

RELACIONES ENTRE EL CARBONO ORGÁNICO Y PROPIEDADES EDÁFICAS Y DEL SITIO EN SUELOS DERIVADOS DE CENIZAS VOLCÁNICAS, SUDOESTE DE NEUQUÉN (ARGENTINA)

P BROQUEN^a, F CANDAN^a, JC LOBARTIN^b, JL GIRARDIN^a.

^a Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Comahue. Ruta 151 km 12.5, (8303) Cinco Saltos, Río Negro, Argentina. pbroquen@yahoo.com

^b Departamento de Agronomía, Universidad Nacional del Sur. Altos de Palihue, (8000) Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina.

Recibido 3 de febrero de 2004, aceptado 27 de enero de 2005

RELATIONSHIPS BETWEEN SOIL ORGANIC CARBON AND EDAPHIC AND SITE PROPERTIES IN VOLCANIC ASH SOILS, SOUTHWESTERN NEUQUÉN (ARGENTINA)

An investigation was conducted to study the relationships between soil organic carbon and those properties that may influence carbon accumulation in soils derived from volcanic ash through a range of bio-climatic conditions at the Andinopatagonian region in SW Neuquén, Argentina. Pedon and climatic data of nineteen plots were used and grouped, through principal component analysis, by soil hydric regime –udic group (U) and xeric group (X)-. Within each group, a simple and a multiple regression analysis was carried out between organic C -content ($t\ ha^{-1}$) or concentration ($g\ kg^{-1}$)- and mean annual precipitation, bulk density, $pH(H_2O)$ and $pH(NaF)$, oxalate extractable Al (Alo), pyrophosphate-extractable Al (Alp), Alp/Alo, and Alo-Alp –the last four so as content or as concentration. Mean annual precipitation, explained little variation in soil organic carbon in both groups ($R^2 = 20$), and bulk density was unrelated to soil organic carbon. Alp correlated strongly with organic C content in both groups (U: $R^2 = 0.67$, $p < 0.00001$; X: $R^2 = 0.90$, $p < 0.00001$), but when expressed as concentration Alp explanation was considerably lower (U: $R^2 = 0.10$, $p < 0.02$; X: $R^2 = 0.46$, $p < 0.0006$). When all factors were combined in a multiple regression analysis, the combination of Alp contents and mean annual precipitation, explained the greatest amount of variation in soil organic C content within U group ($R^2_U = 0.69$, $p < 0.00001$). According with previous studies, relationships between Alp/Alo or (Alp-Alo) and soil organic C were very poor, this confirms that organically bound Al in allophane is not dominant. The fact that the better explanations were found when variables were expressed in content rather than in concentration was probably due to the influence of specific area on humic matter adsorption on volcanic ash soils. Our results suggested that in volcanic ash soils in SW Neuquén, Argentina, the chemical stabilization is the key process controlling soil organic C accumulation in some way independent of vegetation types.

Key words: carbon sequestration, Al-humates, volcanic ash, Native vegetation, Ponderosa pine.

INTRODUCCION

La materia orgánica del suelo referida como carbono (C) orgánico del suelo (Corg) es importante en diferentes aspectos, por una parte es el reservorio de nitrógeno, azufre y otros nutrientes del suelo e interactúa con la fracción mineral determinando su estructura y diferentes propiedades derivadas de ésta tales como la porosidad en aire y en agua. Por otra parte, constituye un depósito importante dentro del ciclo global del C (Ellert, Bettany 1995), incidiendo en el secuestro del CO_2 atmosférico. Es un importante indicador de la calidad del suelo (Doran *et al.* 1996; Percival *et al.* 2000) y de la sustentabilidad agrícola

productiva como así también del ecosistema en su conjunto, siendo el principal componente de los ciclos biogeoquímicos. El Corg es el mayor reservorio terrestre de C y es aproximadamente tres veces más que el contenido en la biomasa que se encuentra por encima del suelo (Eswaran *et al.* 1993; Houghton *et al.* 1987 en Bashkin, Binkley 1998; Schlesinger 1997 en Percival *et al.* 2000). Muchos factores interactúan determinando la acumulación y el reciclaje de la materia orgánica del suelo dependiendo por una parte de factores climáticos, del tipo de vegetación y del material de origen de los suelos y su evolución y, por otra, del tipo de uso y manejo.

Para poder predecir los cambios en el Corg producto del manejo, es fundamental conocer los factores que controlan la acumulación y estabilización de la materia orgánica en el suelo. En suelos derivados de cenizas volcánicas, el alto contenido de materia orgánica y la presencia de arcillas amorfas o paracrystalinas -alófano e imogolita-, fueron consideradas las razones para el desarrollo de sus peculiares propiedades (Tan 1985, 2000; Shoji *et al.* 1993). Estos suelos presentan alta potencialidad productiva y en la provincia de Neuquén se ubican en el tercer lugar entre los órdenes de suelos reconocidos después de los Entisoles y Aridisoles, ocupando aproximadamente 1500000 ha (Ferrer *et al.* 1990). Prácticas tales como la cosecha forestal, la instalación de forestaciones, cultivos agrícolas o uso ganadero de la tierra pueden tener diferentes efectos tanto generando pérdidas como acumulaciones del Corg, dependiendo de varios factores entre los cuales se encuentra la capacidad del suelo para su almacenamiento.

En cuanto a las características de sitio, el régimen de precipitación y de temperatura son citados como los dos factores ambientales más importantes en el control del Corg lo que a su vez puede ser modificado por el tipo de materia orgánica incorporada y las interacciones orgánico -minerales que puedan ocurrir (Van Veen, Paul 1981; Percival *et al.* 2000).

El aluminio (Al) forma en los suelos derivados de cenizas volcánicas complejos estables con la materia orgánica, lo que incrementa con el incremento de la humificación. El mecanismo de acumulación de humus es atribuido a la interacción arcilla-humus específicamente alófano-humus (Wada 1985). El contenido de C y el rango de pH del suelo determinan en gran medida el comportamiento del Al en suelos con propiedades ándicas. La formación de complejos Al y Fe-humus, se producen a medida que disminuye el pH(H₂O) por debajo de 5. La formación de alófano e imogolita ocurre a pH(H₂O) > 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 alófano e imogolita y el complejo Al-humus (Mizota, van Reeuwijk

1989).

Los suelos alofánicos son conocidos por su alta acumulación de materia orgánica pero los mecanismos determinantes de dicha acumulación son poco conocidos (Yuan *et al.* 2000) y en la Argentina y, en particular, en la zona de estudio es muy escasa la información al respecto. El SO de la provincia de Neuquén presenta condiciones que permiten analizar diferentes factores que influyen en el contenido de Corg dada la variabilidad en las propiedades edáficas, donde en poco más de 80 km, los suelos derivados de cenizas volcánicas pasan de Andisoles a Molisoles (Colmet Daage *et al.* 1988). Broquen *et al.* (2004) encontraron por una parte, que la acidez de los suelos derivados de cenizas volcánicas en el SO de Neuquén está fuertemente relacionada con la actividad del Al y el contenido de materia orgánica más que con el contenido en bases y, por otra, que los mayores contenidos de alófano ocurrían en los suelos con mayores niveles de Corg, mostrando que la acumulación del humus en estos suelos no se relaciona con la preformación de alófano, no encontrando relaciones significativas entre el Al extractado con oxalato ácido y el Corg. Esto indicaría, tal como proponen Percival *et al.* (2000) para Andisoles en Nueva Zelandia, que el Al ligado al humus y extractable con pirofosfato es la variable que mejor podría explicar el contenido de Corg en los suelos derivados de cenizas volcánicas en el sudoeste de Neuquén.

El objetivo fue investigar las relaciones entre el C orgánico del suelo y por horizonte con las propiedades edáficas y del sitio que pueden influir en su acumulación en suelos derivados de cenizas volcánicas a través de un rango de condiciones bio climáticas en el SO de la provincia de Neuquén.

MATERIALES Y METODOS

La zona de estudio se encuentra en la región andinopatagónica, sudoeste de la provincia de Neuquén y comprende la biosecuencia bosque y la biosecuencia transición a la estepa. Se caracteriza por la presencia del Cordón Chapelco de la Cordillera de los Andes con una altitud de 2000 m descendiendo paulatinamente hacia el este hasta los 600 m. La precipitación media anual abarca un rango desde los 2000 - 3000 mm sobre el límite con Chile a 500 mm en proximidades al río Collon Cura. Geológicamente se encuentra modelada por los

glaciales y, posteriormente, recubierta por un manto de cenizas volcánicas. Las últimas deposiciones corresponden a los años 1960, 1932 y 1921, y las tefras postglaciales que las anteceden ocurrieron hace 2000 años las más recientes, y 9000 - 10000 años las más antiguas (Auer 1949; Laya 1977). Las cenizas tuvieron una gran dispersión en la Patagonia y conjuntamente con el clima dan a la zona sus principales características en cuanto al tipo de suelo y de vegetación dominante. El régimen hídrico de los suelos es údico hacia el oeste donde los suelos evolucionan hacia Andisoles pasando a xérico hacia el este donde evolucionan a Molisoles (Auer 1949; Laya 1977; Colmet Daage *et al.* 1988; Ferrer *et al.* 1990). La evolución de los suelos estuvo marcada por su material parental y el régimen hídrico del suelo, con una escasa influencia del tipo de vegetación dominante (Broquen *et al.* 2002a, 2004).

Datos analizados

No existe una base de datos de las propiedades de los suelos y sitios en la región, por lo que se utilizó la información disponible en el Estudio Regional de Suelos del Neuquén (Ferrer *et*

al. 1990), en la zonificación del potencial forestal de la cordillera y precordillera, transecta San Martín de los Andes, Paso Hua Hum – Collon Cura (Colmet Daage *et al.* 1988) y otras publicaciones que presentan descripciones de suelos para la zona de estudio (Broquen 2002; Broquen *et al.* 2002a y b; Candan *et al.* 2003; Candan 2003). La mayoría de las descripciones de los pedones revisados no contenía la totalidad de los datos requeridos, por lo que se seleccionaron quince pedones con la totalidad de la información y cuatro pedones con la información incompleta en los cuales se utilizó la información de aquellos horizontes que contaban con la totalidad de los datos requeridos cuya fuente se especifica en la Tabla 1. El régimen hídrico de los suelos se estableció considerando la ubicación de los diferentes sitios en el mapa de suelos de Neuquén (Ferrer *et al.* 1998).

Las propiedades seleccionadas fueron Corg y aquellas que pueden influir en su almacenamiento en el suelo: precipitación media anual (PMA), Al extractable con oxalato (Alo), Al extractable con pirofosfato (Alp), pH(H₂O), pH(NaF) y densidad aparente (Da).

Tabla 1. Ubicación, vegetación dominante, precipitaciones medias anuales y clasificación de los suelos.

Table 1. Location, dominant vegetation, mean annual precipitation and classification of soils

Nº	Ubicación	Vegetación	PMA (mm)	Clasificación	Fuente
1 _U	40°06' / 71°53'	Bosque mixto <i>Nothofagus sp.</i>	2500	Andisol ^a	Colmet Daage <i>et al.</i> (1988)
2 _U	40°07' / 71°25'	Ñirantal	2000	Andisol ^a	Broquen (2002) Broquen <i>et al.</i> (2002a, 2003)
3 _U	40°09'3'' / 71°35'10''	Pino ponderosa	2000	Udivitrand táptico	
4 _U	40°09'2'' / 71°35'11''	Bosque mixto <i>Nothofagus sp.</i>	2000	Udivitrand táptico	
5 _U	40°03'40'' / 71°22'	Lengal	1800	Andisol ^a	Colmet Daage <i>et al.</i> (1988)
6 _U	40°06'24'' / 71°12'35''	Subarbusativa graminosa	1200	Hapludand típico	Candan (2003) Broquen <i>et al.</i> (2003)
7 _U	40°06'00'' / 71°12'20''	Ñirantal	1200	Hapludand típico	
8 _U	40°06'26'' / 71°12'34''	Pino ponderosa	1200	Hapludand típico	
9 _U	40°06'21'' / 71°12'33''	Pino ponderosa	1200	Hapludand típico	
10 _U	40°06'51'' / 71°12'23''	Ñirantal	1200	Hapludand típico	Broquen (2002) Broquen <i>et al.</i> (2002a, 2003)
11 _U	40°06'31'' / 71°12'29''	Pino ponderosa	1200	Hapludand típico	
12 _U	40°06'30'' / 71°12'30''	Subarbusativa graminosa	1200	Hapludand típico	
13 _U	40°07' / 71°11'30''	Subarbusativa graminosa	1000	Transición Andisol a Molisol	
14 _X	40°04'30'' / 71°14'10''	Subarbusativa graminosa	900	Molisol ^a	
15 _X	39°58'21'' / 71°11'41''	Subarbusativa graminosa	900	Vitrixerand húmico	Candan <i>et al.</i> (2003) Broquen <i>et al.</i> (2002a, 2003)
16 _X	39°58'17'' / 71°11'44''	Pino ponderosa	900	Vitrixerand húmico	
17 _X	2 km de S. M. Andes hacia Junín de los Andes	Subarbusativa graminosa	800	Molisol	Colmet Daage <i>et al.</i> (1988)
18 _X	39°57'18'' / 71°05'31''	Subarbusativa graminosa	700	Haploxerol vitrándico	Candan <i>et al.</i> (2003) Broquen <i>et al.</i> (2002a, 2003)
19 _X	39°57'17'' / 71°05'34''	Pino ponderosa	700	Haploxerol vitrándico	Candan <i>et al.</i> (2003) Broquen <i>et al.</i> (2003)

U: régimen hídrico del suelo údico, X: régimen hídrico del suelo xérico, ^a: inferidos a partir de la información disponible

Se corroboró que la metodología utilizada en la determinación de las variables de interés fuese la misma en todos los casos. El pH fue medido potenciométricamente en H₂O (1:1), en KCl 1 N (1:2.5) y en NaF 1 N (1:50). El Alo y Alp fueron extractados y determinados por espectroscopia de adsorción atómica acorde con Mizota y van Reeuwijk (1989). En la mayoría de los casos, el Corg fue determinado por Walkley y Black, excepto en cuatro pedones en los que se determinó por combustión seca. En esos casos, los datos fueron corregidos utilizando el factor de corrección ajustado para la zona de estudio (Broquen 2002). En la Tabla 1 se presenta una síntesis de las características de los sitios y suelos utilizados. Los mismos se numeraron correlativamente considerando su ubicación aproximada de oeste a este, correspondiendo el sufijo U a aquellos de la biosecuencia bosque bajo régimen údico y el sufijo X a los de la transición a la estepa bajo régimen xérico. Trece se encontraron en la biosecuencia bosque (1_U a 13_U), donde la vegetación nativa fue bosque de *Nothofagus pumilio* (lenga), bosque mixto de *Nothofagus sp.*, bosquetes de *Nothofagus antarctica* (ñire), subarbusciva graminosa y la implantada fue *Pinus ponderosa* (pino ponderosa). Seis casos se encontraron en la transición a la estepa (14_X a 19_X) donde la vegetación fue estepa subarbusciva graminosa y pino ponderosa.

La evaluación del contenido de Corg del suelo así como el de otros elementos depende del método utilizado para calcularlo. La concentración es un

buen indicador de la distribución en el perfil del suelo, pero no del contenido por lo que fue calculada la masa de C por horizonte basada en los datos de Corg, densidad aparente y espesor del horizonte utilizando la ecuación (1). Esta ecuación se utilizó también para calcular la masa de Alo y de Alp.

$$ME (t \text{ ha}^{-1}) = Ec (g \text{ kg}^{-1}) * Da (Mg \text{ m}^{-3}) * esp-H (m) * 10000 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1} \quad (1)$$

Donde: ME: masa del elemento (C, Alo o Alp), Ec: concentración del elemento, Da: densidad aparente, esp-H: espesor del horizonte.

Análisis estadístico

A través del análisis de componentes principales se analizó el posible agrupamiento de los suelos en estudio etiquetando las variables por ubicación, régimen hídrico, tipo de vegetación y horizonte. Las variables introducidas para el análisis de componentes principales fueron PMA, pH(H₂O), pH(NaF), Da, Corg, Alo, Alp, (Alo-Alp), estas cuatro últimas expresadas en concentración y en contenido, y Alp/Alo. A través del ordenamiento de los suelos se analizan los factores de carga que discriminan dichos grupos. Posteriormente, se analizaron las relaciones entre el Corg en concentración o contenido con la PMA y las propiedades del suelo para cada grupo, primero a través del análisis de regresión simple y luego por análisis de regresión múltiple. Para obtener el mejor modelo de regresión, es decir, aquel que más explica la variabilidad del C orgánico en el suelo se aplicó el

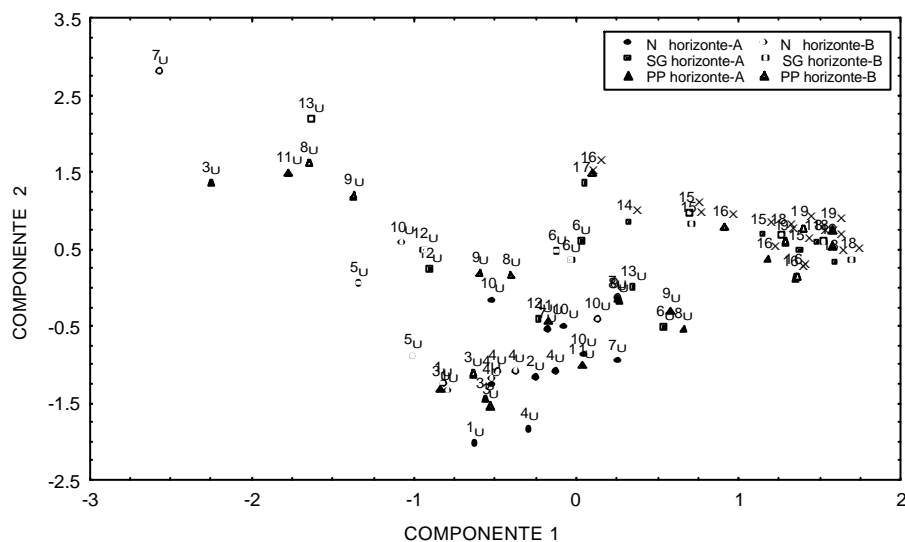


Figura 1. Distribución de las variables etiquetadas por ubicación y régimen hídrico (1_U a 13_U y 14_X a 19_X), por horizonte (-A y -B) y tipos de vegetación (*Nothofagus sp.* (N), subarbusciva graminosa (SG) y pino ponderosa (PP)) (valores expresados como contenido).

Figure 1. Variables distribution labeled by localization and hydric regime (1_U a 13_U y 14_X a 19_X), by soil horizon (-A and -B) and vegetation types (*Nothofagus sp.* (N), shrub gramineous (SG) and Ponderosa pine (PP)) (values expressed as content)

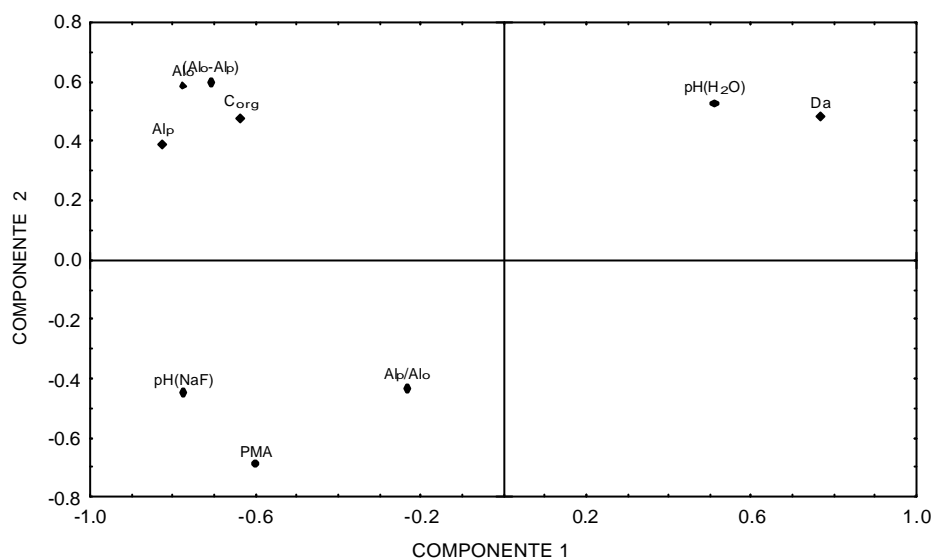


Figura 2. Carga de las variables según dos componentes (valores expresados como contenido).
Figure 2. Variables charge according to two components (values expressed as content).

método “paso a paso” con procedimiento de agregación (Montgomery 1991). Las variables independientes fueron PMA, pH(H₂O), pH(NaF), Da y Alo, Alp, (Alo-Alp), expresadas en concentración y en contenido y Alp/Alo. El programa utilizado fue SAS (1997).

RESULTADOS Y DISCUSION

Análisis de componentes principales

Considerando el peso de las variables en cada componente y su contribución relativa en la explicación de la variación total de los datos expresados en concentración se

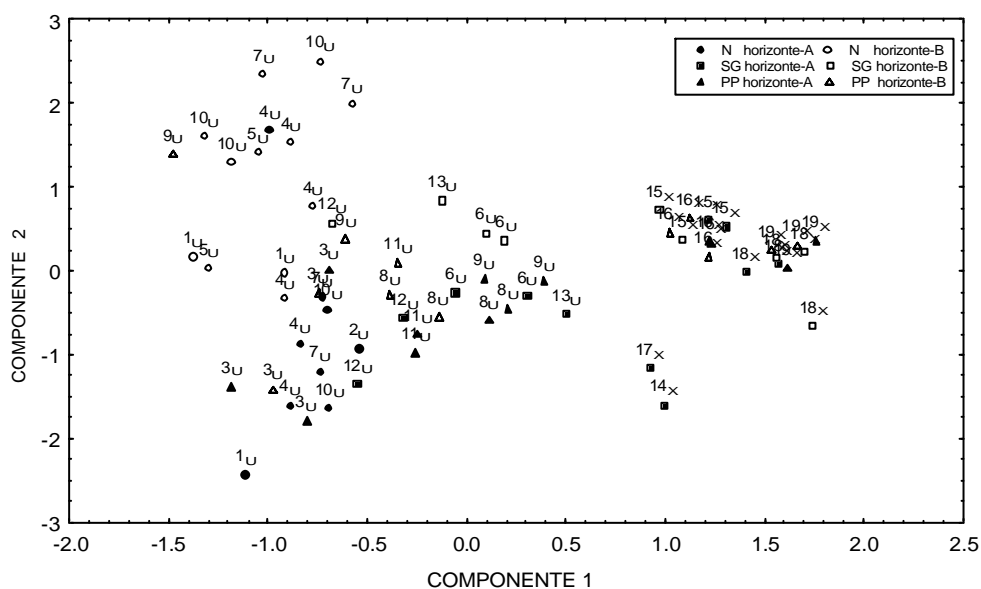


Figura 3. Distribución de las variables etiquetadas por ubicación y régimen hídrico (1_U a 13_U y 14_x a 19_x), por horizonte (-A y -B) y tipo de vegetación (*Nothofagus sp* (N), subarbusciva graminosa (SG) y pino ponderosa (PP)) (valores expresados como concentración).
Figure 3. Variables distribution labeled by localization and hydric regime (1_U a 13_U y 14_x a 19_x), by soil horizon (-A and -B) and vegetation types (*Nothofagus sp*. (N), shrub gramineous (SG) and Ponderosa pine (PP)) (values expressed as concentration).

encontró que el porcentaje de varianza acumulada explicada por dos componentes fue del 76,59% (componente 1: 56,42% y componente 2: 20,17%) y al expresarlos en contenido fue del 72,08% (componente 1: 44,96% y componente 2: 27,12%), lo que indica un alto grado de explicación.

En la Figura 1 se grafica la distribución de los datos en el plano, etiquetados por ubicación, régimen hídrico, vegetación y horizontes expresados en contenido, donde se pueden separar dos grupos, grupo U -régimen hídrico údico- y grupo X -régimen hídrico xérico-. No se observó ningún otro agrupamiento, ni por tipos de vegetación ni por horizontes. El grupo U (cluster) ubicado hacia la izquierda presentó mayores valores de PMA, contenido de Corg, menor Da, menor pH(H₂O) y mayor contenido de Alp y Alo, lo contrario ocurrió en el grupo X. Dicho agrupamiento se encontró tanto cuando los valores fueron expresados en contenido (Figuras 1 y 2) como en concentración (Figuras 3 y 4).

Por una parte, el hecho que no se agrupen por tipo de vegetación confirma resultados anteriores en los que se encontró una mayor incidencia del material de origen y el régimen hídrico en la evolución de estos suelos que del tipo de vegetación (Broquen 2002; Broquen *et al.* 2002a; Broquen *et al.*

2004). Por otra parte, este agrupamiento confirma la variación oeste a este de las propiedades de los suelos derivados de cenizas volcánicas en la zona de estudio (Colmet Daage *et al.* 1988, Frugoni *et al.* 2000 Broquen *et al.* 2004) (Tabla 2).

Los contenidos de Corg en el grupo U abarcaron un rango entre 165,5 y 13,4 t ha⁻¹ con un valor promedio de 68,1 t ha⁻¹ y en el grupo X un rango entre 201,2 y 2,02 t ha⁻¹ con un valor promedio de 48,4 t ha⁻¹, correspondiendo a concentraciones entre 72,9 a 15,2 g kg⁻¹ (U) y entre 32,6 y 1,0 g kg⁻¹ (X). Los valores más altos se encontraron hacia el oeste, en la biosecuencia bosque bajo régimen hídrico del suelo údico, disminuyendo hacia el este en la biosecuencia transición a la estepa.

PMA

La precipitación media anual abarcó un rango de 2500 a 700 mm de oeste a este, entrando en el grupo U de 2500 a 1000 mm y en el grupo X de 900 a 700 mm. La concentración y el contenido de Corg se relacionaron muy pobremente con la PMA en ambos grupos, explicando significativamente el 20% o menos de la variación del Corg, para el grupo U cuando fue expresado en contenido y para X cuando fue expresado en concentración (concentración U: R² = 0,002, p < 0,34; X: R² = 0,20, p < 0,03; contenido U: R² = 0,08, p < 0,03;

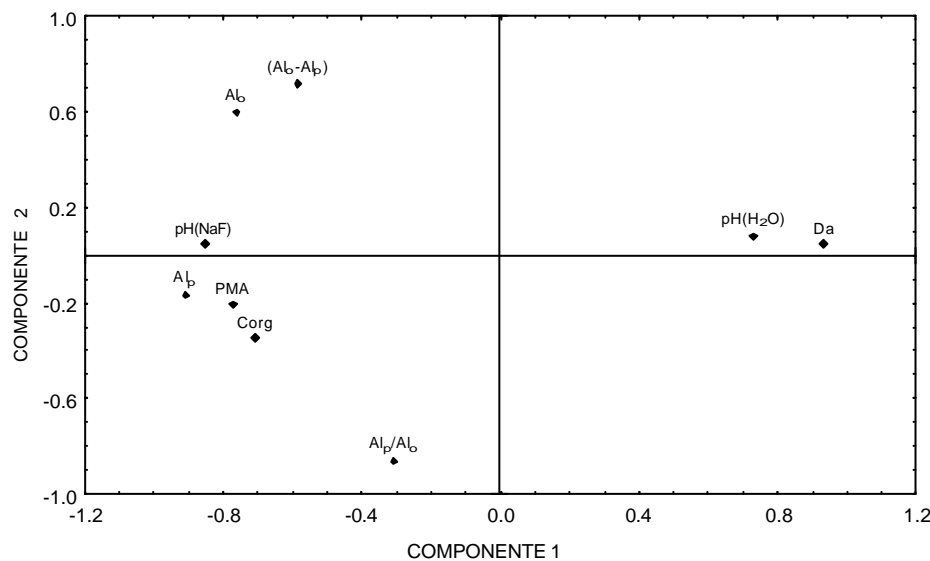


Figura 4. Carga de las variables según dos componentes (valores expresados como concentración).

Figure 4. Variables charge according to two components (values expressed as concentration).

Tabla 2. Valores medios, máximos y mínimos de las variables edáficas para la totalidad de las muestras de los suelos.**Table 2.** Mean values, maximum and minimum of edaphic variables for all soils samples.

		variable	media	máximo	mínimo			
Grupo U biosecuencia bosque, régimen hídrico tónico		pH(H ₂ O)	5,63	6,70	4,70			
		pH(NaF)	9,4	11,0	8,0			
		Da	0,75	1,01	0,60			
		Contenido (t ha⁻¹)			Concentración (g kg⁻¹)			
			media	máximo	mínimo	media	máximo	mínimo
		Corg	68,10	165,50	13,39	32,90	72,90	15,12
		Alo	28,69	127,62	6,14	13,52	28,90	5,10
		Alp	7,98	25,70	1,85	3,87	7,50	2,10
		Alo-Alp	20,74	110,4	1,83	8,46	25,00	0,30
		Alp/Alo	0,33	0,77	0,10	0,33	0,77	0,10
		variable	media	máximo	mínimo			
Grupo X biosecuencia transición a la estepa, régimen hídrico xérico		pH(H ₂ O)	6,5	7,3	5,8			
		pH(NaF)	7,9	10,3	7,4			
		Da	1,05	1,26	0,81			
		Contenido (t ha⁻¹)			Concentración (g kg⁻¹)			
			media	máximo	mínimo	media	máximo	mínimo
		Corg	48,40	201,20	2,02	13,54	32,56	1,00
		Alo	15,52	79,95	1,23	4,48	14,10	1,50
		Alp	3,42	17,01	0,22	0,86	3,00	0,20
		Alo-Alp	12,08	62,94	1,01	2,02	11,10	0,15
		Alp/Alo	0,22	0,70	0,10	0,22	0,70	0,10

Da: densidad aparente, Corg: carbono orgánico del suelo, Alo: aluminio extractable con oxalato, Alp: aluminio extractable con pirofosfato, Alo-Alp: expresa tenor en amorfos, Alp/Alo: relación binaria (=0 todo alófono, =1 todo Al-humus).

X: $R^2 = 0,06$, $p < 0,15$). Esto puede deberse más a la baja variabilidad de los datos de PMA utilizados que a la baja influencia de la PMA, dado que los mismos corresponden a las isohietas determinadas en base a la ubicación por coordenadas geográficas en la carta de precipitaciones (Barros *et al.* 1983), y no a datos correspondientes a estaciones meteorológicas en cada sitio, lo que probablemente no permitió detectar la influencia del gradiente de precipitaciones sobre la acumulación de la materia orgánica.

Da

La alta estabilidad estructural de los suelos con propiedades ándicas, determina que la textura no pueda establecerse por los métodos tradicionales requiriéndose métodos tales como el ultrasonido, no reflejando la composición granulométrica el comportamiento del suelo (Wada 1977, 1985; Besoain 1985; Shoji *et al.* 1993). Se incluyó entonces la densidad aparente como variable relacionada, dado que la materia orgánica

interactúa con la fracción mineral determinando la estructura del suelo y diferentes propiedades derivadas de ésta.

La densidad aparente varió de 0,6 a 1,26 Mg m³ encontrándose los valores más bajos en el grupo U, correspondiendo a Andisoles (Da promedio: 0,75 Mg m³) y los más altos en el grupo X, correspondiendo mayormente a Molisoles (Da promedio: 1,1 Mg m³). En cada grupo, la concentración y el contenido de Corg no se correlacionaron significativamente ($p < 0,05$) con la Da, probablemente porque la densidad aparente refleja la influencia del material de origen y su evolución más que la interacción de la fracción orgánica con la fracción mineral del suelo.

Propiedades químicas

Los suelos abarcaron las clases de acidez de fuertemente ácidos a neutros en U con un valor promedio de pH(H₂O) de 5,6 y de moderadamente ácidos a neutros en X con un valor promedio de pH(H₂O) de 6,5.

El Alo, que incluye Al activo en

alófano, imogolita, Al-humus y Al intercambiable y el Alp que indica el Al-humus (Mizota, van Reeuwijk 1989) fueron notablemente mayores en U, tanto en los valores en concentración (U: Alp promedio = 3,87 g kg⁻¹ vs X: 0,86 g kg⁻¹; U: Alo promedio = 13,52 g kg⁻¹ vs X: 4,48 g kg⁻¹) como en contenido (U: Alp promedio = 7,98 t ha⁻¹ vs X: 3,42 t ha⁻¹; U: Alo promedio = 28,69 t ha⁻¹ vs X: 15,52 t ha⁻¹). Lo mismo ocurrió para los valores de (Alo-Alp) que indican el tenor en alófano e imogolita y para los de pH(NaF) que cuando mayores a 9,2 indican el dominio de Al activo (Saigusa *et al.* 1991). Estos resultados son esperables para suelos derivados de cenizas volcánicas cuya evolución bajo régimen hídrico údico determinó una mayor alofanización y dominio de Al activo. Por otra parte, la relación binaria que se estima a través de la relación Alp/Alo y varía de 0 (dominio de alófano) a 1 (dominio de Al-humus) indicó para ambos grupos un dominio de alófano frente al Al-humus (Tabla 2).

La variable que individualmente explicó en mayor proporción la variación del Corg fue el Alp expresado en contenido, siendo la regresión altamente significativa y positiva tanto para el grupo U ($R^2 = 0,67$, $p < 0,00000$) como para X ($R^2 = 0,90$, $p < 0,00000$). Cuando el Alp fue expresado en concentración explicó solamente el 10% del comportamiento del Corg en U ($p < 0,02$) y el 46% en X ($p < 0,0006$). El Alo en contenido fue la otra variable que explicó la variación del Corg en un 41% en U ($p < 0,00000$) y en un 29% en X ($p < 0,02$), lo que no se detectó cuando las variables fueron expresadas en concentración. De lo antedicho se desprende que son los contenidos y no las concentraciones los que permiten visualizar que el comportamiento del Corg sería controlado por el Al.

Regresión múltiple

Cuando todos los factores se combinaron en el análisis de regresión múltiple, sólo para el grupo U se incluyó en el modelo otra variable siendo la combinación del Alp y PMA la combinación que explica la mayor variación del Corg ($R^2 = 0,69$, $p < 0,00000$). Cuando expresados en concentración, las variables que explican juntas la variación del Corg fueron Alp y pH(NaF) siendo muy bajo el

porcentaje de la explicación ($R^2 = 0,17$, $p < 0,006$). Para el grupo X no se incorporó ninguna otra variable, tanto cuando se analizan los contenidos como las concentraciones.

Los suelos alofánicos tienen generalmente altos contenidos de materia orgánica y se atribuye que estos altos contenidos se relacionan con altos contenidos de alófano (Wada 1985). En nuestro caso, el grado de explicación por el Alp/Alo y por el (Alo-Alp) -considerados indicadores del tenor de alófano- fue muy pobre. Esto es acorde a los resultados encontrados para Andisoles de Nueva Zelandia donde la mayor explicación del comportamiento del Corg estuvo dada por el Alp (Percival *et al.* 2000) y a los resultados de Broquen *et al.* (2004) quien encontró evidencias que la acumulación del humus en estos suelos no se relaciona con la preformación de alófano y que la formación de alófano aparentó tener una tendencia opuesta respecto a la acumulación de materia orgánica. El hecho que el Alp sea la variable que más explicó la variación del Corg indica que el proceso clave que controla la acumulación del Corg en los suelos derivados de cenizas volcánicas es la estabilización química a través de la interacción entre el Al y la materia orgánica. Dicha interacción estaría más explicada en X, régimen xérico con estación seca contrastante, donde la estabilización de la materia orgánica estaría favorecida a través de una mayor humificación (Broquen *et al.* 2004). Por otra parte, la estabilización sería en cierta manera independiente del tipo de vegetación, dado que no se encontró ningún agrupamiento por tipos de vegetación y contenido de Corg. El Alp proviene de la disolución y dispersión del Al e hidróxidos de Al asociados con la materia orgánica, referidos como complejos Al-humus, Al que no se encontraría formando parte del alófano. Según Percival *et al.* (2000) son dos las posibilidades consistentes sobre la influencia del C en los valores de Alp, una aportando la materia orgánica los ligandos para el Al y otra estabilizando el Al la materia orgánica alterando su solubilidad, conformación y propiedades superficiales.

La habilidad para formar complejos órgano metálicos solubles está directamente relacionado con los altos contenidos de grupos

carboxílicos e hidroxílicos de los ácidos húmicos y fúlvicos. Los complejos Al-humus son la forma activa del Al en los Andisoles y el humus continúa acumulándose a medida que el Al se libera y forma un complejo con el humus volviéndolo recalitrante frente a la descomposición (Zaho *et al.* 1993). En cuanto a la importancia del Si en la adsorción de la materia orgánica se considera que no se produce adsorción de los ácidos húmicos por el Si a $\text{pH} > 4$ (Schulthess, Huang 1991). En el proceso de adsorción podría estar involucrada una reacción de ligando en la cual las sustancias húmicas desplazan los grupos OH y OH_2 de las capas de coordinación del Al estructural, existiendo sitios con diferente afinidad con las sustancias húmicas (Inoue *et al.* 1990). La adsorción de ácidos húmicos y fúlvicos por la fase sólida es afectada por el área específica, el tipo de superficie presente y el pH del medio. Esto podría ser la razón del porque las mejores explicaciones del comportamiento del Corg se obtuvieron a partir del análisis de los datos expresados en contenido, cuestión ésta que deberá ser considerada en futuras investigaciones. Por otra parte, Kimble y Nettleton (1984) plantean que los datos de suelos de cenizas volcánicas con bajas densidades deberían expresarse sobre la base de volumen lo que cambia sustancialmente la interpretación de estos datos. Los autores analizan la contribución de la materia orgánica a la capacidad de intercambio catiónico, demostrando que el ajuste en base a porcentaje de Corg no sería correcto pero si lo sería cuando expresado en contenido. En este estudio se observa la contribución del Alp en la acumulación del Corg reflejando de mejor manera los fenómenos de superficie cuando fueron expresados en contenido dado que el área específica estaría en cierta forma contemplada cuando se considera el volumen del suelo y los valores se expresan en contenido y no cuando se expresan como concentración.

CONCLUSIONES

Las mejores explicaciones del comportamiento del Corg se obtuvieron a partir del análisis de los datos expresados en contenido. En el SO de la provincia del Neuquén, tanto bajo régimen údico como

xérico, el contenido de Alp es un buen predictor del contenido de C orgánico, indicando que la estabilización química fue el factor clave de la acumulación de la materia orgánica en los suelos derivados de cenizas volcánicas. El factor determinante de la acumulación de la materia orgánica no estuvo relacionado con los horizontes del perfil del suelo ni con el tipo de vegetación.

REFERENCIAS

- Auer V. 1949. Las capas volcánicas como base de la cronología postglacial de Fuegopatagonia. Revista de Investigaciones Agrícolas. Tomo II (2) 49: 208.
- Barros V, Cordon V, Moyano CL, Mendez RJ, Forquera JC, Pizzio O. 1983. Cartas de precipitaciones del oeste de las provincias de Río Negro y Neuquén. Primera contribución. Facultad de Ciencias Agrarias, UNC-CENPAT-CONICET. 100 p.
- Bashkin MA, Binkley D. 1998. Changes in soil carbon following afforestation in Hawaii. Ecology. 79 (3): 828-833.
- Besoain E. 1985. Mineralogía de arcillas de suelos. IICA. Costa Rica. 1205 p.
- Broquen P. 2002. Cambios en propiedades de suelos andicos asociados al reemplazo del bosque nativo por *Pinus ponderosa* Dougl., SO Neuquén, Argentina. Tesis de Magister en Ciencias Agrarias. Departamento de Agronomía, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina.
- Broquen P, Candan F, Falbo G. 2002a. Suelos derivados de cenizas volcánicas en la bioclimosecuencia bosque-transición a la estepa. CD y Actas XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. AACS. Puerto Madryn (Chubut). p 110.
- Broquen P, Candan F, Falbo G, Girardin JL, Apcarián A. 2002b. Efecto del *Pinus ponderosa* Dougl. sobre la reacción del suelo en el Sudoeste del Neuquén, Argentina. Bosque. 23 (1): 47-60.
- Broquen P., Lobartini J.C., Candan F., Falbo G. 2004. Allophane, aluminum, and organic matter accumulation across a bioclimatic sequence of volcanic ash soils of Argentina. Geoderma (in press).
- Candan F. 2003. Resiliencia edáfica en bosques implantados en relación a la condición de origen (SO Neuquén, Argentina). Beca de Perfeccionamiento, UNCo. Informe de Avance aprobado. Secretaría Investigación UNCo. Inédito.
- Candan F, Broquen P, Falbo G. 2003. Propiedades químicas de un Vitrikerand húmico y un Haploxerol vitrándico bajo pino ponderosa y

- estepa (SO Neuquén). *Revista de Investigaciones Agropecuarias*. 32 (1): 71-88.
- Colmet Daage F, Marcolin A, Lopez C, Lanciotti M, Ayesa J, Bran D, Andenmatten E, Broquen P, Girardin JL, Cortes G, Irisarri J, Besoain E, Sadzawka A, Sepulveda S, Massaro S, Millot P, Bouleau P. 1988. Características de los suelos derivados de cenizas volcánicas de la cordillera y precordillera del norte de la Patagonia. INTA-ORSTOM. S. C. Bariloche, Argentina. 39 p.
- Doran JW, Sarrantoni M, Liebig MA. 1996. Soil health and sustainability. *Adv. Agron.* (56): 1-54.
- Ellert BH, Bettany JR. 1995. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Can. J. Soil Sci.* 75: 529-538.
- Eswaran H, Van Den Berg E, Reich P. 1993. Organic carbon in soils of the world. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:192-194.
- Ferrer J, Irisarri J, Mendía M. 1990. Síntesis de los factores del medio geográfico y de las propiedades de los suelos. En: CFI-COPADEV- Prov. NQN (Editors), *Estudio Regional de Suelos de la Provincia del Neuquén*. Buenos Aires. Volumen 1. Tomo 2: 4-1-4-159.
- Ferrer J, Irisarri J, Mendía M. 1998. Mapa de suelos de la Provincia del Neuquén. CFI – COPADE.
- Frugoni C, Broquen P, Girardin JL, Falbo G. 2000. Propiedades de los suelos y su relación con los factores del sitio a través del análisis de componentes principales. *Actas del XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. AACS. Mar del Plata.
- Inoue K, Zhao LP, Huang PM. 1990. Adsorption of humic substances by hydroxyaluminum- and hydroxyaluminosilicate- montmorillonite complexes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54(4): 1166-1172.
- Kimble J.K., Nettleton W.D. 1984. Analytical characterization of Andepts and Andisols. Sixth International Soil Classification Workshop. Chile – Ecuador. 137-158.
- Laya H. 1977. Edafogénesis y paleosuelos de la formación téfrica Río Pireco Suroeste de la Provincia del Neuquén Argentina. *Asociación Geológica Argentina Revista XXXII* (1): 3-23.
- Mizota C, Van Reeuwijk LP. 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 p.
- Montgomery DC. 1991. Diseño y análisis de experimentos Grupo Ed. Iberoamérica. México. 538 p.
- Percival H, Parfitt R, Scott N. 2000. Factors controlling soil carbon levels in New Zealand grasslands. Is clay content important?. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64 :1623-1630.
- Saigusa M, Shoji S, Otowa M. 1991. Clay mineralogy of andisols showing a hydrosequence and its relationships to their physical and chemical properties. *Pedologist*. 35 (1): 21-33.
- SAS. 1997. Institute Inc. Cary NC 275128000 U.S.A.
- Schulthess CP, Huang CP. 1991. Humic and fulvic acid adsorption by silicon and oxide surfaces on clay minerals. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 34-42.
- Shoji S, Fujiwara Y, Yamada I, Saigusa M. 1982. Chemistry and clay mineralogy of ando soils, brown forest soils, and podzolic soils formed from recent towada ashes, North-eastern Japan. *Soil Sci.* 133 (2):69-72.
- Shoji S, Fujiwara Y. 1984 Active aluminum and iron in the humus horizons of Andosols from North-eastern Japan: Their forms, properties and significance in clay weathering. *Soil Sci.* 137 (4): 216-226.
- Shoji S, Nanzyo M, Dahlgren RA. 1993. Volcanic ash soils. *Genesis. Properties and utilization. Developments in Soil Science* 21. Amsterdam. Elsevier. 288 p.
- Sposito G, 1984. *The surface chemistry of soils*. Oxford University Press. New York. 232 p.
- Tan KH. (Editor) 1985. *Andosols. A Hutchinson Ross Benchmark Book*. Van Nostrand Reinhold Co., New York. 418 p.
- Tan KH. 2000. *Environmental Soil Science*. Second Edition. Marcel Dekker. Inc., New York. 255 p.
- Van Veen J, Paul E. 1981. Organic carbon dynamics in grassland soils. 1. Background information and computer simulation. *Can. J. Soil Sci.* 61 (2): 185-201.
- Wada K. 1985. Distinctive properties of Andosols. In: *Adv. Soil Sci.* Springer Verlag. New York Inc. 175-229.
- Yuan J., Theng B.K.G., Parfitt R.L., Percival H.J. 2000. Interactions of allophane with humic acid and cations. *European Journal of Soil Science*. 51: 35-41.
- Zhao LP, Xueming XM, Inoue K. 1993. Morphological, chemical, and humus characteristics of volcanic ash soils in Changbaishan and Wudalianchi, Northeast China. *Soil Sci. Plant Nutr.* 39 (2): 339-350.