

PROCESOS PEDOGENÉTICOS EN UNA SECUENCIA DE SUELOS DESARROLLADOS EN CENIZAS VOLCÁNICAS EN EL NOROESTE DE NEUQUÉN, ARGENTINA

PATRICIA, BROQUEN*¹; ADRIANA SUÁREZ¹; JORGE LUIS GIRARDIN¹ & JUAN CARLOS PERCAZ²

Recibido: 25-10-13

Recibido con revisiones: 27-09-13

Aceptado: 01-10-13

RESUMEN

Se realizó una investigación para estudiar las fracciones de aluminio, la acumulación de Materia Orgánica y su influencia sobre las características y procesos pedogenéticos en suelos derivados de cenizas volcánicas, región Andinopatagónica, noroeste de Neuquén, Argentina. Se seleccionaron cinco sitios en una climo-biosecuencia, desde el bosque de *Nothofagus* con régimen de humedad del suelo údico hasta la estepa subarbutiva-graminosa con régimen xérico. Las características morfológicas muestran suelos jóvenes con propiedades ándicas, epipedón, mólico y horizonte cámbico. La densidad aparente fue mayor a lo esperado para suelos volcánicos (de 0,90 Mg m⁻³ bajo bosque de *Nothofagus* y régimen údico a 1,3 Mg m⁻³ bajo estepa subarbutiva-graminosa y régimen xérico). Esta variación se relacionó significativamente con el contenido de carbono orgánico ($R^2 = 0,81$, $p < 0,0001$). La acidez de los suelos es de moderadamente ácida a neutra y su variación fue explicada significativamente por el pH (NaF) y el carbono orgánico en casi un 40% ($R^2 = 0,39$, $p < 0,005$). Esto muestra que la acidez del suelo se relaciona con la actividad del Al y el contenido de Materia Orgánica, más que con el contenido en bases. En todos los casos el pH (H₂O) fue mayor que el valor crítico de 4,9 presentando condiciones que permiten su evolución a Andosoles alofánicos. La fracción coloidal estuvo dominada por materiales alofánicos más que por Al-humus (Alp / Alo < 0,5). Los valores de Si_e y Al_e extraíbles con oxalato ácido reflejaron un escaso grado de alteración. Estos disminuyeron al decrecer la precipitación media anual y ser el régimen de humedad del suelo xérico, siendo mayor bajo *Nothofagus* que bajo estepa subarbutiva graminosa, reflejando el posible efecto del tipo de vegetación junto con las precipitaciones en la alteración del suelo.

Palabras clave. Andosolización; aluminio; materia orgánica, Región Andinopatagónica.

PEDOGENETIC PROCESSES IN A SOIL SEQUENCE DEVELOPED ON A VOLCANIC ASH REGION IN NORTHWESTERN NEUQUÉN, ARGENTINA

ABSTRACT

An investigation was conducted to study Al fractions, organic matter accumulation and their influence on pedogenetic features and processes in volcanic ash soils in the Andinopatagonian region of NW Neuquén, Argentina. Five sites were selected in a climatic biosequence, ranging from *Nothofagus* forest with a udic soil moisture regime, to grass - shrub steppe with a xeric soil moisture regime. The morphological characteristics showed young soils with andic properties, a mollic epipedon and a cambic horizon. Bulk density was higher than expected for volcanic soils (from 0.90 Mg m⁻³ under *Nothofagus* forest and a udic regime to medium bulk density ~ 1.3 Mg m⁻³ in under gramineous shrub -steppe and a xeric regime). Bulk density variation was explained by organic carbon ($R^2 = 0.81$, $p < 0.0001$). Near forty percent of soil acidity variation was explained by pH (NaF) and organic carbon, ranging from moderately acidic to neutral ($R^2 = 0.39$, $p < 0.005$). This showed that soil acidity was related to Al activity and organic matter content, rather than to base content. In all cases, pH (H₂O) was higher than the critical value of 4.9 presenting conditions for its evolution to allophanic Andisols. The colloidal fraction was dominated by allophanic materials rather than Al-humus (Alp/Alo < 0.5). The acid oxalate extractable Si and Al values reflected a low rate of weathering. These values decreased when mean annual precipitation diminished and a xeric soil moisture developed; showing higher values under *Nothofagus* forest than under grass-shrub steppe, reflecting the possible effects that vegetation types and mean annual precipitation have on soil weathering.

Key words. Andosolization, aluminum, organic matter, Andinopatagonian Region.

¹ Asentamiento Universitario San Martín de los Andes, Facultad de Ciencias Agrarias-Universidad Nacional del Comahue Pasaje de la Paz 235 8370 S. M. Andes.

² Facultad de Ciencias Agrarias Universidad Nacional del Comahue

* Autor de contacto: pbroquen@yahoo.com

INTRODUCCIÓN

Generalmente se asocia a la actividad volcánica con “catástrofes” lo que es cierto en tiempos antrópicos, siendo los efectos benéficos menos visibles dado que ocurren en el largo plazo. En la región y en el mundo la actividad volcánica a través de las sucesivas erupciones determinó un enriquecimiento permanente de los suelos, siendo una de sus propiedades sobresalientes su elevada productividad natural.

El término “suelos de cenizas volcánicas” es comúnmente usado para designar a los suelos formados sobre tefras o materiales piroclásticos tanto en el mundo (*i.e.*: Tan, 1985; Shoji *et al.*, 1993; Ugolini & Dhalgren, 2002; Takahashi & Shoji, 2002;) como a nivel regional en la Argentina (*i.e.*: Colmet Daage *et al.*, 1988; Irisarri & Mendía, 1997; Gaitán & López, 2007). En este trabajo se utiliza el término “cenizas volcánica” para nombrar los materiales piroclásticos acorde con los autores antes mencionados y por ser esta fracción el principal componente de los suelos estudiados (Colmet Daage *et al.*, 1988; Irisarri & Mendía, 1997; Gaitán & López, 2007).

Luego de depositadas las tefras se alteran rápidamente y permiten la instalación de vegetación en cortos tiempos (Shoji *et al.*, 1993; Takahashi & Shoji, 2002). No hay referencias concretas de los tiempos en que ocurre la alteración, siendo utilizado el adjetivo “rápido” por muchos autores (Shoji *et al.*, 1993; Ugolini & Dhalgren, 2002; Wada, 1977; Parfitt & Wilson, 1985; Wada, 1985; Saigusa *et al.*, 1991; Takahashi & Shoji, 2002; van Reeuwijk, 2002). En este sentido Aomine & Wada (1966) plantean que la instalación de la vegetación puede ocurrir inclusive en pocos meses luego de depositada la tefra. Por otra parte, Yamada (1980) establece los siguientes rangos de tiempo para la formación de los horizontes: 100 años para el horizonte C; de 100 a 500 años para perfiles A-C; de 500 a 1500 años para perfiles A (B) C y en tefras de más de 1500 años, perfiles A-B-C.

Las cenizas tuvieron y tienen una gran dispersión en la Patagonia, en particular en la provincia del Neuquén, las que conjuntamente con el clima dan a la zona sus principales características en cuanto al tipo de suelo, de vegetación y alta productividad (Ferrer *et al.*, 1990; Broquen *et al.*, 2005; Candan & Broquen, 2009).

En el NO de la provincia del Neuquén la información disponible sobre los suelos de cenizas volcánicas es muy poca y está relacionada con algunos aspectos geomorfológicos de la región, con la influencia de los factores geográficos sobre los suelos y su potencialidad forestal, pero

no específicamente con la naturaleza de los suelos y su evolución. Las condiciones de relieve y dirección de los vientos dominantes determinan que los suelos desarrollados en cenizas volcánicas se encuentren principalmente hacia el oeste en zonas próximas a la cordillera de los Andes y hacia el este confinados en los sitios protegidos de la acción denudadora del viento. La vegetación arealmente dominante es la estepa gramínea y subarborescente gramínea. La vegetación boscosa se halla localizada hacia el oeste y en forma de pequeños bosques fragmentados de *Nothofagus antarctica* (ñire), *Nothofagus pumilio* (lenga) y en menor medida *Nothofagus obliqua* (roble pellín) con un predominio areal del ñire comúnmente establecidos sobre suelos desarrollados en cenizas volcánicas (Ferrer *et al.*, 1990; Marcolín *et al.*, 1996; Bran *et al.*, 2002).

Los suelos desarrollados a partir de cenizas volcánicas tienen propiedades únicas y comunes, las que reflejan las características del material parental y su grado de meteorización—materiales amorfos y paracrystalinos—junto con los altos contenidos de materia orgánica (Shoji *et al.*, 1993; Broquen *et al.*, 2005; Gaitán & López, 2007). El Al y Fe activos, la materia orgánica y la carga variable son los atributos más prominentes que regulan su evolución. Un adecuado conocimiento de los procesos que en ellos ocurren es fundamental para lograr un manejo apropiado que permita un uso ecológico y productivamente sustentable. El objetivo de este trabajo es: a) estudiar las fracciones de Al, la materia orgánica y, b) su influencia en los rasgos y procesos pedogenéticos, en una climo-biosecuencia de suelos desarrollados en cenizas volcánicas en la Región Andinopatagónica, NO de la provincia del Neuquén.

MATERIALES Y MÉTODOS

Zona de estudio, Sitios y Suelos

La zona de estudio se encuentra en el noroeste de la provincia del Neuquén (departamento Minas) y se caracteriza por la presencia de la Cordillera Norte y la Cordillera del Viento con altitudes entre 2000 y 3000 m, descendiendo paulatinamente hacia el este hasta los 600 m (Fig. 1). Las precipitaciones están concentradas en el invierno, abarcando un rango oeste a este entre los 2500 mm en proximidades de la Laguna de Epulauquen y 600 mm en las proximidades de la Ciudad de Andacollo. La temperatura media anual es de 10-12 °C. El material original de los suelos está dominado por cenizas volcánicas holocénicas (AIC, 2010; Ferrer *et al.*, 1990; Marcolín *et al.*, 1996; Bran *et al.*, 2002).

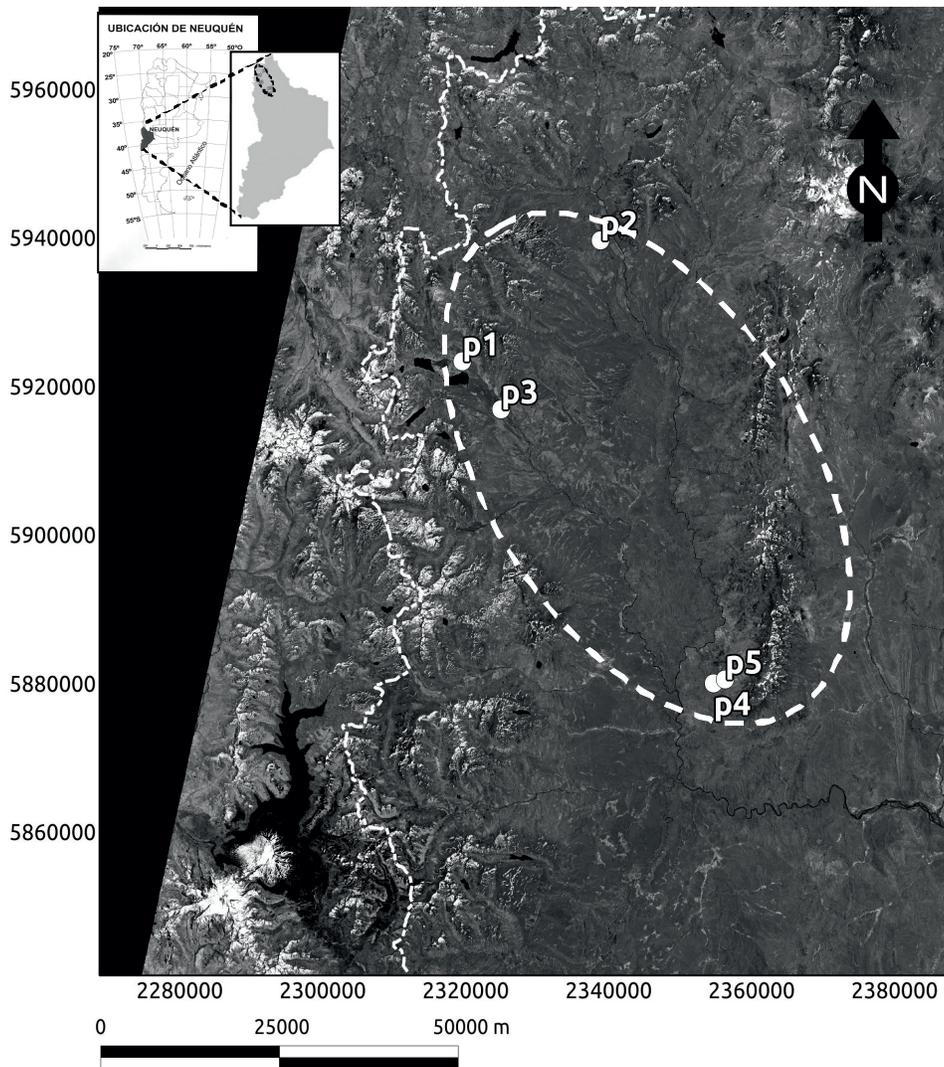


Figura 1. Área de estudio y ubicación de los sitios de estudio (p1, p2, p3 p4 y p5).
 Figure 1. Study area and location of study sites (p1, p2, p3 p4 and p5).

Se seleccionaron cinco sitios con suelos derivados de cenizas volcánicas, ubicados en un transecto con dirección aproximada NO-SE, abarcando desde el bosque húmedo a la transición a la estepa. Los sitios fueron nombrados como p1, p2, p3, p4 y p5, ubicados de la siguiente manera: p1, p2, p3 en la Región Andina subhúmeda montañosa, p1 y p2, con vegetación boscosa de *Nothofagus antarctica* (NA) y p3, con vegetación de estepa subarbutiva graminosa (ESG); p4 y p5 en la Región Extrandina de planicies, colinas y serranías con vegetación de ESG. El sitio del extremo NO fue p1, con 2500 mm precipitación media anual (PMA) y 8,7 °C de temperatura media anual (TMA) (AIC, 2010) y régimen de humedad del suelo údico. El sitio del extremo SE fue p5, con 564 mm de PMA

con 12,6 °C de TMA (AIC, 2010) y régimen de humedad del suelo xérico (Fig. 1).

Los suelos se describieron —uno en cada sitio— según las normas del USDA (1998) tomando como sección control de las propiedades ándicas hasta el horizonte C o en su defecto hasta una profundidad de 1,20 m. Los suelos de los extremos del transecto (p1 y p5) se clasificaron según el Soil Survey Staff (1999). Dada la alta estabilidad de la estructura, la textura no pudo ser determinada por los métodos comunes por lo que se utilizó el término "aparente" acorde con el Soil Survey Staff (1993) para nombrar las texturas a campo (Wada, 1977; Wada, 1985; Shoji *et al.*, 1993). Se tomaron muestras compuestas por horizonte para análisis y no disturbadas para la medición de la densidad

aparente. Se realizó el test de Fieldes a campo y laboratorio a modo de estimar el Al activo (Fieldes & Perrots, 1966).

La densidad aparente fue determinada y expresada en términos de peso seco del suelo. La retención hídrica a 1,5 MPa fue determinada por triplicado con el plato a presión. El pH fue medido con el electrodo de vidrio en agua (1:1 v/v; en KCl 1N (1:2,5 p/vp) y en NaF (1:50 p/v) (SAMPLA, 1996). La retención de fosfato (Ret-P) fue medida acorde con Blakemore *et al.* (1987). El carbono orgánico total (C_{org}) se determinó con el Analizador de Carbono LECO (Swift, 1996) y el nitrógeno total (N) se determinó por Kjeldahl (SAMPLA, 1996). Las bases de cambio fueron extraídas con acetato de amonio 1M y determinadas por espectroscopia de absorción atómica (Sumner & Miller, 1996).

Los principales procesos pedogenéticos en los suelos derivados de cenizas volcánicas son la formación de materiales amorfos (no-cristalinos y para-cristalinos) y la acumulación de materia orgánica (Ugolini & Dahlgren, 2002) y fueron nombrados como alofanización por Duchafour (1968). El Al, Fe y Si se determinaron por métodos extractivos con oxalato ácido de amonio (Al_o , Si_o) y con pirofosfato de sodio (Al_p) y leídos por espectroscopia de absorción atómica; permiten caracterizar los componentes amorfos o pobremente cristalinos de la fracción arcilla, estimar el grado de alteración de las cenizas volcánicas y la alofanización –formación de alófano e imogolita–. El Al_o incluye: Al en alófano e imogolita; Al-humus; Al intercambiable, y el Al_p el de la fracción Al-humus (Mizota & van Reeuwijk, 1989; Shoji *et al.*, 1993; van Reeuwijk, 2002). Por otra parte, se considera que cuando mayor es el contenido en Al_o y Si_o mayor es la meteorización del material piroclástico (Tan, 1985; Shoji *et al.*, 1993). El contenido de Si en alófano y el porcentaje de alófano en la fracción “tierra fina” se estimó en base a Parfitt & Wilson (1985) aplicando la ecuación de Mizota & van Reeuwijk (1989). En los dos sitios de los extremos del transecto se determinó el Al_o , Si_o y Al_p ; se compararon las medias de las variables determinadas agrupándolas por tipo de vegetación y/o por régimen hídrico del suelo. La posible relación entre variables se analizó a través de regresión simple y múltiple (Stepwise, modalidad Forward).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De la morfología de los suelos se desprende que son todos jóvenes, poco diferenciados con secuencia de horizontes O-A-Bw-2C bajo NA y A-Bw-2C bajo ESG. Son profundos a moderadamente profundos, color oscuro en superficie (10YR 2/1, 10YR 2/2), tornándose más claros en profundidad (10YR 3/2, 10YR 3/3, 10YR 3/4). Presentaron propiedades ándicas, epipedones mólicos o úmbricos y horizontes cámbicos. Las texturas aparentes son gruesas

(arena y limo aparentes) con abundante lapilli en todo el perfil, no adhesivos, no plásticos, de débil a moderadamente untuosos (Soil Survey Staff 1999) (Tabla 1).

El C_{org} es alto en aquellos con NA y régimen údico (p1, p2), lo que es esperable para Andisoles y es bajo con ESG y régimen xérico (p4, p5) (valores promedio p1, p2: 51,6 $g\ kg^{-1}$; p4, p5: 11,1 $g\ kg^{-1}$), siendo esta diferencia altamente significativa ($F= 17,865$, $p< 0,0001$). Los aportes de materia orgánica bajo NA ocurren principalmente desde la superficie, como en todo sistema boscoso, mientras que bajo ESG el mayor aporte es subsuperficial por el aporte de masas radiculares de gramíneas, lo que se observa en la distribución del C_{org} con la profundidad (Tabla 2).

Las diferencias en la materia orgánica se reflejaron en diferencias en el color siendo una expresión morfológica del proceso de melanización. El horizonte A es más oscuros (negro y pardo muy oscuro 10YR 2/1, 10YR2/2) bajo NA que bajo ESG (pardo muy oscuro y pardo grisáceo muy oscuro 10YR 3/2, 10YR3/3) donde los contenidos de materia orgánica son menores. Considerando el sitio p3, también con vegetación de ESG pero bajo régimen údico y con valores de cobertura vegetal entre 60 y 70%, se observaron valores de C_{org} (11,1 $g\ kg^{-1}$) similares a aquellos de los sitios con régimen xérico (p4, p5). De lo antedicho se desprende que las diferencias en el contenido de materia orgánica del suelo son determinadas principalmente por el tipo de vegetación, grado de cobertura y forma de aporte y en segundo término por las PMA y el régimen de humedad del suelo (Tabla 2 y 3).

En los sitios con ESG y bajas coberturas vegetales se encontraron especies que indican sitios degradados cuyas causas son atribuidas principalmente al sobrepastoreo tales como *Stipa speciosa* Trin. (coirón amargo), *Mulinum spinosum* Pers. (neneo), *Acaena splenden* (acaena), *Eringium paniculatum* Camb. et Domb. (cardoncillo), *Oxalis valdiviense* Barn. (vinagrillo), *Rumex acetosella* (vinagrillo), *Senecio* sp. (senecio) (Bonvissuto *et al.*, 1993).

Los valores de densidad aparente (D_a) fueron menores bajo NA y régimen de humedad del suelo údico que bajo ESG y régimen xérico (Tabla 3). Acorde con varios autores la D_a en suelos desarrollados en cenizas volcánicas disminuye con el incremento de la meteorización. Estos suelos desarrollan una estructura porosa en la que contribuye principalmente la presencia de materiales no cristalinos y la materia orgánica. Los menores valores de D_a correspondieron a los suelos bajo NA y los mayores bajo ESG, siendo esta diferencia altamente significativa ($F= 49,7$, $p<0,0001$). Esto fue acompañado por un mayor contenido de C_{org} ,

Tabla 1. Principales características ambientales y morfológicas de los suelos.
Table 1. Major environmental and morphological soil characteristics.

Región	TMA ^a	PMA ^b	Sitio	Posición del perfil	Altitud (m)	Tipo de vegetación y especies dominantes	Cobertura (%)	Drenaje	Horizontes	Profundidad (cm)	Color Hdo. 10 YR ^c	Textura aparente ^c	Estructura ^c	Consistencia ^f	Test Fieldes a campo	
Sub húmeda montañosa	< 10- 12 °C	2500	P1	Pendiente superior	685	Bosque húmedo <i>Nothofagus antarctica</i>	100	Bien drenados	Oi	0-1						
									A	1-10	2/1	cos	gr/sg	NS	+	
									Bw1	10-58	2/2	sf	m/sbk	WS	+	
									Bw2	58-80	3/4	sf	m/sbk	WS	++	
									2C	80-120	5/6	sf	m/sbk		-	
									Oi	0-3						
									A	3-23	2/1	sf	gr	WS	++	
									Bw1	23-39	2/2	si sf	m/sbk	WS	++	
									Bw2	39-70	3/2	si sf	m/sbk	MS	+++	
									Bw3	70- 105+	3/3	si sf	m/sbk	MS	+++	
									A	0-17	2/2	sf GR	gr	WS	+	
									Bw1	17-42	3/4	s GR	m/sbk	NS	+	
									Bw2	42-100+	3/3	s VGR	m/sbk	NS	+	
									A	0-10	3/2	s	gr/gs	NS	-	
									Bw1	10-30	3/3	sl f GR	m/sbk	NS	+	
Bw2	30-65+	3/3	s GR	m/sbk	NS	+										
Bw3	65-100+	3/4	sl GR	m/sbk	WS	+										
2C	100-110+	5/5	sc VGR	m	SD	-										
A	0-5	3/2	si s GR	gr/sg	WS	++										
Bw1	5-24	3/3	si s GR	m/sbk	MS	++										
Bw2	24-48	3/4	si s GR	m/sbk	MS	+										
Bw3	48-80	4/5	si GR	m/sbk	NS	+										
2C	80-110+	3/6	sc VGR	m	SD	-										
Extrandina subhúmeda de planicies colinas y serranías	900	P4	Pendiente superior	1370	<i>Estepa subarbutiva graminosa</i> <i>Stipa speciosa</i> . <i>Trin Mulinum</i> <i>espinosum</i> Pers., <i>Acaena splendens</i> Chuquiraga sp	40	Bien drenados	A	0-10	3/2	s	gr/gs	NS	-		
								Bw1	10-30	3/3	sl f GR	m/sbk	NS	+		
								Bw2	30-65+	3/3	s GR	m/sbk	NS	+		
								Bw3	65-100+	3/4	sl GR	m/sbk	WS	+		
								2C	100-110+	5/5	sc VGR	m	SD	-		
560	P5	Pendiente inferior	1660	<i>Estepa subarbutiva graminosa</i> <i>Stipa speciosa</i> . <i>Trin Mulinum</i> <i>espinosum</i> Pers., <i>Acaena splendens</i> Chuquiraga sp	40	Bien drenados	A	0-5	3/2	si s GR	gr/sg	WS	++			
							Bw1	5-24	3/3	si s GR	m/sbk	MS	++			
							Bw2	24-48	3/4	si s GR	m/sbk	MS	+			
							Bw3	48-80	4/5	si GR	m/sbk	NS	+			
							2C	80-110+	3/6	sc VGR	m	SD	-			

Ref. ^a TMA: temperatura media anual según Ferrer *et al.* (1990). ^b PMA: precipitación media anual fuente P1 y P6 AIC, P2, P3 P4 y P5 estimada por mapa de isoyetas. Soil ^cNotación Munsell. ^d Textura aparente a campo (Survey Staff, 1993); si: limoso; s: arenoso; f: fine; co: grueso; sl: franco arenoso, cos: arenoso grueso. GR: gravoso; VGR: muy gravoso; CB: guijonoso ST: pedregoso (Soil Survey Staff, 1999). ^em: masivo; sg: grano suelo; sbk: bloques subangulares; gr: granular; ^f no untuoso; WS: débilmente untuoso; MS: moderadamente untuoso (Soil Survey Staff, 1999).

mayores valores de pH (NaF), Al_o y de Si_o (Tablas 1, 2 y 3). La posible influencia de la materia orgánica y de la meteorización sobre la Da a nivel del perfil del suelo se analizó a través del análisis de regresión simple y múltiple.

Al analizar los datos de las muestras de todos los horizontes de los suelos en los cinco sitios, se encontró que la Da se explica en un 87% por el C_{org} (R²= 0,87, p < 0,0001) y solo en un 30% por el pH (NaF) (R²= 0,33, p < 0,016). Cuando se analizaron las variables en forma conjunta, a modo de considerar las interacciones, se encontró que ingresó como única variable el C_{org}. (R²= 0,81, p < 0,0001). De lo antedicho se desprende que la Da se explica princi-

palmente por las variaciones en el contenido de materia orgánica, más que por el Al activo estimado por el pH (NaF). Siendo el C_{org} una variable integrativa es necesario considerar otras variables que también pueden influir en las diferencias en la Da tales como, la cantidad y el arreglo del espacio poroso de origen biológico, lo que deberá estudiarse en futuras investigaciones.

Los valores de pH (H₂O) abarcaron un intervalo desde medianamente ácidos a neutros, sin evidencias de un patrón claro de comportamiento, mostrando sólo una leve tendencia a incrementar hacia el este (Tablas 2 y 3). Existe la opinión de que una disminución de la acidez del suelo se

relaciona con un incremento en las bases lo que probablemente se corresponde con una disminución en las precipitaciones, pero esto no se refleja en los datos obtenidos. Los valores del total de bases no muestran ninguna relación con la variación de la acidez del suelo. El total de bases fue bajo en los suelos de todos los sitios (promedio a nivel del perfil del suelo: 7,5 cmol₍₊₎ kg⁻¹). Aproximadamente el 70% del total de bases corresponde al calcio y los resultados no muestran un incremento del total de bases en los sitios con menores precipitaciones. Estos resultados son acordes a Broquen *et al.* (2005) quienes encontraron que la acidez del suelo estuvo determinada por la actividad del aluminio y el contenido de materia orgánica, más que por las variaciones en las precipitaciones.

El rango del pH (H₂O) > 5 a nivel del perfil del suelo, nos indica que el pH de la solución del suelo es regulado por el sistema H₂O/CO₂ a través de la formación y disociación del ácido carbónico, siendo tanto un dador como un aceptor de protones. Por otra parte al ser el pH (H₂O) > 5,5, y el pH (KCl) > 5 indica que el mecanismo principal de tamponación de estos suelos estaría gobernado por el intercambio catiónico y los silicatos del suelo más que por el Al (Robarge & Jonhson, 1992) (Tablas 2 y 3).

En suelos con dominio de carga variable, la diferencia entre el pH (H₂O) y el pH (KCl) (ΔpH) indica si la carga neta es electro positiva o negativa (ΔpH > 0: carga negativa, ΔpH < 0: carga positiva). En promedio los valores del pH (KCl) fueron 1,06 menores que el pH (H₂O), indicando el dominio de carga neta electronegativa en todos los horizontes (Tan, 1998) (Tablas 2 y 3).

Andosolización y propiedades ándicas

La andosolización de materiales parentales volcánicos involucra la rápida meteorización de la ceniza volcánica y la formación de alófono, ferrihydrita e imogolita así como la acumulación de materia orgánica formando complejos con Al, Fe y Si, siendo estos los procesos pedogenéticos dominantes (Ugolini & Dalhgren, 2002).

El concepto central de los Andisoles es el de los suelos desarrollados generalmente a partir de cenizas volcánicas cuya fracción coloidal está dominada por materiales amorfos o paracristalinos o por el complejo Al-humus (Soil Survey Staff, 1999). El primer criterio para definir las propiedades ándicas aplica para los suelos formados bajo régimen de humedad údico, con una alta alteración inferida del Al₀ + 1/2 Fe₀ (≥ 2%), alta retención de fosfato (≥ 85%) y baja densidad aparente (≤ 0,9 Mg m⁻³). El segundo criterio es utilizado para suelos menos alterados, vítricos, con valores de retención de fosfato (> 25%) requiriendo un porcentaje mínimo de vidrio volcánico (> 15%) lo que se refleja en el alto contenido de lapilli en todo el perfil del suelo (Takahashi & Shoji, 2002). Todos los suelos presentan propiedades ándicas y se clasifican como Andisoles. Tanto en p1 como en p5 se observa un incremento de la alteración con el incremento de la profundidad del suelo lo que se refleja en los valores de Al₀ + 1/2 Fe₀.

Como se planteaba en la introducción, los silicatos no cristalinos se forman masivamente durante las primeras etapas de alteración. La materia orgánica, el Al y Fe activos y la carga variable son las cualidades predominantes que controlan las reacciones químicas de estos suelos.

Tabla 3. Valores medios de propiedades seleccionadas de las muestras a nivel del perfil de suelo (p1, p2, p3, p4, p5).

Table 3. Average values of some soil profile properties from samples taken in five sites (p1, p2, p3, p4, p5).

Sitio	p1	p2	p3	p4	p5
Régimen de humedad del suelo	Údico			Xérico	
Vegetación	<i>Nothofagus antarctica</i>		Estepa subarbuscivo gramínea		
pH (H ₂ O)	6,1	6,1	6,7	6,5	6,8
pH (KCl)	5,4	5,2	5,1	5,4	5,0
Δ pH	0,7	0,9	1,7	1,4	1,6
pH (NaF)	11,4	11,4	9,6	10,1	10,2
C _{org.} (g kg ⁻¹)	41	62	10	9	13
Ret-P (%)	79	8	37	14	32
Da (Mg m ⁻³)	0,9	0,9	1,2	1,3	1,2

Ref.: Δ pH= pH (H₂O) - pH (KCl); C_{org.}: carbono orgánico; ret-P: retención de fosfato; Da: densidad aparente.

La meteorización se estimó a partir de los valores de Al_o y Si_o (Shoji *et al.*, 1993). El Al_o fue mayor bajo NA (p1, p2) que bajo ESG (p3, p4, p5) encontrándose el valor más bajo en p5, lo que evidencia una mayor alteración del material de origen bajo NA y con mayor PMA que bajo ESG tanto bajo régimen údico como xérico (Tablas 1 y 2). De esto se puede inferir una cierta influencia de la vegetación sobre la meteorización, siendo probablemente mayor bajo NA que bajo ESG. Esto puede ser atribuido a las diferencias entre el tipo y cantidad de materia orgánica incorporada al suelo, tal como ocurriera en los sitios analizados en el SO de la provincia del Neuquén (Broquen *et al.*, 2005; Broquen & Candan, 2008); donde la relación carbono en ácidos fúlvicos con el carbono en ácidos húmicos (AHC/AFc) fue menor bajo NA que bajo ESG. La menor relación AHC/AFc indica una mayor reactividad de la materia orgánica debido al mayor número de grupos funcionales de los AF los que pueden ser responsables del grado de meteorización (Broquen & Candan, 2008). Por otra parte, como es esperable los sitios con mayores valores de Al_o y de pH (NaF) presentaron los mayores valores de retención de fosfato (Tablas 1, 2 y 3).

La formación de complejos Al y Fe-humus, alófono e imogolita es en gran medida gobernada por el pH (H_2O) del suelo y se produce a medida que este disminuye. La formación de alófono e imogolita ocurre a $pH(H_2O) > 4,9$ existiendo una relación inversa con la formación del complejo Al-humus (Shoji *et al.*, 1982; Shoji & Fujiwara, 1984). Esto determina la composición binaria de los Andisoles, donde se encuentran simultáneamente compuestos amorfos y el complejo Al-humus. En todos los casos el valor del pH (H_2O) fue mayor al valor crítico para los suelos derivados de cenizas volcánicas ($pH(H_2O) > 4,9$) indicando condiciones para su evolución hacia Andisoles alofánicos. La composición relativa de la fracción coloidal se estimó a partir de la relación Al_p/Al_o siendo 0,5 el valor utilizado para separar complejos Al-humus ($Al_p/Al_o < 0,5$), de materiales alofánicos ($Al_p/Al_o > 0,5$) (Mizota & van Reeuwijk, 1989; Saigusa *et al.*, 1991).

En todos los casos la relación Al_p/Al_o fue menor que 0,5, mostrando que la fracción coloidal estuvo dominada por materiales alofánicos donde el Al orgánicamente ligado no fue la forma dominante. El alófono considerado se estimó a partir del Al_o y Si_o (Parfitt & Henmi, 1982) siendo mayor en p1 que en p5, con una cierta tendencia a incrementar en profundidad. Los mayores valores del alófono estimado se encontraron en aquellos suelos con mayores

contenidos de materia orgánica. Estos resultados podrían indicar que la hipótesis antialofánica presentada por Shoji *et al.* (1993) no aplicaría en estos suelos, tal como se planteara para el SO del Neuquén (Broquen *et al.*, 2005).

Los valores de aluminio más la mitad del hierro extraídos con oxalato ácido ($Al_o + 1/2 Fe_o$) incluyen al aluminio y al hierro provenientes de alófono, imogolita y ferrihidrita, además del que está complejo con las sustancias húmicas (Leamy *et al.*, 1988). Estos variaron de 2,1 a 3,8% bajo régimen údico y de 2,5 a 0,2% con régimen xérico, destacándose las cantidades más altas en los suelos con régimen údico y vegetación de NA y los más bajos en aquellos con régimen xérico y ESG (Tablas 1 y 2).

Los procesos anteriormente descriptos involucran la acumulación de Al, Fe y carbono en el horizonte A, no encontrándose rasgos de lixiviación de esos componentes hacia el horizonte B. La formación del horizonte B está dominada por una meteorización "in situ" de las cenizas volcánicas, cuyo color está dado por un cierto dominio de ferrihidrita-estimada por Fe_o - comprendido en el proceso de andosolización (Shoji *et al.*, 1993; Ugolini & Dalhgren, 2002).

CONCLUSIONES

El cambio de régimen hídrico údico con vegetación boscosa de *Nothofagus antarctica* a régimen xérico con vegetación de estepa subarabustiva gramínea resultó en 1) i) un cambio del contenido de materia orgánica de alto a bajo, acompañado respectivamente por el proceso de melanización y empardecimiento; ii) un cambio de bajas a medias densidades aparentes. Las diferencias en la densidad aparente de los suelos con régimen xérico y vegetación de estepa comparada con aquellas con régimen údico y vegetación boscosa se relacionaron con la menor incorporación de materia orgánica y menor grado de alteración de las cenizas volcánicas. 2) El grado de alteración del material original fue menor con régimen xérico. Se encontraron evidencias de un posible efecto de las diferencias en el tipo de materia orgánica acumulada sobre la meteorización del suelo, siendo mayor bajo *Nothofagus antarctica* que bajo estepa subarabustiva-gramínea. 3) En todos los casos el valor del pH (H_2O) fue mayor al valor crítico para los suelos derivados de cenizas volcánicas indicando condiciones para su evolución hacia Andisoles alofánicos, donde la fracción coloidal estuvo dominada por materiales

alófanicos y el Al orgánicamente ligado no fue la forma dominante. El contenido de alófano estimado fue mayor en los suelos con altos niveles de Corg, resultando ser contrario a la hipótesis anti-alofánica que indica que la formación de Al-humatos no permite la síntesis de alófano.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la valiosa colaboración de la Téc. Ftal. Verónica Pellegrini en las actividades de campo y laboratorio, al estudiante avanzado de la carrera de Técnico Universitario Forestal (AUSMA-FCA-UNCo) Diego Gierega por su colaboración en las tareas de campo, a la Téc Ftal Romina Gonzalez Musso por la confección del mapa de ubicación y digitalización de los puntos de muestreo; a la Mg Gabriela Tavella quien corrigió la sintaxis y gramática del Abstract. Expresamos nuestra gratitud a los diferentes establecimientos públicos y privados quienes permitieron instalar nuestros sitios de estudio. Este trabajo fue financiado con fondos del proyecto de investigación de la Universidad Nacional del Comahue, "Problemática del uso forestal de la tierra, su relación con la sustentabilidad, oeste del Neuquén, Argentina" código N° 04 S014.

BIBLIOGRAFÍA

- AIC. 2010. Autoridad Interjurisdiccional de Cuencas de los ríos Neuquén y Negro <http://www.aic.gob.ar/aic/publicaciones.aspx>. 22/11/2011.
- Aomine, S & K Wada. 1966. Grade of Weathering and Fertility of Volcanic Ash Soils of Aso Volcano. *Soil Science and Plant Nutrition* 12: 2, 27-33.
- Blakemore, LC; PL Searle & BK Dalby. 1987. Methods for chemical analysis of Soils. New Zealand Soil Bureau Scientific Report 80. Pp. 44-45.
- Bonvissuto, G; G Siffredi; J Ayesa; D Bran; R Somlo & G Becker. 1993. Estepas subarbutivo gramíneas de *Mulinum spinosum* y *Poa ligularis*; en el área ecológica de Sierras y Mesetas Occidentales en el noroeste de la Patagonia. *En: Secuencias de deterioro en distintos ambientes patagónicos. Su caracterización mediante el modelo de estados y transiciones. GTZ-INTA. Pp. 23:30.*
- Bran, D; JA Ayesa & CR López. 2002. Áreas Ecológicas de Neuquén. Laboratorio De Teledetección-SIG INTA-EA Bariloche INTA 8 pp.
- Broquen, P & F Candan. 2008. Materia orgánica; sustancias húmicas y edafogénesis en suelos derivados de cenizas volcánicas bajo diferente vegetación. Estudio de las fracciones orgánicas en suelos de la Argentina Editorial: EDINUS Buenos Aires. Pp. 211-220.
- Broquen, P; JC Lobartini; F Candan & G Falbo. 2005. Allophane; aluminum and organic matter accumulation in volcanic ash soils of Argentina. *Geoderma* 169(3-4): 167-177.
- Candan, F & P Broquen. 2009. Aggregate Stability and related properties in NW Patagonian Andisols. *Geoderma* 154: 42-47.
- Duchafour, P. 1968. L'évolution des Sols. Mason. Paris France. 93 pp.
- Ferrer; J; J Irisarri & M Mendía. 1990. Síntesis de los factores del medio geográfico y de las propiedades de los suelos. En el Estudio Regional de los suelos de la Provincia del Neuquén. 1. (2). CFI-COPADEF-NOQN. Bs. As. 147 pp.
- Fieldes, M & KW Perrot. 1966. The nature of Allophane in soils. 3. Rapid field and laboratory test for allophane. *New Zealand J. Sci.* 9: 623-629.
- Gaitán, JJ & CR López. 2007 Análisis del Gradiente Edáfico en la Región Andinopatagónica. *Ci. Suelo (Argentina)* 25(1): 53-63.
- Leamy, ML; B Clayden; RL Parfitt; DL Kinloch & CW Childs. 1988. The Andisol proposal. Final proposal of the International Committee on the Classification of Andisols (ICOMAND). New Zealand Soil Bureau; Low Hutt; New Zealand.
- Marcolín, A; CR López; J Ayesa; D Bran; MJ Lancioti; S García & H Moraga. 1996. Zonificación del potencial Forestal de los suelos del Sector centro sur del Departamento Minas (Provincia del Neuquén) Comunicación Técnica 38 Relevamiento integrado. INTA-Bariloche. 23 pp.
- Mizota, C & van LP Reeuwijk. 1989. Clay mineralogy and chemistry of soils formed in volcanic material in diverse climatic regions. International soil reference and information centre. Soil Monograph 2; 103 pp.
- Parfitt, RL & AD Wilson. 1985. Estimation of allophane and halloysite in three sequences of volcanic soils; New Zealand. *In: E Fernandez Caldas y DH Yaalon (eds.). Volcanic soils. Catena Suppl. 7: 1-8.*
- Parfitt, RL & T Henmi. 1982 Comparison of an oxalate-extraction method and the infrared spectroscopic method for determining allophane in soil clays. *Soil Sci. Plant Nutr.* 28(2): 183-190.
- Robarge, WP & DW Johnson. 1992. The effects of acidic deposition on forested soils. *Adv. Agron.* 47: 1-83.
- SAMLA. 1996. Sistema de apoyo metodológico para laboratorio de análisis de suelos y aguas. Dirección Prod. Agrícola, SAGP y A.
- Saigusa, M; S Shoji & M Otowa. 1991. Clay Mineralogy of Andisols Showing a Hydrosequence and its Relationships to their Physical and Chemical Properties. *Pedologist.* 35(1): 21-33.
- Shoji, S & Fujiwara Y. 1984. Active aluminum and iron in the humus horizons of Andosols from Northeastern Japan: their forms, properties and significance in clay weathering. *Soil Sci.* Vol. 137, N° 4: 216-226.
- Shoji, S; Y Fujiwara; I Yamada & M Saigusa. 1982. Chemistry and clay mineralogy of ando soils, brown forest soils, and podzolic soils formed from recent towada ashes, Northeastern Japan. *Soil Sci.* 133: 69-86.
- Shoji, S; M Nanzoy & RA Dahlgren. 1993. Volcanic ash soils. Genesis. Properties and utilization. Developments in Soil Science 21. Amsterdam. Elsevier. 288 pp.
- Soil Survey Staff. 1993. Soil Survey Manual. 5th Edition. U.S. Dept. Agricultural Handbook N° 18. US Govern. Printing Office Washington D.C.
- Soil Survey Staff. 1999. Soil Taxonomy. 2th. Ed. AID - USDA. Handbook N°436. 869 pp.
- Sumner, ME & WP Miller. 1996. Cation exchange capacity and exchange coefficients. *In: DL Sparks. (edit.); Methods of soil Analysis. Part 3. Chemical Analysis. Soil Sci. Soc. Am. Book Series N° 5. Soil Sci. Soc. Am. Inc. & A. Soc. Agron.; Inc. Madison; WI; pp. 2201-2229.*

- Swift, RS. 1996. Organic matter characterization. *In: D L Sparks (edit.) Methods of soil Analysis. Part 3. Chemical Analysis. Soil Sci. Soc. Am. Book Series N° 5. Soil Sci. Soc. Am. Inc. & A. Soc. Agron., Inc. Madison; WI; pp. 1011-1069.*
- Takahashi, T & S Shoji. 2002. Distribution and classification of volcanic ash soils. *Global Environment Research* 6(2): 83-97.
- Tan, KH. (*edit.*) 1985. Andosols. A Hutchinson Ross Benchmark Book. Van Nostrand Reinhold Co.; New York. 418 pp.
- Tan, KH. 1998. Principles of soil Chemistry. Third Edition. Marcel Dekker Inc.; New York; 361 pp.
- Ugolini, FC & RA Dahlgren. 2002. Soil development in volcanic ash. *Glob. Environ. Res.* 6: 69-81.
- USDA. 1998. Field book for describing and sampling soils. Natural Resources Conservation Service; Revisada por Schoeneberg PJ; Wysocki DA; Benham EC; Broderfueron WD. USDA National Survey Center Lincoln NE. Trad. español por investigadores del AICET-Instituto de Suelos y Evaluación de Tierras. INTA 2000.
- van Reeuwijk, M. 2002. Procedures for Soil Analysis. 120 pp.
- Wada, KJ. 1977. Allophane an Imogolite. *In: Mineral in Soil Environment. Chapter 16: 603633. SSSA; Inc. USA. 3rd Print 909 pp.*
- Wada, K. 1985. Distinctive properties of Andosols. *In: BA Steward (edit.), Advances in Soil Sci., Vol. 2. Springer. New York. Pp. 175-229.*
- Yamada, S. 1980. Distribución y morfología de los suelos derivados de cenizas volcánicas en Japón. *En: Suelos derivados de cenizas volcánicas en Japón. Ed. Ishizuka & Black EEUU. Pp. 1-13.*