

LA PERMEABILIDAD DEL AIRE Y CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA SATURADA COMO HERRAMIENTA PARA LA CARACTERIZACIÓN FUNCIONAL DE LOS POROS DEL SUELO

José Dörner y Dorota Dec

Instituto de Ingeniería Agraria y Suelos, Universidad Austral de Chile, Casilla 567, Valdivia.
Correo electrónico: josedorner@uach.cl

Air permeability and saturated hydraulic conductivity as a tool for the functional characterization of soil pores

Keywords: Air permeability, soil porosity, pore continuity

ABSTRACT

In order to describe the pore functions of ploughed soils, undisturbed soil samples were collected at two depths and orientations (vertical and horizontal) in structured soils in the Weichselian moraine region in Northern Germany. The water retention curve, air permeability (k_a) and saturated hydraulic conductivity (k_f) were measured. The pore-size distribution, air-filled porosities and pore continuity indices were calculated.

The tillage affects the soil quantitatively and qualitatively. The tillage-induced ploughed pan not only implies a reduction of the pore volume but also causes a direction-dependent behaviour of hydraulic properties through the development of a platy structure. In order to assess these qualitative changes, measurements like k_a and/or k_f are a good tool to describe the physical quality of a soil.

Palabras clave: Permeabilidad del aire, porosidad del suelo, continuidad de poros

RESUMEN

Con el objetivo de describir los aspectos funcionales de los poros de suelos labrados, se recolectaron muestras no disturbadas en dos profundidades y orientaciones (vertical y horizontal) en suelos estructurados del Norte de Alemania. Se determinó la curva de retención de agua, la permeabilidad de aire (k_a) y la conductividad hidráulica en fase saturada (k_f). Se calculó la distribución de poros por tamaño, la porosidad de aire e índices de continuidad de poros.

El manejo agrícola afecta al suelo cuantitativa y cualitativamente. La formación de un pie de arado implica no tan sólo una reducción del volumen de poros sino que también causa una dependencia espacial de las propiedades hidráulicas del suelo a través de la formación de una estructura laminar. Con el objeto de establecer dichos cambios cualitativos, mediciones como k_a y k_f son una buena herramienta para describir la calidad física del suelo.

INTRODUCCIÓN

El suelo es un medio poroso que presenta una fase sólida, líquida y gaseosa (Bear, 1972). En este cuerpo trifásico se produce el almacenamiento y transporte de fluidos como el agua y/o el aire. Es por ello que la caracterización de los poros del suelo es fundamental para conocer su capacidad de almacenamiento y conducción. Dicha caracterización, sin embargo, no debe realizarse solamente a través de sus volúmenes y distribución, sino que también a través de su capacidad para transmitir fluidos. Lo anterior es revelante, especialmente si se pretende caracterizar cualitativamente el medio poroso, es decir, su calidad físico-mecánica, problemática que en los últimos años ha sido discutida por autores como Dexter (2004).

Mediciones de conductividad hidráulica (Ellies *et al.*, 1997, Janssen *et al.*, 2004, Dörner, 2005, Fazekas, 2005) y de permeabilidad de aire (Groenevelt *et al.*, 1984; Ball *et al.*, 1988; Roseberg y McCoy, 1992; Schjønning *et al.*, 2002, Dörner, 2005) han sido utilizadas para evaluar el efecto del manejo sobre la estructura del suelo. Mientras la conductividad depende de las características del fluido y del suelo, la permeabilidad es una propiedad exclusiva del material (Bear, 1972). Por lo tanto, la permeabilidad es una característica propia del medio poroso y de la geometría de los poros (Hillel, 1988). Según Bear (1972) la permeabilidad está estrechamente relacionada con factores geométricos como la porosidad total, la distribución de los poros por tamaño, la forma del sistema poroso, la continuidad y tortuosidad de los poros del suelo. Estos factores geométricos, que pueden ser caracterizados a través de mediciones de permeabilidad de aire, son sensibles a cambios estructurales, por lo tanto, son un buen parámetro para evaluar la calidad física de un suelo.

Los aspectos funcionales del sistema poroso están estrechamente relacionados con las propiedades hidráulicas del suelo que tienen que ver con la transmisión de fluidos (Dörner y Horn, 2006). Estas propiedades están ligadas a la estructura (Hartge y Horn, 1992), por lo que pueden presentar anisotropía (e.g. la conductividad hidráulica vertical es menor que la horizontal).

El comportamiento anisotrópico depende de la

escala, es decir, podemos encontrar anisotropía en la escala del perfil y/o en la escala del horizonte de suelo. Esto se debe a que el suelo presenta heterogeneidades a distintas escalas, por lo tanto, encontraremos distintos valores de conductividad asociados a dichas escalas (Youngs, 1991). Se ha establecido que suelos estratificados presentan una componente horizontal de la conductividad hidráulica mayor que la vertical (Zaslavsky y Rogowski, 1969, Mualem, 1984). En ese caso el volumen total del suelo presenta anisotropía. También ha sido encontrada una dependencia espacial en horizontes individuales de suelo, como lo hicieron Hartge (1984) en un Luvisol bien estructurado, Dabney y Selim (1987) en un Fragipán y Fazekas (2005) en suelos con dominancia de bioporos. En todos esos casos la componente vertical de la conductividad hidráulica era mayor que la horizontal.

La caracterización funcional del sistema poroso es fundamental para entender los procesos de transporte de agua y/o aire, lo que también constituye una herramienta para evaluar la calidad física del suelo. Es por ello que los objetivos de este trabajo son (1) describir el efecto del manejo del suelo sobre la permeabilidad de aire (k_a) y la conductividad hidráulica (k_f) medida en muestras no disturbadas de suelo y (2) analizar la anisotropía de las propiedades hidráulicas del suelo.

MATERIAL Y MÉTODOS

Suelos y manejo

Los suelos estudiados corresponden a Luvisoles (de acuerdo a FAO, 1998) propios del paisaje de morrenas del norte de Alemania. Las muestras de suelo fueron recolectadas el año 2003 en distintas posiciones de dos catenas de suelo (Catena I y Catena II). Los suelos de la Catena I (CI) se manejan desde el año 2001 (anteriormente sujeta a manejo convencional) bajo un sistema conservacionista con trigo (*Triticum aestivum*) y trébol (*Trofolium repens*). La Catena II (CII) fue cultivada con trigo (*Triticum aestivum*) bajo un sistema de manejo convencional.

Cuadro 1: Propiedades física de los suelos estudiados.
Table 1: Physical properties of the studied soils.

Sitio	Profundidad (cm)	Estructura (-)	Arena 2000-63 μm	Limo 63-2 μm	Arcilla <2 μm	PT > 50 μm	PDR 50-10 μm	PDL 10-0,2 μm	PAU < 0,2 μm	PAI	k _f -V	k _f -H
			------(Masa %)			------(Vol. %)			-----			
CIS1	15 [CS]	sub-lam	63,2	27,2	9,6	42,4	8,9	9,7	11,2	12,5	2,48 Aa	2,65 Aa
	30 [PA]	lam	65,4	25,8	8,8	42,8	10,6	7,7	14,0	10,5	2,39 Aa	2,51 Aa
CIS2	15 [CS]	sub	53,6	32,6	13,8	39,9	8,3	8,8	8,6	14,2	2,54 Aa	1,67 Ba
	30 [PA]	lam	57,9	30,5	11,6	37,5	6,7	6,2	9,8	14,8	2,19 Aa	2,34 Ab
CIIS2	15 [CS]	sub	65,2	27,3	7,5	39,3	11,4	5,3	13,5	9,2	2,59 Aa	2,04 Ba
	25 [PA]	lam	65,2	27,3	7,5	38,2	11,0	5,1	12,4	9,8	1,45 Ab	2,33 Ba

PT: Porosidad Total; PDR: Poros de Drenaje Rápido; PDL: Poros de Drenaje Lento; PAU: Poros de Agua Útil; PAI: Poros de Agua Intútil
 CS: Cama de semillas; PA: Pte de arado; sub: subangular; lam: laminar

k_f-V: Conductividad hidráulica saturada Vertical; k_f-H: Conductividad hidráulica saturada Horizontal.

Números en negrita indican diferencias significativas entre las orientaciones de muestreo (vertical v/s horizontal); letras distintas indican diferencias significativas entre profundidades a igual orientación de muestreo ($p \leq 0,05$).

Recolección de las muestras

Se recolectaron muestras no disturbadas de suelo en los horizontes superficiales de los sitios CIS1, CIS2 (Catena I, sitios 1 y 2 respectivamente) y del sitio CIIS2 correspondiente a la Catena II.

Las muestras fueron tomadas en cilindros metálicos de 100cm³ con un equipo neumático en ángulos de 0° (vertical) y 90° (horizontal) con respecto a la superficie del suelo. El equipo neumático permite caracterizar la anisotropía de las propiedades hidráulicas sin alterar la estructura del suelo durante el muestreo. Con las muestras no disturbadas de suelo se determinó la curva de retención de agua (o curva pF, n: 4, n: repeticiones por dirección de muestreo), la permeabilidad de aire (k_a, n: 4) y la conductividad hidráulica en fase saturada (k_f, n: 10).

Determinación de la curva de retención de agua

Las muestras de suelo fueron saturadas con agua por medio de ascenso capilar. La saturación tomó al menos dos días, con el objetivo de evitar inclusiones de aire en los poros del suelo. Posteriormente, las muestras fueron equilibradas a los siguientes potenciales mátricos: -10, -20, -30 hPa en bandejas de arena, -60, -150, -300; -500 hPa en platos cerámicos (método succión) y -15000 hPa en ollas de presión. Una vez que las muestras alcanzaron un equilibrio con el potencial mátrico aplicado, se determinó el contenido de agua. Para determinar la densidad aparente, las muestras se secaron en una estufa a 105°C por al menos 16 horas. Para el cálculo de la porosidad total (PT) se uso un valor de densidad real de 2,65 g cm⁻³.

Determinación de la conductividad del aire

La conductividad del aire (k_i) se midió a potenciales mátricos de -60, -150, -300 y -500 hPa por medio de un método de flujo constante, en donde se aplica una diferencia de presión menor a 1 hPa para permitir un flujo laminar ascendente de aire a través de la muestra de suelo. El equipo cuenta con 5 medidores de flujo de aire con distintas escalas (Key Instruments,

Trevore, USA) que permiten trabajar con un rango de conductividades de aire entre 0,1 a 10 L min⁻¹. Una vez que se alcanzó un flujo de aire constante, se midió la conductividad de aire con el flujómetro de menor escala para asegurar una mayor precisión. Cada medición se repitió 3 veces a la misma diferencia de presión. Durante las mediciones se registraron los cambios en la presión de aire y la temperatura, los que son considerados en los cálculos, tal como lo hicieron Peth (2004), Dörner y Horn (2006) y Dec (2006).

Determinación de la conductividad hidráulica saturada

La determinación de la conductividad hidráulica saturada (k_f) se realizó mediante un permeámetro de Haube bajo condiciones no estacionarias, tal como lo describen Hartge y Horn (1992). Cada medición se repitió 3 veces.

Cálculos

La distribución del espacio poroso se determinó a partir de la curva pF (Hartge y Horn, 1992). El volumen de poros con aire (e_a) se calculó a partir de la curva pF, como la diferencia entre la porosidad total (PT) y el contenido volumétrico de agua a un potencial mátrico conocido. La permeabilidad de aire k_a (μm²) se calculó a partir de la conductividad de aire k_i (cm s⁻¹) de la siguiente manera (1):

$$k_a(\varepsilon_a) = k_i(\varepsilon_a) \cdot \frac{\eta}{\rho_l \cdot g} \quad (1)$$

Donde η es la viscosidad del aire (g s⁻¹ cm⁻¹), ρ_l es la densidad del aire (kg m⁻³) y g es la aceleración de gravedad (m s⁻²).

Con el objetivo de evaluar aspectos funcionales del medio poroso se determinó el siguiente índice de continuidad de poros propuesto por Groenevelt *et al* (1984) :

$$K_1 = \frac{k_a}{\varepsilon_a} \quad (2)$$

Este índice permite evaluar la capacidad que tiene el suelo de transmitir aire. Altos valores

de K_f indican que el medio poroso tiene una alta capacidad para transmitir fluidos debido a una gran continuidad y baja tortuosidad entre los poros (Schjønning *et al*, 1999).

Otros índices que permiten caracterizar la geometría del medio poroso se pueden derivar de la relación entre k_a y ϵ_a como lo proponen Ahuja *et al* (1984) y Ball *et al* (1988) de la siguiente manera:

$$\log(k_a) = \log(M) + N \log(\epsilon_a) \quad (3)$$

Donde M y N son parámetros empíricos. N es un índice de continuidad de poros que refleja el incremento de la permeabilidad del aire en función del aumento de los poros con aire (Ahuja *et al*, 1984, Ball *et al*, 1988). El mismo parámetro representa la disminución de la tortuosidad de los poros y del área superficial con el incremento de la fracción de poros disponibles para el flujo. Un índice que permite estimar el volumen de poros bloqueados (ϵ_b) que no participan del flujo de aire por convección es propuesto por Ball *et al* (1988). Los autores mencionan que suelos que presentan una permeabilidad de aire igual o menor a $1 \mu\text{m}^2$ pueden ser considerados como impermeables; por lo tanto, el intercepto en la abscisa corresponde a un estimador de ϵ_b , tal que:

$$\epsilon_b = 10^{(-\log M)/N} \quad (4)$$

Análisis estadístico

Debido a que los valores de k_f y k_a no presentan una distribución normal, estos fueron transformados a logaritmos tal como lo sugieren Hartge y Horn (1992). Se determinaron los promedios para cada horizonte de suelo y dirección de muestreo. Con el propósito de

determinar un efecto del manejo del suelo como así también de la dirección del muestreo sobre las propiedades analizadas, se realizó un análisis de varianza ($p < 0,05$). Las diferencias entre las medias se determinaron mediante un Test de Tuckey ($p < 0,05$). Los coeficientes de regresión (3) y el volumen de poros bloqueados (4) fueron comparados ($p < 0,05$) de acuerdo a lo propuesto por Sachs (1968).

RESULTADOS

Características generales del suelo

La Cuadro 1 presenta algunas características físicas de los suelos estudiados. En cada uno de los sitios y profundidades de muestreo, destaca la presencia dominante de las fracciones mayores a $63 \mu\text{m}$. Sin embargo, llama a la atención el menor contenido de arena y mayor porcentaje de arcilla en CIS2. Lo anterior, es el reflejo de un proceso erosivo y que ha permitido el afloramiento de un horizonte con un mayor contenido de arcilla, tal como lo señaló Richter (2005). El valor de porosidad más alto alcanza un 43%. En CIIS2 se puede observar una disminución importante del volumen poroso entre la cama de semilla (CS) y el pie de arado (PA), pero que no es estadísticamente significativa. Esta tendencia, que se repite en CIS2, va incluso acompañado con una redistribución de la porosidad.

La cama de semillas presenta una estructura subangular, mientras que a los 25-30cm de profundidad se aprecia una estructura laminar que en CIIS2 es causante de la reducción significativa de k_f (Cuadro 1). La estructura observada es producto de la soltura superficial del suelo y del sucesivo laboreo efectuado hasta los 25-30cm de profundidad. Junto con los cambios estructurales, se puede ver un aumento en la conductividad hidráulica saturada horizontal en desmedro de la vertical.

Permeabilidad de aire

El Cuadro 2 presenta el índice de continuidad de poros K_1 de las muestras recolectadas vertical y horizontalmente con respecto a la superficie del suelo. A 60 hPa de tensión se puede observar que K_1 presenta un comportamiento anisotrópico en ambas profundidades de CIIS2 (manejo convencional), no observándose este fenómeno en los otros sitios muestreados. Esta dependencia espacial, asociada al tipo de estructura (Cuadro 1), desaparece con el incremento del volumen de poros llenos con aire, con la excepción de lo observado a 25cm en CIIS2 a 300 y 500 hPa de tensión. Con una mayor deshidratación de las muestras, se producen variaciones en la capacidad de los poros para transmitir aire por convección, lo que está representado por los cambios de K_1 en función de la tensión de agua. En el manejo convencional se puede observar una reducción significativa de K_1 en profundidad (a partir de 150 hPa de tensión) para las muestras recolectadas verticalmente, lo que no se observa en los sectores que recientemente han sido labrados con un sistema conservacionista. Existen importantes reducciones de K_1 horizontal en CIS1 (al comparar profundidades) y en el horizonte superficial de CIS2 (al comparar direcciones de flujo), pero que no son estadísticamente significativas. Cuando la tensión de agua en el suelo alcanza 60 hPa (equivalente al valor de capacidad de aire o al de los poros de drenaje rápido), el sistema conservacionista

(CI) asegura una mayor funcionalidad de los poros, con valores de K_1 mayores que en el sitio con labranza convencional (CII).

La permeabilidad de aire aumenta con un incremento en el volumen de poros con aire (Figura 1). Dicha función fue ajustada con la ecuación (3) propuesta por Ball *et al* (1988). Los parámetros de la regresión junto con el volumen de poros bloqueados se presentan en el Cuadro 3. En los 15cm (CIIS2) tanto los parámetros de la regresión como ϵ_b presentan un comportamiento anisotrópico lo que está asociado con el arreglo espacial de los agregados subangulares y a la presencia de bioporos. Sin embargo, la dependencia espacial de dichos parámetros ($\epsilon_b\text{-V} > \epsilon_b\text{-H}$, $N\text{-V} > N\text{-H}$) posibilita que k_a llegue a un estado isotrópico cuando el suelo alcanza un mayor grado de deshidratación. Un efecto similar se observa en el pie de arado, representado por el menor volumen de poros bloqueados observado en las muestras recolectadas horizontalmente con respecto a la superficie del suelo. El volumen de poros que no participa del transporte convectivo de aire (ϵ_b) presenta un comportamiento anisotrópico en todas las profundidades estudiadas, lo que demuestra la formación de una fase continua de aire en los poros del suelo que es anisotrópica y que depende de la estructura y de la presencia de bioporos. Con respecto al efecto del manejo sobre la estructura del suelo, sólo en CIS2 se puede observar un efecto significativo sobre los parámetros N y ϵ_b .

Cuadro 2: Índice de continuidad de poros (K_1) para distintas direcciones de muestreo y tensiones de agua.

Table 2: Pore-continuity index (K_1) depending on sampling direction and water tension. v: Vertical; h: Horizontal.

Sitio	Prof.	Dirección	$K_1(60 \text{ hPa})$	$K_1(150 \text{ hPa})$	$K_1(300 \text{ hPa})$	$K_1(500 \text{ hPa})$
	(cm)	(-)	-----($\mu\text{m}^2 \cdot 10^2$)-----			
CIS1	15	V	3,12 Aa	3,28 Aa	3,81 Aa	2,48 Aa
		H	4,46 Aa	4,10 Aa	4,13 Aa	3,91 Aa
	30	V	3,15 Aa	2,43 Aa	2,61 Aa	2,18 Aa
		H	1,92 Aa	1,68 Aa	1,75 Aa	1,79 Aa
CIS2	15	V	4,41 Aa	3,43 Aa	4,47 Aa	4,15 Aa
		H	0,86 Aa	0,65 Aa	0,69 Aa	0,78 Aa
	30	V	1,59 Aa	1,41 Aa	1,68 Aa	2,18 Aa
		H	1,63 Aa	1,51 Aa	1,54 Aa	1,59 Aa
CIIS2	15	V	0,44 Aa	2,72 Aa	3,19 Aa	3,78 Aa
		H	1,43 Ba	2,43 Aa	2,56 Aa	2,65 Aa
	25	V	0,26 Aa	0,89 Aa	0,87 Ab	0,80 Ab
		H	1,83 Ba	1,80 Ab	2,31 Ba	2,20 Ba

Para cada sitio: las diferencias significativas ($p \leq 0,05$) para los valores de K_1 vertical y horizontal a una misma profundidad de muestreo y tensión de agua están indicadas por medio de letras mayúsculas distintas. La diferencias significativas ($p \leq 0,05$) para los valores de K_1 entre profundidades a igual dirección, sitio de muestreo y tensión de agua están indicadas por medio de letras minúsculas distintas.

Cuadro 3: Índices de continuidad y volumen de poros bloqueados en función de la dirección de muestreo.

Table 3: Pore-continuity index and volume blocked porosities as a function of the sampling direction.

Sitio	Prof.	Dirección	$K_1(60 \text{ hPa})$	$K_1(150 \text{ hPa})$	$K_1(300 \text{ hPa})$	$K_1(500 \text{ hPa})$
	(cm)	(-)	-----($\mu\text{m}^2 10^2$)-----			
CIS1	15	V	3,12 Aa	3,28 Aa	3,81 Aa	2,48 Aa
		H	4,46 Aa	4,10 Aa	4,13 Aa	3,91 Aa
	30	V	3,15 Aa	2,43 Aa	2,61 Aa	2,18 Aa
		H	1,92 Aa	1,68 Aa	1,75 Aa	1,79 Aa
CIS2	15	V	4,41 Aa	3,43 Aa	4,47 Aa	4,15 Aa
		H	0,86 Aa	0,65 Aa	0,69 Aa	0,78 Aa
	30	V	1,59 Aa	1,41 Aa	1,68 Aa	2,18 Aa
		H	1,63 Aa	1,51 Aa	1,54 Aa	1,59 Aa
CIS2	15	V	0,44 Aa	2,72 Aa	3,19 Aa	3,78 Aa
		H	1,43 Ba	2,43 Aa	2,56 Aa	2,65 Aa
	25	V	0,26 Aa	0,89 Aa	0,87 Ab	0,80 Ab
		H	1,83 Ba	1,80 Ab	2,31 Ba	2,20 Ba

v: Vertical; h: Horizontal; ϵ_b : volumen de poros bloqueados

Para cada sitio: las diferencias significativas ($p \leq 0,05$) para cada uno de los parámetros entre las direcciones de muestreo (vertical y horizontal) a una misma profundidad están indicadas por medio de letras mayúsculas distintas; las diferencias significativas ($p \leq 0,05$) para los parámetros entre profundidades a igual dirección y sitio de muestreo están indicadas por medio de letras minúsculas distintas.

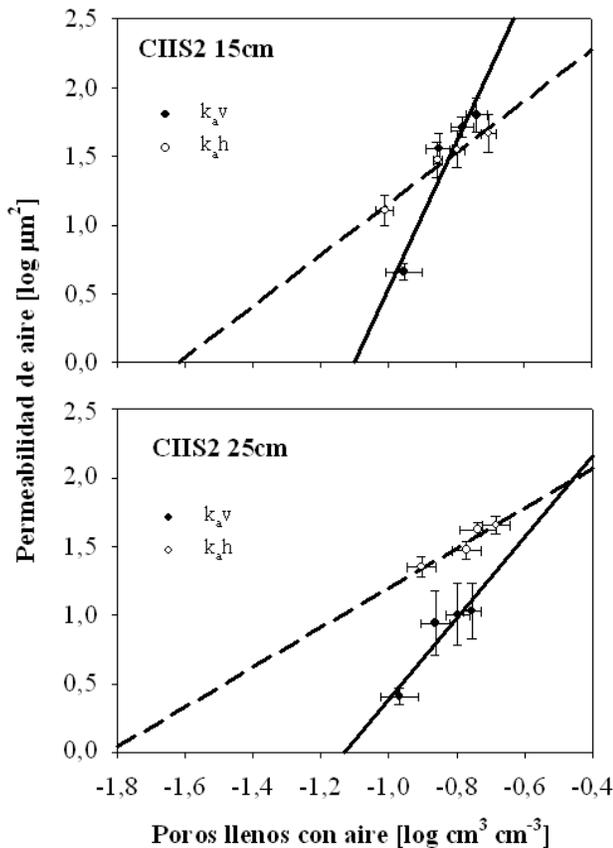


Figura 1: Permeabilidad de aire en función del volumen de poros llenos con aire (barras indican 1 error estándar, n=4).

Figure 1: Air permeability as a function of air-filled porosity volume (bars indicate 1 standard error, n=4).

Conductividad hidráulica

En el Cuadro 1 se puede observar que k_f presenta anisotropía. La Figura 2 presenta los valores de k_f en función del volumen de distintas fracciones de poros. Los valores corresponden a muestras individuales, que primero se utilizaron para medir la curva pF y luego se saturaron para determinar k_f . Se observa que, para las distintas fracciones de poros, los coeficientes de correlación son menores a 0,35. Además, se desprende que la

conductividad hidráulica en fase saturada esta mejor relacionada con la porosidad efectiva (P_e), definida Brooks y Corey (1964) como el volumen de poros que contribuye principalmente en el movimiento de agua en fase saturada (PDR+PDL). La Figura 3 muestra que, a pesar que P_e es isotropico, k_f presenta dependencia espacial, lo que está estrechamente ligado con la estructura que presenta el suelo (Cuadro 1) que en este caso tiene un origen antropogénico.

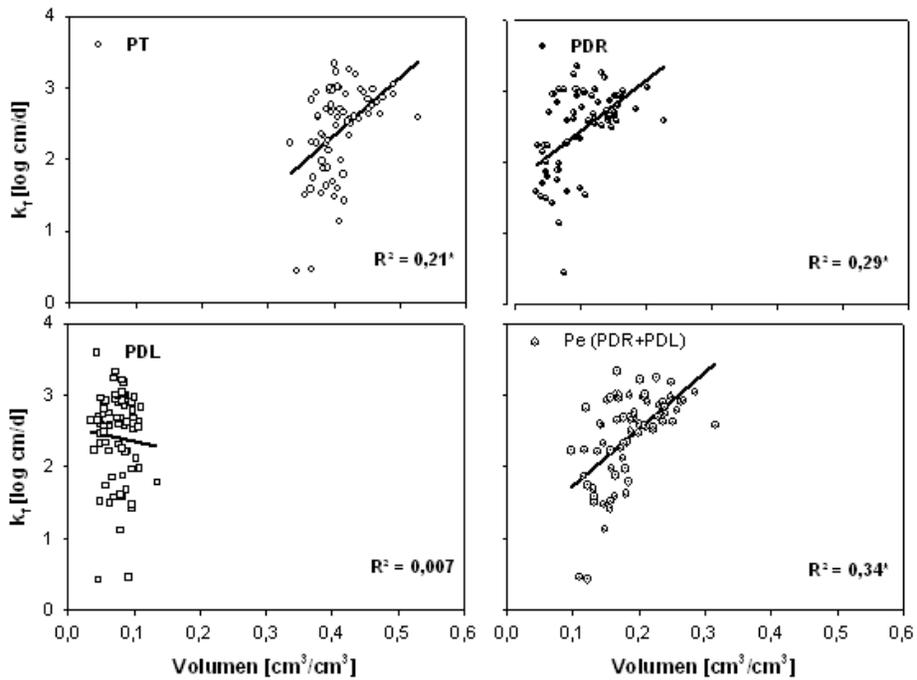


Figura 2: Conductividad hidráulica saturada en función del volumen de poros (*: significativo con $p < 0,05$).
Figure 2: Saturated hydraulic conductivity as a function of the pore volume (*: significant with $p < 0,05$).

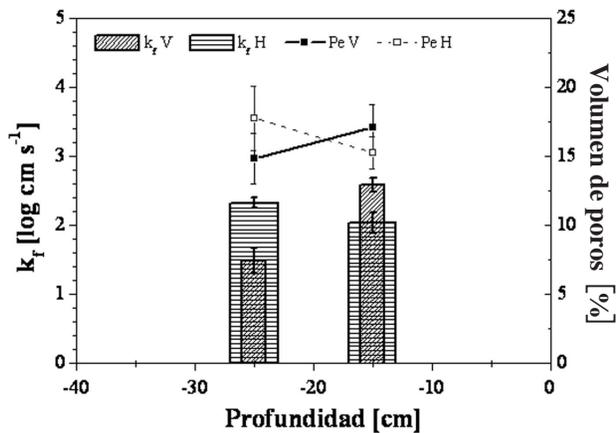


Figura 3: Conductividad hidráulica saturada y porosidad efectiva (Pe) dependiendo de la dirección de muestreo (barras indican 1 error estándar, $n=4$ para Pe y $n=10$ para k_f).
Figure 3: Saturated hydraulic conductivity and effective porosity depending on sampling direction (bars indicate 1 standard error, $n=4$ for Pe and $n=10$ for k_f).

DISCUSIÓN

La permeabilidad de aire ha sido utilizada por varios autores para evaluar el efecto del manejo sobre la geometría del medio poroso (Groenevelt *et al*, 1984; Ball *et al*, 1988; Roseberg y McCoy, 1992; Schjønning *et al*, 2002). Sin embargo, muy pocos trabajos (e.g. Ball, 1981; Dörner y Horn, 2006) la han utilizado como parámetro para evaluar la calidad física del suelo o para determinar si las propiedades hidráulicas del suelo presentan un comportamiento anisotrópico, lo que es relevante para modelación de procesos de transporte en el suelo. Generalmente, en la modelación de procesos de transporte, se asume que la estructura del suelo es isotrópica y homogénea. Esta simplificación permite una solución matemática simple de los problemas hidrológicos, pero que va en desmedro de la realidad. La gran cantidad de muestras requeridas para caracterizar la dependencia espacial, como así también, los problemas que ocurren durante el muestreo, son los principales inconvenientes a la hora de realizar este tipo de aproximaciones como ya lo mencionan Dörner y Horn (2006). Con los resultados presentados se puede establecer que el sobrelaboreo del suelo provoca no tan sólo la compactación de éste y la formación de una estructura laminar, nociva para el desarrollo vegetal (e.g. disminución de la elongación de las raíces por un incremento en la densidad aparente y resistencia a la penetración, Taylor y Brar, 1991), sino que también producto de ella se generan vías preferenciales para el flujo de agua y/o aire (Stormont, 1995). Si se considera que el volumen como escalar es isotrópico, se puede atribuir (como así también se demuestra con los resultados de los Cuadros 2 y 3) que la anisotropía está estrechamente ligada a la continuidad del medio poroso y ésta, al mismo tiempo, depende del tamaño y forma de los agregados que conforman un horizonte en particular. Estos resultados fueron encontrados tanto en k_f como en los parámetros de continuidad derivados de la permeabilidad de aire (N y ϵ_b). Agregados

dispuestos horizontalmente, como los presentes en un pie de arado, permiten un mayor flujo entre las laminas y no a través de ellas. Agregados que presentan ejes de similar longitud, como los subangulares, deberían presentar un comportamiento isotrópico. Sin embargo, lo anterior no siempre ocurre, debido a la presencia de remanentes de una estructura prismática original (e.g. en un horizonte Bt como se señala en Dörner y Horn 2006) o a la presencia de bioporos (Fazekas, 2005). Anisotropía en k_f ha sido demostrada previamente por Dabney y Selim (1987). Ellos demostraron que en el horizonte Btx1 de un Fragipán, $k_f\text{-V} > k_f\text{-H}$ debido a la presencia de bloques de orientación vertical con una porosidad vesicular que actúa como barrera para el movimiento lateral de agua. Se pudo demostrar que aspectos funcionales de los poros representados por su capacidad para transmitir agua están mejor relacionados con el volumen de macroporos (PDR+PDL). La misma tendencia ha sido establecida por Ahuja *et al* (1984), Peth (2004) y Fazekas (2005). Sin embargo, llama la atención los bajos valores del coeficiente de correlación (Figura 2), lo que indicaría que más que el volumen de poros, la continuidad que existe entre ellos es fundamental para que estos puedan conducir agua y/o aire. Lo anterior permite resaltar que aun más importante que el volumen de macroporos que presente un suelo, es la capacidad que estos tengan para transmitir un fluido, lo que está estrechamente ligado con la continuidad de los poros entre los agregados del suelo. Por lo tanto, la permeabilidad es un parámetro que se debe tomar en cuenta a la hora de definir la calidad física de un suelo.

CONCLUSIONES

La anisotropía de las propiedades hidráulicas esta estrechamente ligada a la estructura del suelo y a la fracción de los poros conductores. La formación de un pie de arado producto de araduras sucesivas a una misma profundidad

trae consigo no tan sólo una reducción del volumen poroso y de la conductividad, sino que también puede dar origen a flujos preferenciales de agua. Los aspectos funcionales del sistema poroso no pueden ser inferidos adecuadamente con mediciones que registren sólo el volumen de los poros. En ese sentido, la permeabilidad de aire es un buen parámetro para caracterizar funcionalmente a los poros del suelo.

AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece al DAAD (Servicio Alemán de Intercambio Académico) por el financiamiento de una beca de doctorado en la Universidad Christian Albrechts de Kiel.

BIBLIOGRAFÍA

- AHUJA, L.R., NANEY, J.W., GREEN, R.E. Y NIELSEN, D.R. 1984. Macroporosity to characterize spatial variability of hydraulic conductivity and effects of land management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 699-702.
- BALL, B.C. 1981. Pore characteristics of soils from two cultivation experiments as shown by gas diffusivities and permeabilities and air-filled porosities. *J. of Soil Sci.* 32: 483-498.
- BALL, B.C., O'SULLIVAN, M.F. y HUNTER, R. 1988. Gas diffusion, fluid flow and derived pore continuity indices in relation to vehicle traffic and tillage. *J. Soil Sci.* 39: 327-339.
- BEAR, J., 1972. *Dynamics of Fluids in Porous Media*. Elsevier, New York, 764 p.
- BROOKS, R.H. y COREY, A.T. 1964. Hydraulic properties of porous media. Hydrology paper 3. Colorado State University, Fort Collins.
- DABNEY, S.M. y SELIM, H.M. 1987. Anisotropy of a fragipan soil: vertical vs. horizontal hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51: 3-6.
- DEC, D. 2006. Thermal properties in Luvisols under conventional and conservation tillage treatment. Tesis Doctorado en Ciencias Agrarias, Universidad Christian Albrechts de Kiel, Nr. 71, 166 p. ISBN: 0933-680 X.
- DEXTER, A. R. 2004: Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effect on root growth. *Geoderma* 120, 201-214.
- DÖRNER, J.M. 2005: Anisotropie von Bodenstrukturen und Porenfunktionen in Böden und deren Auswirkungen auf Transportprozesse im gesättigten und ungesättigten Zustand. Tesis Doctorado en Ciencias Agrarias, Universidad Christian Albrechts de Kiel, Nr. 68, 182 p. ISBN: 0933-680 X.
- DÖRNER, J. y HORN, R. 2006. Anisotropy of pore functions in structured Stagnic Luvisols in the Weichselien moraine region in N Germany. *J. Plant. Nutr. Soil Sci.* 169: 213-220.
- ELLIES, A., GREZ y RAMIREZ, C. 1997. La conductividad hidráulica en fase saturada como herramienta para el diagnóstico de la estructura del suelo. *Agro Sur* 25(1): 51-56.
- FAO. 1998. World Reference Base for Soil Resources. World Soil Resources Report 84, Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rome.
- FAZEKAS, O. 2005. Bedeutung von Bodenstruktur und Wasserspannung als stabilisierende Kenngrößen gegen intensive mechanische Belastungen in einer Parabraunerde aus Löss unter Pflug- und Mulchsaat. Tesis Doctorado en Ciencias Agrarias, Universidad Christian Albrechts de Kiel, Nr. 67, 170 p. ISBN: 0933-680 X.
- GROENEVELT, P.H., KAY, B.D. y GRANT, C.D. 1984. Physical assessment of a soil with respect to rooting potential. *Geoderma* 34: 101-114.

- HARTGE, K.H. 1984. Vergleich der Verteilungen der Wasserleitfähigkeit und des Porenvolumens von waagrecht und senkrecht entnommenen Stechzylinderproben. *Zeitschrift für Pflanzenernähr. und Bodenkunde* 147: 316–323.
- HARTGE, K.H. y HORN, R. 1992. Die physikalische Untersuchung von Böden. Ferdinand Enke Verlag, 3. Auflage, Stuttgart, p. 177.
- HILLEL, D. 1998. *Environmental Soil Physics*. Academic press, London, p. 771.
- JANSSEN, I., KRUEMMELBEIN, J., HORN, R. y ELLIES, A. 2004. Propiedades físicas e hidráulicas de suelos Nádís en el sur de Chile. Comparación entre suelos no labrados y bajo labranza. *Rev. de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal* 1: 14-28
- MUALEM, Y. 1984. Anisotropy of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 505-509.
- PETH, S. 2004. Bodenphysikalische Untersuchungen zur Trittbelastung von Böden bei der Rentierweidewirtschaft an borealen Wald- und subarktisch-alpinen Tundrenstandorten. Tesis Doctorado en Ciencias Agrarias, Universidad Christian Albrechts de Kiel, Nr. 64, 160 p. ISBN: 0933-680 X.
- RICHTER, F.H. 2005. Vergesellschaftung und Eigenschaften von Böden unterschiedlicher geomorphe Einheiten einer Jungmoränenlandschaft des ostholsteinischen Hügellandes. Tesis Doctorado en Ciencias Agrarias, Universidad Christian Albrechts de Kiel, Nr. 66, 132 p. ISBN: 0933-680 X.
- ROSEBERG, R.J. y MCCOY, E.L. 1992. Tillage-traffic-induced changes in macroporosity and macropore continuity: Air permeability assessment. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 1261.1267.
- SACHS, L. 1968. *Statistische Auswertungsmethoden*. Springer-Verlag Berlin, p. 671.
- SCHJØNNING, P., THOMSEN, I.K., MØBERG, J.P., DE JONGE, H., KRISTENSEN, K., CHRISTENSEN, B. 1999. Turnover of organic matter in differently textured soils. I. Physical characteristics of structurally disturbed and intact soils. *Geoderma*: 89, 177-198.
- SCHJØNNING, P., MUNKHOLM, L.J., MOLDRUP, P., y JACOBSEN, O.H. 2002. Modelling soil pore characteristics from measurements of air exchange: the long term effects of fertilization and crop rotation. *Eur. J. Soil Sci.* 53: 331-339.
- STORMONT, J.C. 1995. The effect of constant anisotropy on capillary barrier performance. *Water Resour. Res.* 24: 770-778.
- TAYLOR, H.M. y BRAR, G.S. 1991. Effect of soil compaction on root development. *Soil and Tillage Research* 19: 111-119.
- YOUNGS, E.C. 1991. Hydraulic conductivity of saturated soils, in: K.A. Smith and C.E. Mullins (eds.): *Soil Analysis – Physical Methods*. Marcel Dekker, New York, p. 161-207.
- ZASLAVSKY, D. y ROGOWSKI, A.S. 1969. Hydrologic and morphologic implications of anisotropy and infiltration in soil profile development. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 33: 594-599.