

EFFECTO DEL CAMBIO DE USO EN LA ESTABILIDAD DE LA ESTRUCTURA Y LA FUNCIÓN DE LOS POROS DE UN ANDISOL (TYPIC HAPLUDAND) DEL SUR DE CHILE

Effect of Land Use on Structural Stability and Pore Functions of an Andisol (Typic Hapludand) in Southern Chile

José Dörner^{1*}, Dorota Dec¹, Xinhua Peng², Rainer Horn³

¹Instituto de Ingeniería Agraria y Suelos, Universidad Austral de Chile, Casilla 567, Valdivia, Chile. ²State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China. ³Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian Albrechts Universität zu Kiel Olshausenstrasse 40, 24118 Kiel, Germany.

*Corresponding author: josedorner@uach.cl

ABSTRACT

Volcanic soils in southern Chile cover approximately 60% of the arable land in the country. These soils are under a wide range of land uses from pristine systems to intensively used ones. The objective of this study was to determine the effect of the land use change on: i) the structural stability after external and internal forces, ii) the hydraulic conductivity and iii) its functional resilience. Disturbed and undisturbed soil samples were collected at 5, 20 and 40 cm depths in an Andisol (Typic Hapludand) under native forest (NF), 50 year old pasture (P50) and 1 year old pasture (P1). The water retention, shrinkage and consolidation curves, hydraulic conductivity (Ks), air permeability (Ka), organic carbon content (CO), soil texture and allophane contents were determined. The unsaturated hydraulic conductivity (Ku) was estimated according to van Genuchten (1980). Soil deformation indexes as a consequence of mechanical (COLE_m) and hydraulic (COLE_h) stresses were calculated. The studied soil is subject to continuous changes in their structure as a consequence of mechanical and hydraulic stresses affecting the pore size distribution and its functionality. The magnitude of these changes decreased with the increasing intensity of the land use. The great shrinkage capacity of the soil may have consequences on its hydraulic behaviour depending on the drying intensity through the formation of cracks and preferential path flows. Finally, the soil pores are able to recover its functional integrity after compaction, which is strongly related to the presence of organic matter contents.

Keywords: Andisol, structural properties, pore functions

RESUMEN

Los suelos volcánicos del sur de Chile constituyen cerca del 60% del suelo arable del país. Estos suelos se encuentran bajo un amplio rango de usos desde sistemas prístinos hasta otros con un uso intensivo. El objetivo de este trabajo fue determinar el efecto del cambio de uso de suelo sobre: i) la estabilidad del suelo frente a presiones externas e internas; ii) la conductividad hidráulica y iii) su resiliencia funcional. Muestras disturbadas y no disturbadas de suelo fueron recolectadas a 5, 20, 40 cm de profundidad

en un suelo Andisol (Typic Hapludand) bajo un renoval de bosque nativo (NF), una pradera de 50 años (P50) y otra de 1 año de uso (P1). Se determinó la curva de retención de agua, contracción y consolidación, la conductividad hidráulica saturada (K_s), permeabilidad de aire (K_a), contenidos de carbono orgánico (CO), textura y alofán. Se estimó la conductividad hidráulica no saturada (K_u) de acuerdo al modelo propuesto por van Genuchten (1980). Se definieron índices de deformación de suelo como consecuencia de estreses mecánicos ($COEL_m$) e hidráulicos ($COEL_h$). El suelo estudiado está sujeto a constantes cambios en su estructura como consecuencia de estreses mecánicos e hidráulicos afectando la distribución de los poros y su funcionalidad. La magnitud de estos cambios disminuye con el incremento de la intensidad de uso del suelo. La gran capacidad de contracción del suelo puede traer consecuencias en su comportamiento hidráulico dependiendo de la intensidad del secado a través de la formación de grietas y vías de flujo de preferencial. Finalmente, los poros del suelo son capaces de recuperar su integridad funcional después de una compactación, lo que está estrechamente relacionado con los contenidos de materia orgánica.

Palabras clave: Andisol, propiedades estructurales, función de los poros

INTRODUCTION

Es ampliamente reconocido que los Andisoles presentan características naturales muy particulares que los distinguen de otros suelos en el mundo (Soil Survey Staff, 2006). A través de la meteorización del material parental se desarrollan estructuras no cristalinas y complejos Al-Humus que definen las propiedades ándicas de estos suelos; entre éstas se distinguen: carga variable, alta capacidad de fijación de fósforo (Shoji *et al.*, 1993), baja densidad aparente, gran volumen de poros a distintos potenciales mátricos (Ellies, 1988), alta conductividad hidráulica en fase saturada (Ellies *et al.*, 1997) y no saturada (Ellies, 1975), formación de agregados estables (Hoyos y Comeford, 2005) y una alta capacidad de contracción (Armas *et al.*, 2003; Bartoli *et al.*, 2007; Dörner *et al.*, 2009).

Los suelos volcánicos del sur de Chile constituyen cerca del 60% de los suelos arables en el país (Besoain, 1985).

Además, se pueden encontrar bajo un amplio rango de usos, desde de aquellos bajo renoval de bosque nativo hasta otros bajo cultivo y praderas, con distintas intensidades de pastoreo. Esta particularidad, permite evaluar cómo el cambio de uso del suelo afecta sus propiedades estructurales usando como referencia los sistemas menos intervenidos tal como lo han presentado Ellies *et al.* (2000) y Huygens *et al.* (2005), entre otros autores.

Se ha demostrado que el cambio de uso de un suelo produce alteraciones en la estructura de los Andisoles (Ellies *et al.*, 2000) aduciendo que la intensificación del uso y el incremento en la presión aumentan la densidad aparente y la capacidad de soporte, disminuyendo el monto de los poros más gruesos, el contenido de materia orgánica y la conductividad hidráulica en fase saturada (Ellies, 1988; Ellies *et al.*, 1997).

Estos suelos, sin embargo, están sujetos a deformaciones o cambios estructurales no tan sólo como consecuencia de presiones externas (por ejemplo pisoteo animal), sino que también como consecuencia del secado debido a su gran capacidad de contracción (Gray y Allbrock, 2002; Armas *et al.*, 2003; Bartoli *et al.*, 2007). Es así, que la formación de meniscos de agua durante el secado provoca la contracción de estos suelos lo que tiene consecuencias sobre la distribución del volumen de poros (Dörner *et al.*, 2009) dependiendo de la intensidad del secado y de la capacidad que tenga el suelo de recuperarse durante la rehidratación (Peng *et al.*, 2007; Dörner *et al.*, 2009).

Cuando se aplica una presión sobre el suelo, éste se deforma. Esta pérdida de volumen de suelo, que se caracteriza por medio de la curva de consolidación, depende de la textura, la estructura, el contenido de agua, la capacidad de soporte (o valor de preconsolidación que registra la máxima presión que ha sostenido el suelo en su historia) y de su resiliencia (habilidad del suelo para recuperarse después de ser sometido a un stress). Por otro lado, cuando un suelo no rígido se seca, también se deforma. Este fenómeno se puede caracterizar a partir de la curva de contracción que relaciona el índice de humedad (θ) con el índice de vacíos (e). Cuando un suelo saturado se seca, la curva de contracción puede presentar 4 fases (Figura 1) que se definen como contracción estructural, proporcional, residual y cero contracción.

En la primera fase los poros estructurales y bioporos son drenados sin que se produzca una deformación significativa del volumen de suelo, $\theta > e$, permitiendo que aire ingrese a los poros más gruesos (Cornelis *et al.*, 2006). En la segunda fase, la pérdida de volumen de agua es equivalente a la de volumen de

suelo, $\theta = e$ (Mac Garry y Malafant, 1987). En la tercera fase ingresa aire a los poros, que previamente estaban saturados con agua, por lo que $\theta > e$. En la última fase, el ordenamiento de las partículas del suelo ha alcanzado su densidad máxima, por lo que el volumen de los agregados se mantiene constante a pesar que pueda seguir disminuyendo el contenido de agua.

Del párrafo anterior se desprende que el suelo puede estar sujeto a constantes cambios en su estructura ya sea por la acción de fuerzas externas o internas. Esto no deja de ser relevante ya que nos indica que el volumen de poros, que regula la relación agua/aire, dista de ser constante y al contrario es dinámico. Puede, por lo tanto, ser dinámico y muy variable dependiendo del tipo de suelo, de su resistencia mecánica y del estrés hidráulico al cual esté sometido (Baumgartl y Köck, 2004). Lo anterior tiene consecuencias sobre propiedades que dependen de la estructura (por ejemplo: distribución de poros, conductividad hidráulica, difusión térmica), afectando también otros procesos como la emisión de gases desde el suelo.

Es por esto, que el objetivo de este trabajo es determinar el efecto del cambio de uso de suelo sobre i) la estabilidad del suelo frente a presiones externas e internas, ii) el movimiento de agua en fase saturada y no saturada y iii) la resiliencia funcional de los poros del suelo.

MATERIAL Y MÉTODOS

Suelos y manejo

Un Andisol de la Serie Pelchuquín (Typic Hapludand) fue utilizado para determinar el efecto del cambio de uso del suelo sobre sus propiedades estructurales.

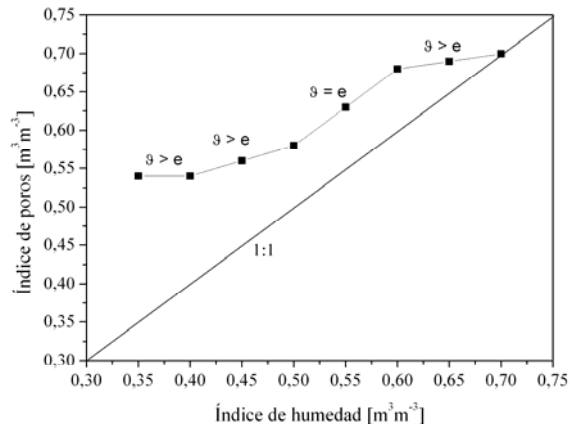


Figura 1. Presentación esquemática de una curva característica de contracción del suelo (adaptada de Peng y Horn, 2005)

Figure 1. Schematic presentation of a soil shrinkage characteristic curve (adapted from Peng and Horn, 2005)

Se seleccionaron sitios con los siguientes (NF), ii) una pradera con 50 años de uso sin preparación de suelo (P50) y iii) una pradera cultivada y sembrada en marzo de 2007 (P1). Todos ellos son aledaños y están separados por aproximadamente 400 m. 2, 4, 6 and 8 g per 100 g of soil.

Recolección de muestras y mediciones de campo

La recolección de muestras se realizó a fines de octubre de 2007. Muestras disturbadas y no disturbadas de suelo fueron recolectadas en los sitios seleccionados (NF, P50 y P1) a 5, 20 y 40 cm de profundidad. Las muestras no disturbadas fueron tomadas en cilindros metálicos, los que fueron cubiertos y dispuestos en cajas plásticas para prevenir daño mecánico y evaporación.

Análisis de laboratorio

Caracterización general del suelo. La textura del suelo se determinó de acuerdo al método del hidrómetro (Day, 1965). La dispersión de las arcillas se hizo con el

método de Bouyoucos luego de eliminar cementantes como la materia orgánica (oxidación con agua oxigenada) y los sesquióxidos de Fe y Al (adicionando 3 g de Ditionito de Sodio, 120 mL de citrato de Na 0,3 M, y 30 mL de Acetato de Na 1 M). El carbono orgánico del suelo (CO) se definió de acuerdo a Sadzawka *et al.* (2004). El contenido de alofán se determinó indirectamente de acuerdo al método descrito por Schwertmann (1964), adaptado por Mizota y van Reeuwijk (1989), que permite extraer el contenido de Alo_x y Sio_x desde el suelo por medio de la adición de oxalato ácido. Además, se utilizó una solución de pirofosfato de sodio para extraer el contenido de Al_{py}. La concentración de Al y Si se determinó por medio de espectrofotometría de absorción atómica. A partir de las concentraciones de Alo_x, Sio_x y Al_{py} se calculó el contenido de alofán de acuerdo a la ecuación propuesta por Parfitt y Wilson (1985).

Capacidad de soporte. La capacidad de soporte (P_v) se midió en un odómetro,

mediante la aplicación de cargas sucesivas entre 1 hasta 400 kPa. Las muestras saturadas (110 cm³, 4 repeticiones por profundidad y uso de suelo) se equilibraron a 6 kPa de tensión. Una vez alcanzado el equilibrio, se determinó su masa y la permeabilidad de aire (Ka), antes del ensayo de consolidación. Esta medición se repitió después del ensayo, para evaluar la resiliencia funcional de los poros del suelo.

La Ka se midió en un permeámetro de aire (elaboración propia) mediante un método de estacionario, en donde se aplica una diferencia de presión menor a 0,1 kPa con el fin de propiciar un flujo laminar ascendente de aire (Dörner y Dec, 2007) que finalmente es medido en 1 flujómetro (Cole Parmer). La capacidad de soporte se calculó de acuerdo al método propuesto por Casagrande (Rico y del Castillo, 1978).

Curva de retención de agua y contracción del suelo

La curva de retención de agua (curva pF) se determinó en las muestras no disturbadas de suelo (220 cm³, 7 repeticiones por profundidad y uso de suelo), las que fueron saturadas por ascenso capilar y, posteriormente, drenadas a potenciales mátricos de -1, -2, -3, -6, -15, -33 y -50 kPa. Para definir el volumen de poros finos (< 2 μm), se recolectaron muestras en cilindros de 20 cm³, los que después de ser saturados, fueron drenados a una tensión de -1500 kPa. El contenido de agua fue determinado para cada tensión por medio de una balanza electrónica (Precisa, con una precisión de 0,01 g). Con el fin de caracterizar la deformación hidráulica del suelo, la contracción vertical de las muestras fue determinada durante el

secado por medio del uso de un profundímetro (Holex, modelo EA201317 con una precisión de 0,05 mm).

Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica saturada (Ks) se midió en un permeámetro (Ejkelkamp, modelo 09.02.01.25) usando el método de carga constante. Las muestras de suelo (250 cm³, 10 repeticiones por profundidad y uso de suelo) fueron saturadas por ascenso capilar por un período de 48 horas. Una vez iniciado el flujo de agua a través de las muestras, Ks se midió 1 hora después de iniciado el flujo constante de agua.

Cálculos

Curvas de retención de agua y conductividad hidráulica no saturada. Los valores determinados para la curva pF y distribución de poros fueron corregidos de acuerdo a la contracción que sufre el suelo con el secado. Posteriormente, la curva de retención de agua se ajustó a la ecuación propuesta por van Genuchten (1980) mediante el software RETC v. 6.0 (van Genuchten *et al.*, 1991), en que:

$$\theta(\Psi_m) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha \cdot \Psi_m)^n\right]^m} \quad (1)$$

donde θ es el contenido volumétrico de agua, Ψ_m es la tensión de agua (hPa), θ_s y θ_r son el contenido volumétrico de agua en saturación y residual, respectivamente. Tanto α , n como m son parámetros empíricos adimensionales.

La determinación de la conductividad hidráulica no saturada se realizó de acuerdo al modelo propuesto por van Genuchten (1980) usando los parámetros α y n de la curva de retención de agua y la conductividad hidráulica saturada (Ks) medida en laboratorio. Al igual que Dec

et al. (2008), se consideró el modelo de conductividad propuesto por Mualem (1976).

Curva de contracción

La curva de contracción se caracterizó de acuerdo a la relación entre el índice de (e) e índice de humedad (θ):

$$e = \frac{V_f}{V_s} [\text{m}^3\text{m}^{-3}] \quad (2)$$

$$\theta = \frac{V_w}{V_s} [\text{m}^3\text{m}^{-3}] \quad (3)$$

donde V_f , V_w y V_s corresponde al volumen de poros, agua y sólidos, respectivamente. La curva de contracción se ajustó a la ecuación propuesta por Peng y Horn (2005):

$$e(\theta) = e_r + \frac{e_s - e_r}{\left[1 + (\chi\theta)^{-p}\right]^q} \quad \text{si } 0 \leq \theta \leq \theta_s \quad (4)$$

donde χ , p y q son parámetros empíricos. e_s y e_r son el índice de vacío saturado y residual, respectivamente.

Coefficiente de extensibilidad lineal

La deformación del suelo se estimó por medio del coeficiente de extensibilidad lineal (COEL) que permite establecer la variación unidimensional del volumen de suelo desde que este se encuentra saturado hasta que se seca (Grossman *et al.*, 1968). Para determinar la contracción del volumen de suelo como consecuencia del secado (COEL_h) se usó la siguiente ecuación:

$$COEL_h = \frac{L_0 - L_{105^\circ C}}{L_{105^\circ C}}$$

donde L_0 y $L_{105^\circ C}$ corresponden a la longitud de la muestra saturada y seca (105°C), respectivamente.

Para determinar la deformación del suelo producto de la compactación (COEL_m) durante el ensayo de

consolidación se modificó la ecuación propuesta por Grossman *et al.* (1968) de la siguiente forma:

$$COEL_m = \frac{L_0 - L_{100kPa}}{L_{100kPa}}$$

en donde L_0 y L_{100kPa} corresponden, respectivamente, a la longitud de la muestra al inicio del ensayo de consolidación y después de aplicar una carga correspondiente a 100 kPa de presión (mayor a la capacidad de soporte del suelo).

Análisis estadístico

Debido a que los valores de K_s y K_a no presentan una distribución normal, éstos fueron transformados a logaritmos tal como lo sugieren Hartge y Horn (2009) y se determinaron los valores promedios para cada horizonte de suelo. Con el propósito de evaluar el efecto del cambio de uso de suelo sobre las propiedades analizadas, se realizó un análisis de varianza ($p < 0,05$). Las diferencias entre las medias se determinaron mediante un Test de Tukey ($p < 0,05$).

RESULTADOS

Caracterización general de los suelos estudiados

El alto contenido de materia orgánica, de limo y arcilla, como también el incremento en el contenido de alofán y la reducción de la densidad aparente, en profundidad, son características comunes para los tres sitios (Cuadro 1). En cuanto a la estructura, se aprecia la formación de agregados granulares (finos en NF y P50, medios en P1) en los primeros 20 cm de suelo que se transforman en bloques subangulares (medios) a partir de los 40 cm de profundidad. Mientras la textura del suelo presenta ligeras variaciones

entre los sitios a una misma profundidad, el cambio en el uso del suelo NF a P1 y de NF a P50 se manifiesta en los primeros 5 cm de suelo en una reducción en el contenido de CO de 32% y 55%, así como en un incremento en la densidad aparente

de 27% y 22%, respectivamente. La densidad aparente en el perfil bajo bosque nativo (NF) no presenta variaciones importantes, lo que contrasta con la reducción observada en ambas praderas (P1 y P50).

Cuadro 1. Propiedades del suelo en los sitios estudiados

Table 1. Soil properties in the studied sites

Sitio	Prof. [cm]	Estructura [-]	-----[%]-----					D _b [Mg m ⁻³]
			Arena	Limo	Arcilla	CO	Alofán	
NF	5	Gra.	9,4±0,1	47,6±6,1	43,0±6,0	16,4±0,1	8,0±1,7	0,54±0,01a
	20	Gra.	9,2±0,2	57,3±4,0	33,5±2,0	7,4±0,1	10,5±1,4	0,55±0,01a
	40	Bl. sub.	7,5±0,2	61,5±5,0	31,0±1,5	3,4±0,2	11,6±1,1	0,56±0,01a
P1	5	Gra./Bl. sub.	12,7±0,8	48,7±4,0	38,6±3,0	11,1±0,7	7,9±3,8	0,69±0,01b
	20	Gra./Bl. Sub.	9,5±1,0	50,5±5,0	40,0±4,0	12,2±0,1	8,0±4,7	0,69±0,01b
	40	Bl. sub.	4,2±0,7	76,0±6,0	19,8±4,5	2,9±0,1	13,4±9,1	0,53±0,01a
P50	5	Gra.	5,6±0,1	59,0±5,0	35,4±3,0	7,3±0,1	9,3±6,7	0,66±0,01b
	20	Gra.	7,7±0,2	56,9±4,5	35,4±3,5	6,8±0,1	10,7±1,5	0,64±0,01c
	40	Bl. sub.	5,3±0,1	75,7±4,8	19,0±2,8	2,8±0,1	13,3±4,8	0,57±0,01a

NF: Bosque nativo; P1: Pradera de 1 año de uso, P50: Pradera de 50 años de uso; Gra.: Granular; Bl. sub: Bloque subangular. Arena: 2000-63 μm, Limo: 63-2 μm, Arcilla: <2 μm. CO: Carbono orgánico;. D_b: Densidad aparente. Valores promedio ± 1 error estándar (textura, CO y alofán, n: 3; D_b, n: 7). Letras diferentes a igual profundidad pero diferente uso de suelo indican diferencias estadísticamente significativas (P < 0,05).

Efecto del cambio de uso de suelo sobre la curva pF, capacidad de soporte y permeabilidad de aire

La Figura 2 presenta las curvas pF ajustadas con el modelo de van Genuchten (1980); los parámetros de la ecuación se detallan en el Cuadro 2. Este modelo se ajusta apropiadamente a las características hidráulicas de los suelos estudiados (r > 0,989), sin embargo, no se puede dejar de lado el carácter bimodal de los valores de retención de agua, que implica una separación de la curva en dos

sigmoideas con un punto medio aproximadamente en 60 hPa de tensión (pF 1,78). Los valores de θ_s son cercanos a la porosidad total (PT) del suelo (Cuadro 3) y además disminuyen con el cambio de uso de suelo, de bosque a pradera. A pesar de eso, el contenido de agua a pF 4.2, particularmente a 5 cm de profundidad, es independiente del manejo. Lo anterior se manifiesta en un mayor contenido de agua residual (θ_R). Finalmente, el cambio en el uso de suelo implica un incremento en α⁻¹ desde el

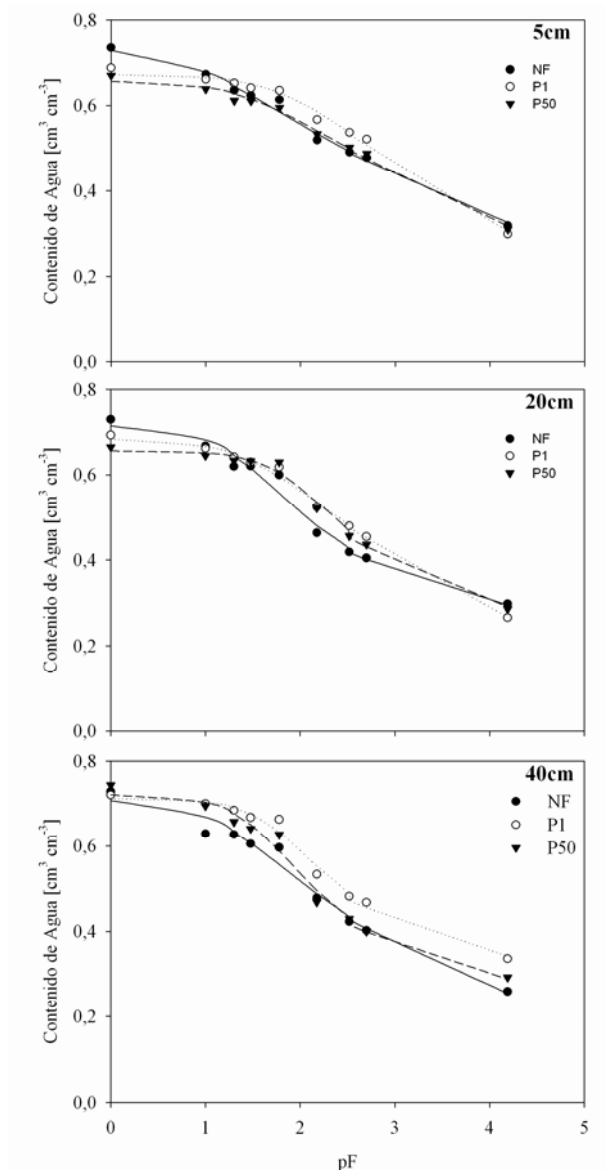


Figura 2. Curvas de retención de agua (puntos: valores medidos; líneas: ajuste según van Genuchten, 1980) en función de uso de suelo (NF, P1, P50) y la profundidad (5, 20, 40 cm).

Figure 2. Water Retention Curves (points: measured values; lines: fitted values after van Genuchten, 1980) as a function of the land use (NF, P1, P50) and soil depth (5, 20, 40 cm).

Cuadro 2. Parámetros de van Genuchten en función del uso y la profundidad del suelo.

Table 2. Van Genuchten parameters as a function of land use and soil depth.

Sitio	Prof.	θ_R	θ_S	α	n	m	r
	[cm]	-----[m ³ m ⁻³]-----		-----[-]-----			[-]
NF	5	0,00	0,74	0,13	1,11	0,10	0,992
	20	0,25	0,72	0,04	1,36	0,27	0,981
	40	0,00	0,71	0,06	1,20	0,17	0,977
P1	5	0,00	0,67	0,01	1,15	0,13	0,981
	20	0,00	0,69	0,03	1,15	0,13	0,993
	40	0,31	0,71	0,02	1,49	0,33	0,988
P50	5	0,00	0,66	0,03	1,12	0,11	0,989
	20	0,25	0,66	0,01	1,47	0,32	0,988
	40	0,26	0,72	0,03	1,47	0,32	0,983

Cuadro 3. Distribución de poros y capacidad de soporte (Pv) en función del uso y la profundidad del suelo.

Table 3. Pore size distribution and bearing capacity (Pv) as a function of land use and soil depth.

Sitio	Prof.	PT	CA	PDL	PAU	PAI	Pv
			> 50 μm	50-10 μm	10-2 μm	<2 μm	
	[cm]		-----[%]-----				[kPa]
NF	5	74±0,7a	12±0,5a	12±0,7a	17±0,9b	32±0,5a	15±5,0a
	20	74±0,6a	13±0,9a	18±0,3a	12±0,3c	31±0,5a	19±2,9a
	40	73±0,7a	13±1,0a	17±0,7a	16±0,4a	26±0,7c	31±7,1a
P1	5	69±0,7b	5±0,2b	10±0,7b	24±0,5a	30±0,4b	27±10,1b
	20	69±0,7b	8±0,6b	14±0,5b	21±0,3a	27±0,4c	45±14,0a
	40	72±0,5a	6±0,5a	18±1,4a	15±0,7a	33±0,4a	49±11,2a
P50	5	67±0,3b	8±0,9b	9±0,5b	19±0,6b	31±0,4ab	49±5,6ab
	20	67±0,2c	4±0,6c	17±0,4ab	17±0,3b	29±0,4b	48±10,5a
	40	74±0,6a	12±2,0a	20±0,7a	14±0,9b	31±0,6b	29±6,7a

PT: Porosidad total; CA: Capacidad de aire, PDL: Poros drenaje lento, PAU: Poros de agua útil, PAI: Poros de agua inútil. Valores promedio \pm 1 error estándar (Porosidad n: 7; Pv n: 4). Letras diferentes a igual profundidad pero diferente uso de suelo indican diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,05$).

bosque nativo a los sitios bajo pradera, lo que significa que la formación de una fase continua de aire (condiciones no saturadas de agua) ocurre a mayores tensiones.

La distribución de la porosidad derivada de los valores medidos de la curva pF se presenta en el Cuadro 3. El incremento en la densidad aparente del suelo (Cuadro 1) se manifiesta en un incremento en la capacidad de soporte (Pv) pero en una reducción de la PT y redistribución del tamaño de los poros del suelo, siendo afectados principalmente los poros más gruesos que regulan su capacidad de aire (CA). De NF a P1 y de NF a P50 la CA a 5 cm de profundidad cae en un 20 y 33%, respectivamente. El volumen de poros de agua inútil (PAI) no se ve afectado significativamente a 5 cm de profundidad, lo que contrasta con las diferencias observadas (numéricamente bajas, pero estadísticamente significativas) en las estratas ubicadas a 20 y 40 cm.

La Figura 3 presenta la permeabilidad de aire (Ka) para los tres usos de suelo, antes (aC) y después (dC) del ensayo de consolidación. En 5 y 20 cm de profundidad el cambio de uso de suelo desde el bosque a pradera, significó una reducción de la Ka. Después del ensayo de consolidación, la Ka disminuye y las diferencias observadas como consecuencia del uso del suelo desaparecen. A 40 cm de profundidad no se aprecian mayores diferencias entre los distintos sitios, salvo la destacable reducción de la Ka después del ensayo de consolidación.

Consecuencias del cambio de uso de suelo en la Ks y la Ku

La conductividad hidráulica saturada (Ks) de los suelos es alta (Figura 4). El cambio de uso de suelo induce una reducción significativa en Ks entre NF y P1, sin observarse mayores diferencias con P50

en los primeros 5 cm de suelo. Las diferencias entre el suelo bajo renoval de bosque nativo y el bajo pradera se mantienen en 20 y 40 cm de profundidad.

Los valores de la conductividad hidráulica no saturada (Ku) se presentan en la Figura 5. Para los valores cercanos a saturación ($-\infty$) no se usó el valor medido de Ks sino que el valor estimado por el ajuste. A 5 cm de profundidad, llama la atención la rápida reducción de Ku en NF, lo cual es producto del alto volumen de poros gruesos (Cuadro 3) y del bajo valor de α^{-1} (Cuadro 2) en comparación a los sitios bajo pradera. Lo anterior significa que el suelo alcanza rápidamente una condición no saturada (aeróbica) por lo que el agua es conducida por poros de menor diámetro, en consecuencia, la Ku disminuye. Por otro lado, las Ku en P50 y P1 son similares, pero difieren en casi dos órdenes de magnitud con NF, incluso hasta pF 4,2. A 20 cm de profundidad, la Ku en NF es superior a la observada en P50 y P1 hasta pF 1,0. Posteriormente, el movimiento de agua en condiciones no saturadas es mayor en P50 para finalmente no haber diferencias a pF 4,2 entre los tres sitios. A 40 cm de profundidad, la mayor Ku observada en NF que en P1 y P50, desaparece en cuanto drenan los poros más gruesos (pF 1,0) para manifestarse nuevamente en pF 4,2.

Efecto del cambio de uso de suelo sobre la dinámica de la estructura

Curvas de contracción en función del uso del suelo. Los suelos estudiados se contraen en la medida que disminuye el contenido de agua (Figura 6) y presentan, desde la saturación, una clara fase de contracción estructural ($\beta > e$) y normal ($\beta = e$). Sin embargo, las fases de contracción residual y cero contracción, no se aprecian nítidamente. De las curvas se puede apreciar que, a las profundidades

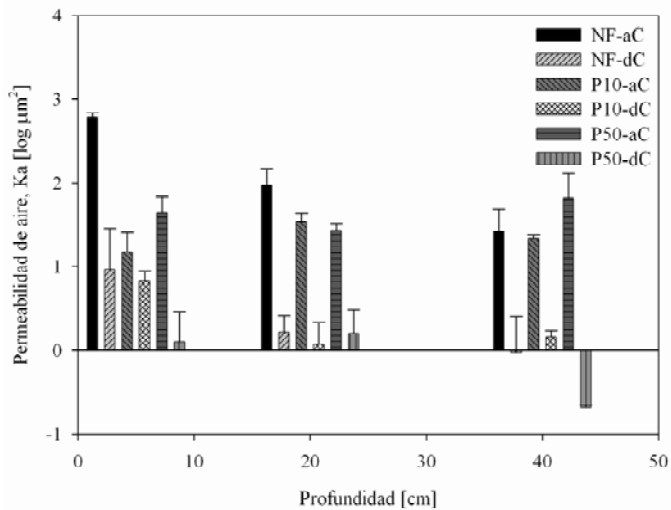


Figura 3. Permeabilidad de aire (K_a) antes (ac) y después (dc) del ensayo de consolidación para las diferentes usos (NF, P1, P50) y profundidades del suelo (5, 20, 40 cm). Barras indican ± 1 error estándar ($n=4$).

Figure 3. Air permeability (K_a) before (ac) and after (dc) the consolidation test for the different land uses (NF, P1, P50) and soil depths (5, 20, 40 cm). Barrs indicate ± 1 standard error ($n=4$).

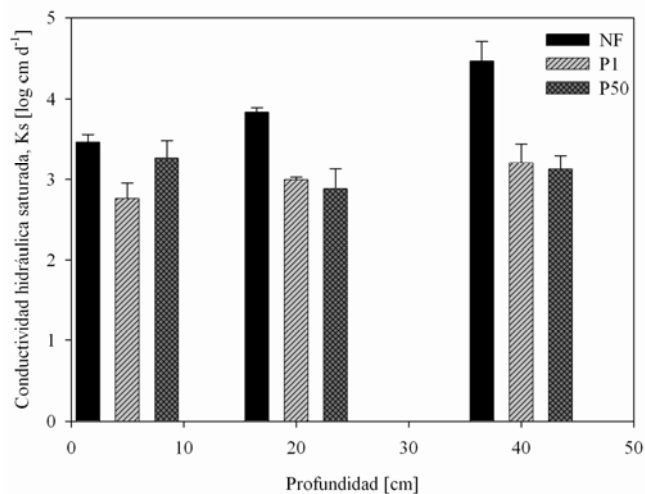


Figura 4. Conductividad hidráulica saturada (K_s) para las distintos usos (NF, P1, P50) y profundidades del suelo (5, 20, 40 cm). Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) para K_s en la misma profundidad. Barras indican ± 1 error estándar ($n=10$).

Figure 4. Saturated hydraulic conductivity (K_s) for the different land uses (NF, P1, P50) and soil depths (5, 20, 40 cm). Different letters indicate statistical differences ($p < 0,05$) between K_s measured at the same depth. Bars indicate ± 1 standard error ($n=10$).

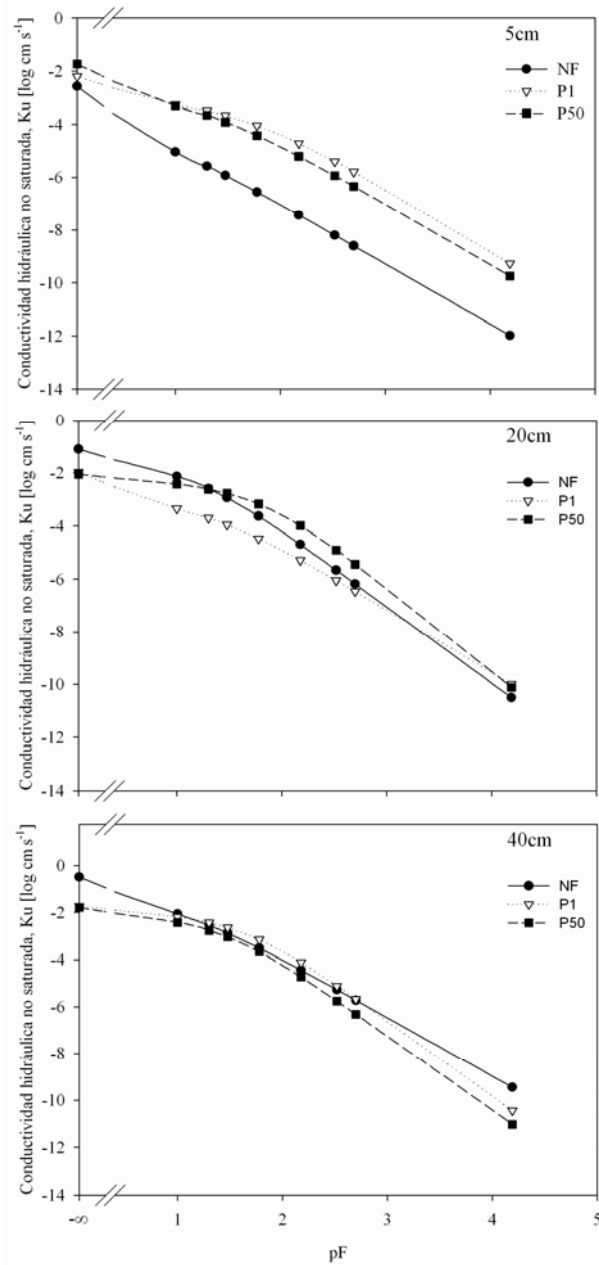


Figura 5. Conductividad hidráulica no saturada (Ku) de acuerdo a los modelos de van Genuchten (1980) y Mualem (1976).

Figure 5. Unsaturated hydraulic conductivity (Ku) according to van Genuchten (1980) and Mualem (1976) models.

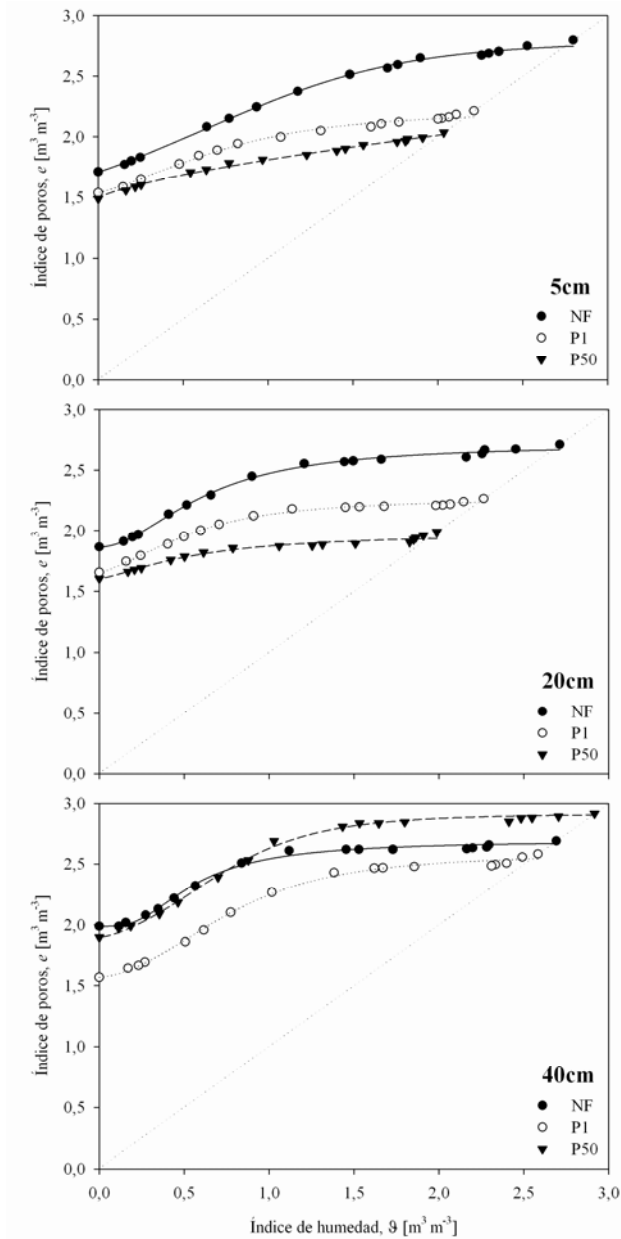


Figura 6. Curvas de contracción del suelo (puntos: valores medidos; líneas: valores ajustados según Peng and Horn, 2005) para los distintos usos (NF, P1, P50) y profundidades del suelo (5, 20, 40 cm).

Figure 6. Soil shrinkage curves (points: measured values; lines: fitted values after Peng and Horn, 2005) for the different land uses (NF, P1, P50) and soil depths (5, 20, 40 cm).

de 5 y 20 cm, NF presenta la mayor contracción en comparación con el suelo bajo pradera. Los parámetros de las curvas de contracción se presentan en el Cuadro 4. Al igual que en las curvas de retención de agua, el modelo seleccionado se ajusta adecuadamente al comportamiento de los suelos estudiados ($r > 0,986$).

La diferencia entre el índice de humedad y el de poros en el punto de contracción estructural (ρ_s y ρ_{shw} , respectivamente) representa el rango de contracción estructural. Se puede apreciar que la fase de contracción estructural y la pendiente en el punto de inflexión disminuyen con el cambio de uso de suelo, desde NF a P1 y P50, tanto a 5 como a 20 cm de profundidad. A los 5 cm en P50 no se pudo determinar la fase estructural de contracción debido a la compactación por pisoteo animal de los poros estructurales. A 40 cm de profundidad, se observan los mayores valores del índice de poros (ρ) en comparación con las otras profundidades estudiadas. Finalmente, a esta profundidad se observa que la fase de contracción estructural es mayor que en 5 y 20 cm.

Índices de deformación hidráulica y mecánica

Los coeficientes de extensibilidad lineal definidos a partir de la curva de contracción ($COEL_h$) y de la curva de consolidación ($COEL_m$) son afectados por el cambio de uso del suelo sólo en los primeros 20 cm (Figura 7). A 40 cm no se observa un comportamiento condicionado por el uso del suelo.

En general, $COEL_m$ es mayor que $COEL_h$, con una buena correlación entre ambos en los primeros 20 cm de suelo ($r: 0,75$; $P < 0,08$, gráfico no presentado), la que deja de ser significativa al

considerar todas las profundidades ($P > 0,2$).

DISCUSION

Efecto del cambio de uso de suelo sobre parámetros cuantitativos de la estructura del suelo

Los resultados expuestos demuestran que un cambio de uso del suelo significa un incremento en la densidad aparente de suelo, por lo tanto, un cambio en su estructura. Lo anterior, mejora la estabilidad mecánica en desmedro de la capacidad de aire (CA) del suelo favoreciendo la capacidad de retención de agua aprovechable para las plantas. A conclusiones similares llegaron Ellies *et al.* (2000). Este comportamiento, sin embargo, es descrito de diversas formas en la literatura científica. Por ejemplo, tanto Schäfer-Landefeld *et al.* (2004) como Dec *et al.* (2008) describen una fuerte reducción de la capacidad de aire y de almacenamiento de agua con el incremento de la densidad aparente de un suelo de textura franco limosa (17% arcilla). Lo contrario se observa generalmente en suelos de textura más gruesa (Arenosol), en donde una compactación significa una reducción de la porosidad de aireación en favor del almacenamiento de agua (O'Sullivan y Ball, 1993). El comportamiento de los suelos derivados de cenizas volcánicas parece ser particular, ya que generalmente el incremento de la densidad aparente de un suelo con altos contenidos de arcilla (Cuadro 1), conduce a una reducción de la capacidad de almacenamiento de agua con pérdida importante de poros de aireación. El suelo estudiado presenta altos contenidos de arcilla, sin embargo está constituido por alofán, mineral no cristalino constituido por esferas porosas (Allbrook, 1985; Woignier *et al.*, 2007).

Cuadro 4. Parámetros de contracción del suelo en función del suelo.

Table 4. Soil shrinkage parameters as a function of land use.

Sitio	Prof. [cm]	e_r	e_s	θ_{shw}	e_{shw}	e_{s-}	P	χ	p	q	r
		[m ³ m ⁻³]									
NF	5	1,709	2,797	1,573	2,545	0,252	0,617	0,579	3,692	0,300	0,999
	20	1,866	2,712	0,744	2,362	0,350	0,868	1,558	1,985	0,958	0,998
	40	1,987	2,691	0,684	2,415	0,276	0,976	2,488	2,149	1,801	0,998
P1	5	1,538	2,214	0,910	1,962	0,252	0,533	0,886	2,509	0,466	0,996
	20	1,656	2,264	0,634	2,020	0,244	0,670	1,333	2,210	0,574	0,998
	40	1,569	2,583	1,064	2,280	0,303	0,869	1,007	2,791	0,591	0,998
P50	5	1,488	2,036	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,470	92,25	0,008	0,998
	20	1,605	1,987	0,420	1,757	0,230	0,412	1,606	1,518	0,887	0,986
	40	1,897	2,917	1,115	2,691	0,226	0,909	0,936	3,605	0,404	0,999

e_s y e_r : índice de vacío saturado y residual; θ_{shw} y e_{shw} : índice de humedad y vacío en el punto de contracción estructural; e_s-e_{shw} : contracción estructural; P: pendiente en punto de inflexión; χ , p y q: parámetros empíricos. n.d.: parámetros no determinados ya que no se pudo definir la fase de contracción estructural.

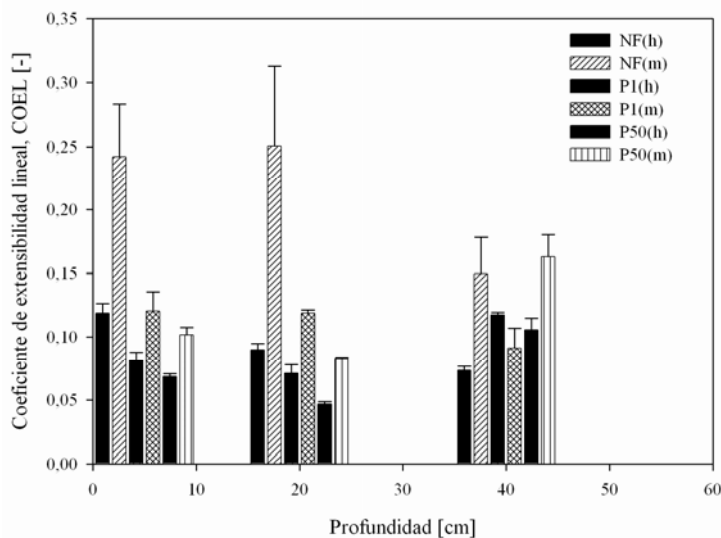


Figura 7. Coeficiente de extensibilidad lineal (COEL) para estreses hidráulicos (h) y mecánicos (m) en función del uso (NF, P1, P50) y la profundidad del suelo (5, 20, 40 cm). Letras minúsculas y mayúsculas indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) para $COEL_h$ y $COEL_m$ a la misma profundidad, respectivamente.

Figure 7. Coefficient of linear extensibility (COEL) for hydraulic (h) and mechanical (m) stresses as a function of the land use (NF, P1, P50) and soil depths (5, 20, 40 cm). Lower and uppercase indicate statistical differences ($p < 0,05$) for $COEL_h$ and $COEL_m$ at the same depth, respectively.

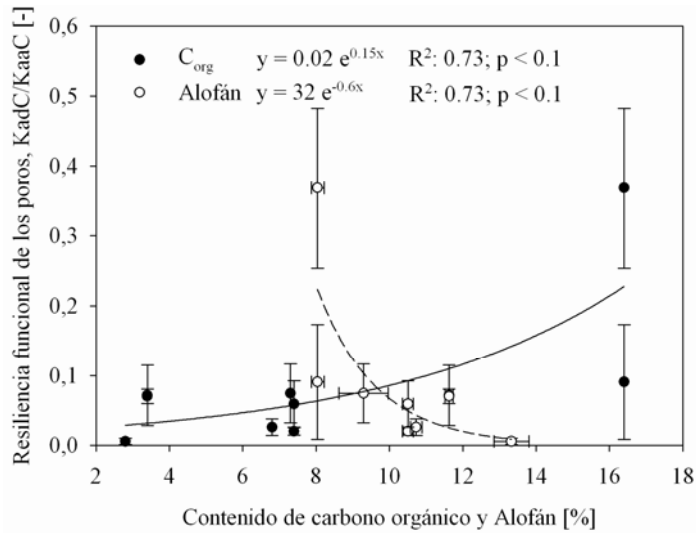


Figura 8. Resiliencia funcional del suelo (KadC/KaaC: permeabilidad del aire (Ka) después (dc) y antes (ac) del ensayo de consolidación) en función del contenido de carbono orgánico (CO). Barras indican ± 1 error estándar.

Figure 8. Functional resilience of the soil (KadC/KaaC: air permeability (Ka) after (dc) and before (ac) of the consolidation test) as a function of organic carbon (CO) concentration. Bars indicate ± 1 standard error.

Lo anterior, junto con el alto contenido de CO, explica el gran volumen de poros que presentan los Andisoles a diferentes potenciales mátricos. Ello constituye una de sus características más distintivas, que provoca que el suelo se comporte como uno arenoso o arcilloso, dependiendo de la tensión con que está retenida el agua (Armas *et al.*, 2003). En cuanto a la porosidad más fina (PAI), ésta debería ser independiente del manejo, ya que depende de la textura del suelo. Lo anterior es ratificado por Richard *et al.* (2001) y Kutilek *et al.* (2006) quienes señalan que sólo los poros estructurales (macro poros) pueden ser compactados, mientras que los texturales (micro poros) tienden a mantenerse inalterados, especialmente en suelos de mayor desarrollo estructural y estabilidad de agregados. Esto se observó solamente a 5 cm de profundidad, ya que a 20 y 40 cm se aprecian diferencias

estadísticamente significativas aunque numéricamente muy bajas.

El modelo de van Genuchten (1980) logra caracterizar apropiadamente la curva de retención de agua permitiendo, estimar la conductividad hidráulica no saturada (Ku) de una forma relativamente sencilla. A pesar que el modelo escogido es ampliamente utilizado en un amplio rango de suelos, es necesario profundizar su evaluación en suelos volcánicos por medio de la validación de los valores estimados de Ku con términos efectivamente medidos, ya que la curva de retención presenta un marcado desarrollo bimodal, típico de un suelo con gran desarrollo estructural (Durner, 1994) lo que, en muchos casos, puede generar discrepancias entre la Ku estimada y la Ku medida, especialmente en el rango de los macro poros (pF 1,78). Buytaert *et al.* (2005) utilizaron dicho modelo para

ajustar valores medidos de la curva pF en un Histic Andisol, llegando a la conclusión que no era adecuado para el suelo en cuestión ($R^2 < 0,66$) sino que, de acuerdo a la forma de las curvas recomiendan la utilización de un modelo lineal ($R^2 > 0,85$). Lo anterior, sin embargo, parece ser contradictorio debido al marcado desarrollo bimodal de las curvas presentadas por los autores ya que bajo esas condiciones la utilización de un modelo bimodal o multimodal (dos o más curvas sigmoideas del tipo van Genuchten, una sobre otra) es más recomendable (Durner, 1994).

Los suelos estudiados son susceptibles a la deformación ya sea como acción de fuerzas internas o externas. Con relación a las fuerzas internas, la formación de meniscos de agua durante el secado definen curvas con una clara fase de contracción estructural y proporcional que se manifiesta en altos valores de $COEL_h$, típicos de suelos de alta capacidad de contracción ($COEL > 0,06$, Peng *et al.*, 2007). Según Dörner *et al.* (2009) la contracción de estos suelos está estrechamente ligada a los altos contenidos de CO, la presencia de alofán y la estructura de los Andisoles. Por otro lado, las fuerzas externas también conducen a la deformación del suelo ($COEL_m$), especialmente cuando el uso es menos intensivo como en el caso de suelos bajo bosque. Lo anterior tiene consecuencias negativas sobre el desarrollo radicular, en donde se ha observado una reducción del porcentaje de raíces gruesas y una proliferación de las finas producto de un cambio de uso en el suelo (Ellies *et al.*, 2000).

A pesar que $COEL_h$ se determinó en condiciones extremas de secado, este índice de contracción es generalmente menor al $COEL_m$, por lo tanto, la magnitud de la deformación por agentes externos es mayor a la producida como

consecuencia de la formación de meniscos de agua. Esto indica que el suelo está sujeto a constantes modificaciones en su volumen, que dependerán del manejo del suelo (pastoreo, labranza, etc.) pero también de la ocurrencia del ciclos naturales de mojado y secado, tal como lo presentarán Seguel y Horn (2006). Es así que la disminución del volumen de suelo por el secado tiene consecuencias sobre el comportamiento hidráulico del suelo; ello como producto de la formación de grietas que finalmente pueden constituir vías para flujos preferenciales que aumentan el riesgo de contaminación de las napas subterráneas. Lo anterior no deja de ser relevante y debe ser considerado, especialmente cuando se requiere modelar procesos de transporte en el suelo, ya que los antecedentes presentados demuestran que el suelo no es un cuerpo rígido, sino que más bien dinámico, sujeto a constantes cambios en su estructura. Llama la atención la buena correlación existente entre $COEL_h$ y $COEL_m$ lo que abre la posibilidad de estimar la deformación del suelo como consecuencia del secado a partir de una curva de consolidación. Para ello, sin embargo, se requiere de mayor investigación.

Efecto del cambio de uso de suelo sobre parámetros funcionales de la estructura del suelo

El cambio de uso de suelo significa una fuerte reducción de la K_s y la K_a en los primeros 20 cm de suelo, la que está estrechamente relacionada con la reducción del monto de poros gruesos, pero también con la continuidad entre los poros (Dörner y Horn, 2006). Resultados similares han sido presentados para la K_s en un Andisol en Ecuador (Buytaert *et al.*, 2006) y en varios Andisoles en Chile (Ellies *et al.*, 1997).

La reducción de la conductividad hidráulica se manifiesta inicialmente en condiciones de saturación, pero luego varía en la medida que los poros estructurales van dando paso a los texturales. A pesar que la función de conductividad hidráulica presentada es una estimación, llama la atención los altos valores que presenta K_u , incluso a altos niveles de tensión. Lo anterior significa que estos suelos siguen conduciendo a altas tensiones, demostrando que si bien es cierto que los Andisoles pueden almacenar mucha agua, también la entregan rápidamente, por lo tanto, se secan rápido, tal como lo expusiera Ellies (1975).

La compactación induce cambios en la geometría del sistema poroso lo que finalmente reduce la permeabilidad en Andisoles (Ellies *et al.*, 1997). Si bien es cierto que estos cambios han sido informados, no hay estudios en donde se presente la resiliencia funcional de los poros en Andisoles del sur de Chile. Después de un evento de presión, como el ocurrido en el ensayo de consolidación, K_a se recupera de forma distinta en los horizontes de suelo.

La Figura 8 ilustra la relación entre la resiliencia funcional de los poros (recuperación de la K_a) y los contenidos de CO y de alofán. De la tendencia presentada en el gráfico ($p < 0,1$) se puede desprender que la resiliencia funcional de los poros está estrechamente relacionada con el contenido de CO quien actúa con un elemento elástico, que permite tanto la recuperación la volumétrica del suelo (Ellies, 1988) como la funcional de sus poros. El alofán, debido a su estructura porosa y baja cohesión entre sus partículas (Allbrook, 1985), no contribuye a la recuperación funcional del suelo.

CONCLUSIONES

El suelo Andisol estudiado no es rígido, sino que está sujeto a constantes cambios en su volumen ya sea por medio de estreses mecánicos o hidráulicos. Un incremento en la intensidad de uso del suelo, disminuye su capacidad de deformación al ser evaluado a partir del coeficiente de extensibilidad lineal (COEL).

La gran capacidad de contracción de los Andisoles puede traer consecuencias sobre el comportamiento hidráulico del suelo, ya sea por medio de la formación de grietas (flujos preferenciales) o por una subestimación del contenido volumétrico del agua, si la deformación del suelo durante el secado no es considerada.

Un cambio en el uso del suelo disminuye la proporción de poros estructurales y la conductividad de los poros pero, por otro lado, aumenta la capacidad de almacenamiento de agua y la estabilidad mecánica.

La resiliencia funcional de los poros del suelo está estrechamente relacionada con la presencia de componentes orgánicos.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por el Proyecto FONDECYT 11060130. Los autores además agradecen a los Programas de Cooperación Internacional FONDECYT 7070332 y CONICYT-DFG.

Finalmente, el autor también agradece al Sr. Claus Prehn por la buena disposición que ha tenido durante muchos años para ejecutar diversos proyectos de investigación en su predio.

REFERENCIAS

- Armas, S., Hernández, J. y Regalado, C. 2003.** Evaluación de la retracción en suelos volcánicos cultivados y su relación con algunas propiedades físicas. En: Álvarez-Benedi y P. Marinero (Eds.) Actas de las VI Jornadas sobre Investigación de la Zona no Saturada del Suelo N° 6 – ZNS'03. Vallalodid, pp: 125-130.
- Allbrook, R.F. 1985.** The effect of allophane on soil properties. *Applied Clay Sci.* 1, 65-69.
- Bartoli, F., Begib, J.C., Burtin, G., Schouller, E. 2007.** Shrinkage of initially very wet soil blocks, cores and clods from a range of european Andosol horizons. *Eur. J. Soil Sci.* 58, 378-392.
- Baumgartl, Th., Köck, B. 2004.** Modeling volume change and mechanical properties with hydraulic models. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68, 57-65.
- Besoain, E. 1985.** Minerales secundarios En: Tosso (Ed.), *Suelos Volcánicos de Chile*, INIA, Santiago, Chile, pp. 153-214.
- Buytaert, W., Wyseure, G., De Bièvre, B., Deckers, J. 2005.** The effect of land use changes on the hydrological behaviour of Histic Andosols in south Ecuador. *Hydrol. Process.* 19, 3985-3997.
- Cornelis, W.M., Corluy, J., Medina, H., Díaz, J., Hartmann, R., Van Meirvenne, M., Ruiz, M. 2006.** Measuring and modelling the soil shrinkage characteristic curve. *Geoderma* 137, 179-191.
- Day, P.R. 1965.** Particle fractionation and particle size analysis. In: Black, C.A. et al. (Eds.), *Methods of soil analysis, Part I.* Agronomy 9, 545-567.
- Dec, D., Dörner, J., Becker-Fazekas, O. Y Horn, R. 2008.** Effect of bulk density on hydraulic properties of homogenized and structured soils. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 8 (1), 1-13.
- Dörner, J. y Horn, R. 2006.** Anisotropy of pore functions in structured Stagnic Luvisols in the weichselian moraine region in N Germany. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 169, 213-220.
- Dörner, J. y Dec, D. 2007.** La permeabilidad de aire y conductividad hidráulica saturada como herramientas para la caracterización funcional de los poros del suelo. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 7 (2), 1-13.
- Dörner, J., Dec, D., Peng, X., Horn, R. 2009.** Change of shrinkage behavior of an Andisol in southern Chile: Effects of land use and wetting/drying cycles. *Soil and Tillage Res.* (In press doi:10.1016/j.still.2009.09.013).
- Durner, W., 1994.** Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resour. Res.* 30 (2), 211-223.
- Ellies, A. 1975.** Untersuchungen über einige Aspekte des Wasserhaushaltes vulkanischer Aschenböden aus der gemähten Zone Südchiles. Dissertation Universität Hannover.
- Ellies, A., 1988.** Mechanical consolidation in volcanic ash soils. In: Drescher, J., Horn, R., De Boodt, M. (Eds.), *Impact of Water and External Forces on Soil Structure*, CATENA, Supplement 11, pp. 87-92.
- Ellies, A., Grez, R., Ramírez, C. 1997.** La conductividad hidráulica en fase saturada como herramienta para el diagnóstico de la estructura del suelo. *Agro Sur* 25 (1), 51-56.
- Ellies, A., Horn, R., Smith, R. 2000.** Effect of management of a volcanic ash soil on structural properties. *Int. Agrophysics* 14, 377-384.
- Gray, C.W., Allbrook, R. 2002.** Relationships between shrinkage indices and soil properties in some New Zealand soils. *Geoderma* 108, 287-299.
- Grossman, R.H., Brasher, B.R., Franzmeier, D.P., Walker, J.L. 1968.** Linear extensibility as calculated from natural-clod bulk density measurements. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 32, 570-573.
- Hartge, R., Horn, R. 2009.** Die physikalische Untersuchung von Böden. *Praxis Messmethoden Auswertung.* 4. vollst. Überarbeitete Auflage. Schweizerbart Vorlage, Stuttgart, 178p.
- Hoyos, N., Comerford, N. 2005.** Land use and landscape effects on aggregate stability and total carbon of Andisols from Colombian Andes. *Geoderma* 129, 268-278.

- Huygens, D., Boeckx, P., Van Cleemput, O., Oyarzun, C., Godoy, R. 2005.** Aggregate and soil organic carbons dynamics in South Chilean Andisols. *Biogeosciences*, 2, 159-174.
- Kutílek, M., L. Jenele, Panayiotopoulos, K.P. 2006.** The influence of uniaxial compression upon pore size distribution in bi-model soils. *Soil and Tillage Res.* 86, 27–37.
- McGarry, D., Malafant, K.W. 1987.** The analysis of volume change in unconfined units of soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51, 290-297.
- Mizota C. y van Reeuwijk, L.P. 1989.** Clay mineralogy and chemistry of soil formed in volcanic material in diverse climate regions. *Soil Monograph* 2. ISRIC, Wageningen, The Netherlands.
- Mualem, Y.A. 1976.** A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* 12, 513-522.
- O'Sullivan, M.F., Ball, B.C. 1993.** The shape of the water release characteristic as affected by tillage, compaction and soil type. *Soil and Tillage Res.* 25, 339-349.
- Parfitt, R.L., Wilson, A.D. 1985.** Estimation of allophane and halloysite in three sequences of volcanic soils, New Zealand. In: Fernández Caldas, E. & Yaalon, D.H. (Eds.) *Volcanic Soils*, Catena Supplement N°7, Catena Verlag, Cremlingen, pp. 1-8,
- Peng, X., Horn, R. 2005.** Modelling soil shrinkage curve across a wide range of soil types. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69, 584-592.
- Peng, X., Horn, R., Smucker, A. 2007.** Pore shrinkage dependency of inorganic and organic soils on wetting and drying cycles. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71, 1095-1104.
- Richard, G., Cousin, I., Sillon, J.F., Bruand, A., Guérif, J. 2001.** Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on unsaturated hydraulic properties. *Eur. J. Soil Sci.* 52, 49-58.
- Rico, R., del Castillo, H. 1978.** La ingeniería de suelos en vías terrestres, carreteras, ferrocarriles y aeropistas. Limusa, México, 163p.
- Sadzawka, A., Carrasco, M.A., Grez, R., Mora, M. 2004.** Métodos de análisis recomendados para suelos chilenos. Comisión de Normalización y Acreditación. Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo. 113p.
- Schäfer-Landefeld, L., Brandhuber, R., Fenner, S., Koch, H-J., Stockfish, N. 2004.** Effects of agricultural machinery with high axle load on soil properties of normally managed fields. *Soil and Tillage Res.* 75, 75-86.
- Schwertmann, U. 1964.** Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch Extraction mit Ammoniumoxalat-lösung. *Z. Pflanzenernaehr. Bodenkd.* 105, 194-202.
- Seguel, O., Horn, R. 2006.** Structure properties and pore dynamics in aggregate beds due to wetting-drying cycles. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 169, 221-232.
- Shoji, S., Nanzyo, M., Dahlgren, R. A. 1993.** *Volcanic Ash Soils – Genesis, Properties and Utilization.* Elsevier, Amsterdam, 288p.
- Soil Survey Staff, 2006.** *Keys to Soil Taxonomy.* 10th ed. NRCS, Washington DC.
- van Genuchten, M. Th. 1980.** A closed – form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 892-898.
- van Genuchten, M.Th., Leij, F.J. und Yates, S.R. 1991.** The RECT Code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. Report EPA/600/15, U.S. Salinity Laboratory, U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Riverside, California. 83 p.
- Woignier, Th., Pochet, G., Doumenc, H., Dieudonné, P., Duffours, L., 2007.** Allophane: a natural gel in volcanic soils with interesting environmental properties. *J. Sol-Gel Sci. Tecn.* 41, 25-30.