



XXIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo

Suelos... Huellas del pasado, desafíos del futuro

San Fernando del Valle de Catamarca,
Prov. de Catamarca, Argentina
21 al 24 de mayo de 2024



TRANSPORTE VERTICAL DE UN SOLUTO INERTE EN DOS SUELOS DE SANTIAGO DEL ESTERO

Mas, L. I.^{1,*}, Aparicio, V. C.², Alconada Magliano, M.³, De Geronimo, E.²

¹ EEA INTA Quimilí; ² EEA INTA Balcarce; ³ Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales - UNLP; * Ruta Provincial 6, km 14, (3740) Quimilí, Prov. de Santiago del Estero, mas.laura@inta.gob.ar

RESUMEN: El transporte de agua a través del suelo se puede estudiar mediante ensayos en los que se analiza el movimiento de un soluto no reactivo a través de columnas y se estiman los parámetros de transporte. En este trabajo se analizó el tránsito de bromuro de potasio en dos suelos de la provincia de Santiago del Estero con el objetivo de caracterizarlo e identificar diferencias entre ellos. Se utilizaron columnas de suelo sin disturbar de los horizontes A, Bt1, Bt2 y Ck de un suelo Argiustol típico y A, AC y C de un Haplustol éntico. Las curvas de paso se ajustaron con el paquete CXTFIT, con el que se estimaron los parámetros coeficiente de dispersión hidrodinámica (D), dispersividad (λ), contenido de agua móvil (β) y coeficiente de transferencia de masa (ω), analizando la relación entre estos parámetros y las propiedades edáficas. En ambos suelos el movimiento de agua estuvo gobernado por condiciones de no equilibrio físico. Se demostró la ocurrencia de flujo preferencial a través de macroporos y la difusión intra-agregados. Los horizontes con mayor D y λ fueron los horizontes A de ambos suelos. Los horizontes Bt1 y Bt2 del Argiustol típico exhibieron valores menores que el horizonte A para ambos parámetros, demostrando que la propiedad edáfica más destacada en cuanto a la mejor estructuración y mayor tendencia al flujo preferencial no fue el contenido de arcilla, sino el carbono orgánico. Las variaciones en los parámetros de transporte acompañaron los cambios en los porcentajes de arena y limo más que los de arcilla, con excepción de v , que no difirió entre suelos ni horizontes.

PALABRAS CLAVE: transporte vertical, bromuro de potasio.

INTRODUCCION

Comprender los mecanismos de transporte del agua que pueden ocurrir en el suelo es fundamental para poder determinar el potencial de contaminación de un plaguicida (Zhou et al., 2010). Una forma de simular el transporte de agua a través del suelo son los estudios de lixiviación en los que se evalúa el movimiento de un soluto no reactivo a través de columnas de suelo sin disturbar y a partir de allí se estiman los parámetros de transporte, tales como la velocidad (v), el coeficiente de dispersión (D) y la dispersividad (λ) (Álvarez-Benedí et al., 1999). El uso de estos trazadores inertes permite identificar diferencias entre el comportamiento de transporte de sustancias reactivas y el movimiento del agua (Banzhaf & Hebig, 2016).

Con el fin de evaluar las diferencias en el transporte de agua entre los principales horizontes de dos suelos representativos del este de Santiago del Estero, se realizó un ensayo con bromuro de potasio (Br^-) como soluto inerte en columnas sin disturbar de los horizontes A, Bt1, Bt2 y Ck de un suelo Argiustol típico (AT) y A, AC y C de un Haplustol éntico (HE).

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en laboratorio siguiendo la metodología de Okada et al. (2014). Las columnas presaturadas se conectaron a una bomba peristáltica alimentada con una solución de CaCl_2 0,01 M y a una cámara de vacío, dentro de la cual había un colector de fracciones.



Se inyectó un pulso de una solución de Br⁻ equivalente a una dosis de 150 kg ha⁻¹. Las muestras se recolectaron cada 30 ml y en ellas se determinó la concentración de Br⁻ con un electrodo selectivo para iones (Orion EA940).

La concentración relativa de Br⁻ (C/C₀) es el cociente entre la concentración del efluente (C) y la inyectada en el pulso (C₀). Al graficarla en función del número de volúmenes de poros (VP) se obtienen las curvas de paso (CP). Partiendo de las CP se estimaron los parámetros dispersión hidrodinámica (D), coeficiente de partición entre las regiones de equilibrio y no equilibrio (β) y el coeficiente de transferencia de masa (ω), utilizando el paquete CXTFIT (Šimůnek et al., 1999). Este paquete aplica la Ecuación Convección-Dispersión (ECD) para estimar los parámetros de transporte, e incluye dos modelos: el de equilibrio (ECD_{eq}) y el de no equilibrio (ECD_{neq}) (Parker & van Genuchten, 1984). Aquí se aplicó el modelo ECD_{neq} físico. Dado que el Br⁻ no reacciona con la matriz edáfica, el factor de retardo R se consideró 1 (Bedmar et al., 2008). La dispersividad (λ) se calculó según Vanderborght & Vereecken (2007). Los resultados se analizaron mediante modelos lineales mixtos con el programa Infostat (Di Rienzo et al., 2020), se compararon las medias con la prueba DGC (Di Rienzo et al., 2002), y se realizaron matrices de correlación entre los parámetros y las propiedades edáficas.

RESULTADOS Y DISCUSION

Características de los suelos

En las Tablas 1 y 2 se presentan las características químicas y físicas de los suelos estudiados. Puede observarse que las principales diferencias entre suelos se refieren al pH, carbono orgánico (CO), Mg⁺⁺, densidad aparente (Dap) y a los contenidos de arcilla y limo.

Tabla 1. Características químicas de los suelos bajo estudio.

Suelo	Hz	Prof. (cm)	C _e	pH (cm)	CO (%)	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	CIC
						(cmol kg ⁻¹)				
AT	A	0-21	0,53 b	6,16 d	1,39 a	11,84 b	4,46 c	0,40 b	1,86 b	25,40 a
	Bt1	33-60	0,44 b	6,70 c	0,40 c	14,18 a	5,38 b	0,77 b	1,74 b	26,80 a
	Bt2	60-95	0,71 b	7,25 c	0,14 d	14,40 a	6,24 a	1,02 b	2,25 a	27,78 a
	Ck	116-145	1,24 a	8,40 a	0,09 d	-	5,91 a	2,40 a	1,90 b	12,74 c
HE	A	0-27	0,61 b	7,09 c	1,15 a	16,29 a	3,60 d	0,45 b	2,25 a	27,78 a
	AC	27-50	0,58 b	7,51 b	0,62 b	16,26 a	4,22 c	0,29 b	1,95 b	25,93 a
	C	50-90	0,62 b	7,82 a	0,36 c	15,30 a	4,14 c	0,40 b	1,99 b	24,41 b

Letras diferentes indican diferencias significativas entre horizontes (p<0,05), según test DGC. C_{E_e}: conductividad eléctrica del extracto de saturación; CO: carbono orgánico; CIC: capacidad de intercambio catiónico.

Tabla 2. Características físicas de los suelos bajo estudio.

Suelo	Hz	Prof. (cm)	Arcilla	Limo	Arena	Dap
			(%)	(%)	(%)	(g cm ⁻³)
AT	A	0-21	27,14 b	58,79 a	14,19 c	1,16 b
	Bt1	33-60	30,73 a	54,49 b	14,77 c	1,33 a
	Bt2	60-95	31,85 a	52,03 b	16,25 c	1,28 a
	Ck	116-145	14,03 d	53,44 b	29,83 a	1,21 a
HE	A	0-27	26,60 b	59,60 a	13,57 c	1,30 a
	AC	27-50	24,48 c	62,56 a	13,04 c	1,15 b
	C	50-90	16,71 d	61,96 a	21,39 b	1,14 b

Letras diferentes indican diferencias significativas entre horizontes (p<0,05), según test DGC. Dap: densidad aparente.

Curvas de paso

En las Figuras 1 y 2 se muestran las CP obtenidas experimentalmente y aquéllas ajustadas mediante el CXTFIT. Puede observarse que los picos de concentración máxima se dieron siempre antes de un 1 VP. Los picos en el suelo AT se manifestaron antes que los de HE: las máximas concentraciones de Br⁻ se presentaron en promedio a los 0,26, 0,38, 0,38 y 0,64 VP para los horizontes A, Bt1, Bt2 y Ck del suelo AT y a los 0,47, 0,64 y 0,44 VP para los horizontes A, AC y C del suelo HE, respectivamente.

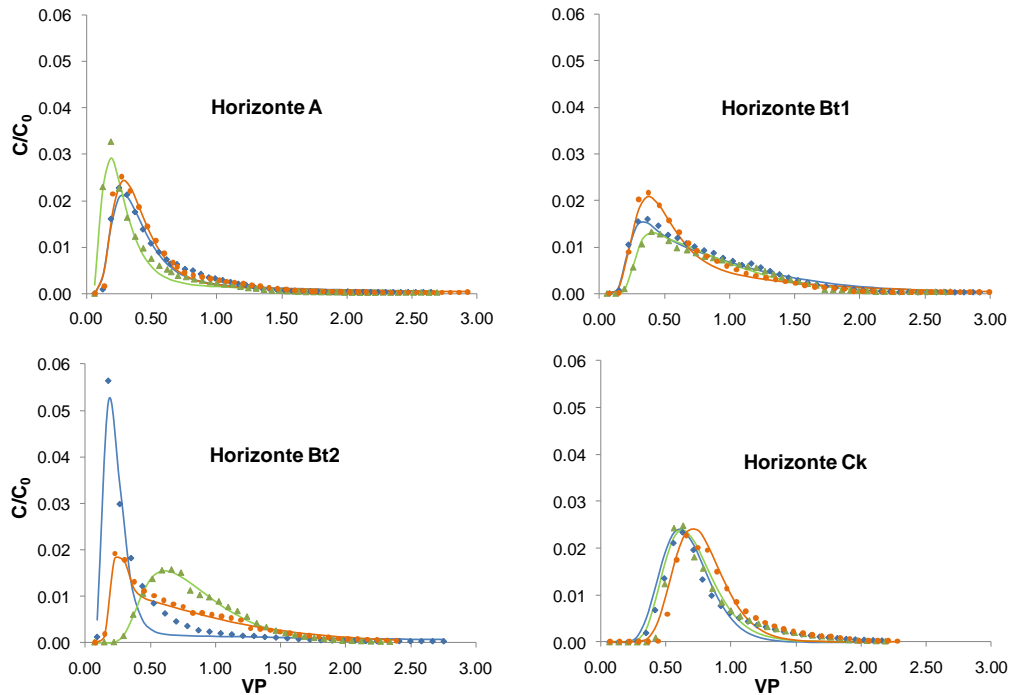


Figura 1. Curvas de paso de Br⁻ para los horizontes del suelo AT. Los símbolos representan las curvas de paso de las columnas y las líneas continuas, el ajuste obtenido con el CXTFIT.

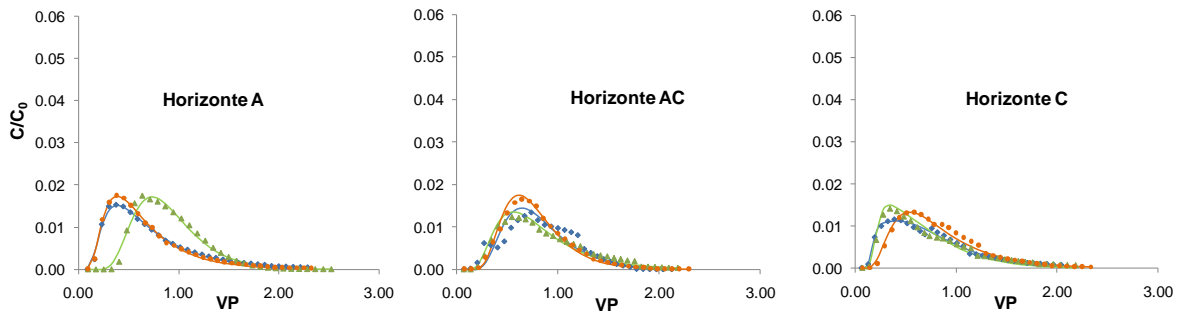


Figura 2. Curvas de paso de Br⁻ para los horizontes del suelo HE. Los símbolos representan las curvas de paso de las columnas y las líneas continuas, el ajuste obtenido con el CXTFIT.

Los picos tempranos de concentración de Br⁻ son evidencia de flujo preferencial, y sumados a la forma asimétrica de las CP y su larga cola indican condiciones de transporte de no equilibrio (Bedmar et al., 2008). El flujo a través de los macroporos es en general la principal causa de aparición temprana del soluto y la difusión intra-agregados provoca las largas colas de elución presentes en las columnas (Ersahin et al., 2002). A esto se suma que los sistemas de labranza conservacionista promueven la formación de macroporos continuos, favoreciendo el flujo preferencial de agua y solutos (Okada et al., 2014).

Parámetros de transporte

Los parámetros de transporte obtenidos experimentalmente (v) y ajustados a partir de las CP (D , β , ω y λ) se presentan en la Tabla 3, junto con el ajuste de los modelos (R^2).

Tabla 3. Parámetros de transporte de Br⁻ ajustados con el modelo ECD_{neq} físico.

Suelo	Hz	v (mm h ⁻¹)	D (mm ² h ⁻¹)	β (adimensionales)	ω	λ (mm)	R^2
AT	A	8,71 a	176,67 a	0,50 b	0,34 b	20,17 a	0,97-0,98
	Bt1	8,16 a	84,47 b	0,52 b	1,44 b	10,09 b	0,98-0,99
	Bt2	8,88 a	64,94 b	0,43 b	1,28 b	7,29 b	0,95-0,99
	Ck	9,94 a	52,96 b	0,75 a	73,42 a	5,34 b	0,90-0,93
HE	A	8,61 a	213,81 a	0,87 a	0,004 c	25,05 a	0,98-0,99
	AC	8,62 a	130,10 a	0,99 a	0,02 c	15,22 b	0,83-0,99
	C	9,23 a	119,27 a	0,63 a	1,65 b	13,24 b	0,97-0,98

Letras diferentes indican diferencias significativas entre horizontes ($p < 0,05$), según test DGC. v : velocidad del agua de los poros; D : coeficiente de dispersión hidrodinámica; β : fracción de agua móvil; ω : coeficiente de transferencia de masa entre el agua móvil e inmóvil; λ : dispersividad.

La velocidad del agua de los poros (v) no mostró diferencias significativas, aunque presentó una tendencia a aumentar en profundidad en ambos suelos. En cambio, el coeficiente de dispersión hidrodinámica (D), si bien fue elevado en todos los casos, permitió separar ambos suelos ya que los horizontes del suelo HE presentaron valores significativamente más altos que los horizontes Bt1, Bt2 y Ck del suelo AT, mientras que el horizonte A del AT fue estadísticamente similar al suelo HE. Los mayores valores de D se asociaron con los horizontes de mayor CO (los horizontes A), pero no con los que poseían los mayores contenidos de arcilla (Bt1 y Bt2), indicando que el contenido de CO tuvo mayor peso en el comportamiento hidrodinámico de los horizontes.

Los menores valores de la fracción de agua móvil (β) se encontraron en los horizontes A, Bt1 y Bt2 del suelo AT, que difirieron de los horizontes Ck de ese suelo y los tres del HE. Esta diferencia en el suelo AT puede deberse a una distribución del tamaño de poros más homogénea en el horizonte Ck y a su estructura masiva lo que determinó una mayor fracción de agua móvil (Bedmar et al., 2008), mientras que los bajos valores de los otros horizontes se asociaron a un flujo preferencial debido a la porosidad generada por su textura más arcillosa (Okada et al., 2014). Por su parte, los tres horizontes del suelo HE no difirieron entre sí, aunque el mayor valor de β que se determinó para el horizonte AC indicaría que en este horizonte casi toda el agua es móvil y el no equilibrio físico tendría un impacto menor en la migración de solutos, permaneciendo sólo una pequeña parte de agua en la fase inmóvil (Montoya et al., 2006).

El coeficiente de transferencia de masa entre el agua móvil e inmóvil (ω) varió significativamente entre suelos y horizontes, indicando una mayor transferencia de masa a mayor valor de ω y por lo tanto una atenuación del fenómeno de no equilibrio, posiblemente debido a un mayor tiempo de residencia del soluto en ese horizonte (Ersahin et al., 2002).

La dispersividad (λ) generalmente es mayor en suelos estructurados con textura fina porque los pequeños poros texturales son efectivos para dispersar el soluto (Thevenot & Dousset, 2015). Sin embargo, los mayores valores de λ no se dieron en los horizontes más arcillosos, sino en los horizontes A de ambos suelos, que presentan mayor contenido de CO. Los horizontes subsuperficiales presentaron λ menores y estadísticamente similares entre sí, con una tendencia a disminuir en profundidad y a mayores valores de λ en los horizontes AC y C del suelo HE, que poseen menor contenido de arcilla, pero menor porcentaje de arena y más limo que los horizontes subsuperficiales de AT. Una mayor dispersividad indica un sistema de poros más heterogéneo o longitudes de trayectoria del flujo más largas (Shaw et al., 2000) y valores por encima de 10 mm indican que el transporte de Br⁻ es dominado por la dispersión (Ersahin et al., 2002).

Relación con las propiedades edáficas

El parámetro v se correlacionó positivamente con CE_e , pH y contenido de arena, pero negativamente con CIC y contenido de arcilla. Esto puede explicarse por el hecho de que, aunque no hubo diferencias significativas entre horizontes ni suelos, v tendía a aumentar en los horizontes más profundos, que presentaban los valores más altos de CE_e , pH y arena, y los menores de CIC y arcilla. Shaw et al. (2000) encontraron una correlación positiva entre v y el contenido de arena y negativa con la arcilla en suelos del sureste de EEUU. Al contrario, otros trabajos encontraron correlaciones positivas entre v y el porcentaje de arcilla (Bedmar et al., 2008; Okada et al., 2014). D se correlacionó positivamente con el contenido de CO y el porcentaje de limo, mientras que presentó una correlación negativa con el contenido de Mg^{2+} y el porcentaje de arena. Un mayor contenido de CO favorece la estructuración del suelo y la formación de mayor cantidad de poros al actuar como agente aglutinante en la formación de agregados (Schnitzer, 1999) que facilita una mayor dispersión del soluto (Ersahin et al., 2002). En cambio, un aumento en el porcentaje de arena tiene el efecto contrario, ya que provoca un desarrollo más pobre de la estructura (Shaw et al., 2000). λ se correlacionó con los mismos parámetros que D , ya que al calcularse a partir de éste, ambos presentan una altísima correlación entre sí. β sólo se correlacionó positivamente con los contenidos de Ca^{2+} y limo, mientras que ω exhibió correlaciones positivas con Mg^{2+} , Na^+ y el contenido de arena, y negativas con CO, CIC y porcentaje de limo. Existe poca bibliografía reportando la relación de estos parámetros con las propiedades edáficas: se han determinado correlaciones negativas entre β y los contenidos de arcilla y CO, y correlaciones positivas con el porcentaje de arena (Bedmar et al., 2008; Shaw et al., 2000).

CONCLUSIONES

En ambos suelos el movimiento de agua estuvo gobernado por las condiciones de no equilibrio físico. Los picos anteriores a un VP demuestran la ocurrencia de flujo preferencial a través de macroporos mientras que las largas colas de elución presentes dan cuenta de la difusión intra-agregados del agua junto con el trazador inerte.

Además de las diferencias encontradas entre suelos, las variaciones en los parámetros de transporte entre los horizontes de cada suelo indicaron que los procesos de transporte no fueron uniformes a lo largo del perfil. Los horizontes con mayor D y λ , o sea con las condiciones más marcadas de transporte dispersivo, fueron los horizontes A de ambos suelos. Contrariamente a lo esperado, los horizontes Bt1 y Bt2 del suelo AT exhibieron para ambos parámetros valores menores que el horizonte A, demostrando que la propiedad edáfica más destacada en cuanto a su papel en la generación de una mejor estructura y una mayor tendencia hacia el flujo preferencial no fue el contenido de arcilla, sino el CO. De hecho, las variaciones en los parámetros de transporte acompañaron a los cambios en los porcentajes de arena y limo más que a los de arcilla.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte de la Tesis de Doctorado en la Escuela de Posgrado de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata, de la primera autora, y fue financiado con fondos otorgados por el Programa de Formación de Posgrado del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.

BIBLIOGRAFIA

- Álvarez-Benedí, J., Isla, T., Cartón, A., & Bolado, S. (1999). Efecto de la velocidad de flujo en los parámetros de transporte de solutos. *Estudios de La Zona No Saturada Del Suelo*, 1995, 157–161.
- Banzhaf, S., & Hebig, K. H. (2016). Use of column experiments to investigate the fate of organic micropollutants - a review. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(9), 3719–3737.
- Bedmar, F., Costa, J. L., & Giménez, D. (2008). Column tracer studies in surface and subsurface horizons of two Typic Argiudolls. *Soil Science*, 173(4), 237–247.

- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., Gonzalez, L., Tablada, M., & Robledo, C. W. (2020). *InfoStat versión 2020* (versión 20). Universidad Nacional de Córdoba.
- Di Rienzo, J. A., Guzman, A. W., & Casanoves, F. (2002). A multiple-comparisons method based on the distribution of the root node distance of a binary tree. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics*, 7(2), 129–142.
- Ersahin, S., Papendick, R. I., Smith, J. L., Keller, C. K., & Manoranjan, V. S. (2002). Macropore transport of bromide as influenced by soil structure differences. *Geoderma*, 108(3), 207–223.
- Montoya, J. C., Costa, J. L., Liedl, R., Bedmar, F., & Daniel, P. (2006). Effects of soil type and tillage practice on atrazine transport through intact soil cores. *Geoderma*, 137(1–2), 161–173.
- Okada, E., Costa, J. L., Bedmar, F., Barbagelata, P., Irizar, A., & Rampoldi, E. A. (2014). Effect of conventional and no-till practices on solute transport in long term field trials. *Soil and Tillage Research*, 142, 8–14.
- Parker, J. C., & van Genuchten, M. T. (1984). Determining Transport Parameters from Laboratory and Field Tracer Experiments. *Virginia Agricultural Experiment Station Bulletin*, 84-3, 1–96.
- Schnitzer, M. (1999). A Lifetime Perspective on the Chemistry of Soil Organic Matter. *Advances in Agronomy*, 68(C), 1–58.
- Shaw, J. N., West, L. T., Radcliffe, D. E., & Bosch, D. D. (2000). Preferential Flow and Pedotransfer Functions for Transport Properties in Sandy Kandiodults. *Soil Science Society of America Journal*, 64(2), 670–678.
- Šimůnek, J., van Genuchten, M. T., Šejna, M., Toride, N., & Leij, F. J. (1999). *The STANMOD computer software for evaluating solute transport in porous media using analytical solutions of convection-dispersion equation, Versions 1.0 and 2.0*.
- Thevenot, M., & Dousset, S. (2015). Compost Effect on Diuron Retention and Transport in Structured Vineyard Soils. *Pedosphere*, 25(1), 25–36.
- Vanderborght, J., & Vereecken, H. (2007). Review of Dispersivities for Transport Modeling in Soils. *Vadose Zone Journal*, 6(1), 29–52. <https://doi.org/10.2136/vzj2006.0096>
- Zhou, Y., Wang, Y., Hunkeler, D., Zwahlen, F., & Boillat, J. (2010). Differential transport of atrazine and glyphosate in undisturbed sandy soil column. *Soil and Sediment Contamination*, 19(3), 365–377.