Management 26:185-188.
- Page A, Millar R, Keney D. 1982. Methods of soil analysis. Part 2. Agronomy Monog. 9. Madison, Wisconsin: ASA&SSSA.
- Porta Casanellas J, López-Acevedo Reguerín M, Roquero de Laburu C. 2003. Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente. 3ª edición. Madrid, España: Ediciones Mundi-Prensa. p. 251-270.
- Sacchi G. 2001. Dinámica de erosión hídrica y de degradación física y química de suelos en las cuencas de los ríos Santa Catalina y Ascochinga. Córdoba, Argentina. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina.

- Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. 2013. Estadística de incendios forestales 2012. Buenos Aires. Argentina. Disponible en: <http://www.ambiente.gov.ar/archivos/web/PNEF/file/Incendios%202012%20corregido/Documento%20Completo.pdf>.
- Sertsu S, Sánchez P. 1978. Effects of heating on some changes in soil properties in relation to an Ethiopian land management practice. *Soil Science Society of America Journal* 42(4):940-944.
- Shakesby R, Bento C, Ferreira C, Ferreira A, Stoof C, Urbanek E, Walsh R. 2013. Impacts of prescribed fire on soil loss and soil quality: An assessment based on an experimentally-burned catchment in central Portugal. *Catena* 128:278-293.
- Smith S, Newman S, Garrett P, Leeds J. 2001. Differential effects of surface and peat fire on soil constituents in a degraded wetland of the Northern Florida Everglades. *Journal of Environmental Quality* 30:1998-2005.
- Soil Survey Staff. 2014. Keys to Soil Taxonomy. 12th ed. Washington, DC: USDA-NRCS.
- Terefe T, Mariscal-Sancho I, Peregrina F, Espejo R. 2008. Influence of heating on various properties of six Mediterranean soils. A laboratory study. *Geoderma* 143:273-280.
- Úbeda X. 2001. Influencia de la intensidad de quemado sobre algunas propiedades del suelo después de un incendio forestal. *Edafología* 8:41-49.
- Úbeda X, Sala M. 1996. Cambios en la física del suelo e incremento de la escorrentía y la erosión tras un incendio forestal. En: d'Anglade G, Pagés J, editores. *Actas de la IV Reunión de Geomorfología*. O Castro, A Coruña, España: Sociedad Española de Geomorfología. p. 559-572.
- Ulery A, Graham R. 1993. Forest fire effects on soil color and texture. *Soil Science Society of America Journal* 57:135-140.
- Urioste A, Hepper E, Belmonte V, Buschiazzo D. 2009. Fracciones de fósforo en suelos del Caldenal Pampeano expuestos a distintas temperaturas de quema. *Ciencia del Suelo* 27(2):1-7.
- Urretavizcaya M. 2010. Propiedades del suelo en bosques quemados de *Austrocedrus chilensis* en Patagonia, Argentina. *Bosque* 31(2):140-149.
- Varela M, Benito E, Keizer J. 2010. Effects of wildfire and laboratory heating on soil aggregate stability of pine forests in Galicia: The role of lithology, soil organic matter content and water repellency. *Catena* 83:127-134.
- Walkley A, Black I. 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.
- Zabala L, Granged A, Jordán A, Bárcenas-Moreno G. 2010. Effect of burning temperature on water repellency and aggregate stability in forest soils under laboratory conditions. *Geoderma* 158:366-374.