

ESTIMACIÓN DE LA DISPERSIVIDAD EN UN SUELO ARCILLOSO SORRIBADO EN
EXPERIMENTOS DE TRANSPORTE EN COLUMNAS

*J. ÁLVAREZ-BENEDÍ⁽¹⁾, R. MUÑOZ-CARPENA⁽²⁾, A. HEGUEDAS⁽¹⁾,
S. BOLADO⁽³⁾ y A.R. SOCORRO⁽³⁾*

Servicio de Investigación, Desarrollo y Tecnología Agraria. Valladolid.⁽¹⁾
Instituto Canario de Investigaciones Agrarias. Tenerife.⁽²⁾
Dep. Ingeniería Química. Universidad de Valladolid. Valladolid.⁽³⁾

RESUMEN

La dispersividad constituye uno de los parámetros más importantes en la modelización del transporte de solutos en medios porosos. Su estimación requiere un considerable esfuerzo experimental. El objetivo de este trabajo es la estimación de dicho parámetro a partir de experiencias de transporte a través de columnas de suelo, evaluando la posibilidad de su predicción a partir de medidas de propiedades físicas estándar. Se tomaron muestras en seis puntos de una misma parcela experimental (4800 m² de suelo arcilloso sorribado) a tres profundidades (15, 30 y 60 cm.). Paralelamente se realizaron determinaciones de textura, materia orgánica, conductividad hidráulica a saturación, porosidad, densidad aparente y densidad específica. A partir de los experimentos de transporte en columnas se obtuvieron valores de dispersividad entre 0.45 y 10 cm, siendo la magnitud de la variabilidad del orden de las otras propiedades físicas medidas. Se discute la correlación de valores de otras propiedades físicas con los valores de dispersividad obtenidos en las columnas. En particular, la conductividad hidráulica y porosidad se mostraron como los parámetros con mayores posibilidades para la estimación de la dispersividad.

ABSTRACT

The purpose of this work was the estimation of the dispersivity in mass transfer experiments through soil columns using a soil of particular characteristics (specially high clay content and high spatial variability). This was accomplished by evaluating the physical properties of 18 samples and the results of several column experiments performed with nonreactive and nonadsorbed tracer. Samples from 6 points and 3 depths (15, 30 and 60 cm) of a 4800 m² experimental site were used in the transport experiments. Texture, Organic Matter content, saturated hydraulic conductivity, porosity, bulk density and specific density were measured. The obtained values of dispersivity ranged from 0.45 to 10 cm, the variability being of the same order than variability of other physical properties. The correlation between dispersivity and the values of other properties is discussed and the aptitude of standard physical properties for independent estimations of dispersivity is evaluated.

KEY WORDS

Dispersivity, Solute Transport, Soil Columns, Soil Pollution

INTRODUCCIÓN

El importante desarrollo experimentado en los últimos años por las herramientas para la caracterización del transporte de solutos en suelos ha puesto a nuestra disposición un gran número de algoritmos para la simulación de estos procesos a diferentes escalas. Una revisión reciente de estos modelos, orientada al medio no saturado, puede encontrarse en Samper (1995). Como planteamiento general, en todos los modelos existentes se distingue entre procesos de transferencia de materia y de transferencia de energía. Dentro del primer grupo de procesos se suele diferenciar entre el balance de humedad (que afecta al movimiento del agua) y el balance de materia relativo al soluto o solutos. En la práctica, la transferencia de materia y energía no resultan fenómenos independientes entre sí, el balance de energía tiene implicaciones en los valores de las propiedades hidráulicas y de transporte, así como en la condición de contorno superior del balance de humedad. Por esta razón los balances de energía y humedad han sido abordados simultáneamente con frecuencia en la literatura (Philip y De Vries, 1957; Van Bavel y Hillel 1976; Chung y Horton, 1987, entre otros). No es, por ello, extraño que muchos de estos códigos de simulación estén desarrollados modularmente, con los correspondientes bloques destinados al balance de humedad, transporte de solutos y balance de energía.

Una vez aceptado que un modelo es aplicable a una situación determinada, la principal dificultad reside en estimar los valores adecuados de los parámetros de los diferentes bloques o módulos. En cuanto al balance de

humedad, la caracterización de las propiedades hidráulicas de un suelo no presenta grandes controversias en la literatura y son generalmente aceptados los procedimientos basados en la determinación de la conductividad hidráulica, la curvas características de pF , etc. Para el balance de energía es generalmente reconocido el tratamiento de De Vries (1963) para la estimación de las propiedades térmicas.

Es la modelización del transporte de solutos la que motiva una mayor disparidad de criterios entre los diversos autores, siendo uno de los objetivos principales de la investigación en este campo en nuestros días. Cuatro son los procesos principales que intervienen: advección (transporte del soluto por el movimiento del fluido originado por un gradiente de potencial), dispersión (alejamiento de moléculas del soluto de un cierto punto como por ejemplo el centro de masas), transferencia entre fases (adsorción, volatilización, etc.) y reacción (hidrólisis, degradación, etc.). De todos ellos, la caracterización de la dispersión es sin duda uno de los puntos mas problemáticos, que afecta además al transporte de todo tipo de solutos sean reactivos o no reactivos, volátiles o no volátiles, etc.

El objetivo de este trabajo es la obtención de valores del coeficiente de dispersividad, parámetro principal para la caracterización de la dispersión en experimentos de transporte realizados en columnas de suelo en laboratorio. Esto permitirá disponer de valores del coeficiente de dispersión en función del flujo volumétrico de agua de cada experimento. El suelo al que está enfocado este estudio presenta especiales características entre las que cabe mencionar el alto contenido en arcilla, propiedades ándicas, presencia de oxihidróxidos de hierro activos, una fuerte estructura granular y presencia de macroporos, por todo lo cual se comporta como un suelo de buena permeabilidad en condiciones naturales. El contenido de este estudio se ubica en el ámbito de la estimación de los parámetros de transporte, de utilidad en los estudios de simulación por ordenador con modelos numéricos que realiza actualmente el equipo investigador.

TEORÍA

La ecuación que describe el transporte advectivo-dispersivo de un soluto no reactivo en un medio poroso homogéneo bajo condiciones de flujo estacionario de agua es:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1)$$

donde C es la concentración del soluto en la disolución (ML^{-3}), x es la distancia, v es el promedio de la velocidad intersticial del agua (Lt^{-1}), t es el tiempo y D es el coeficiente de dispersión axial (L^2t^{-1}). Los dos términos de la derecha de la ecuación (1) representan el transporte dispersivo y advectivo, respectivamente.

La velocidad intersticial del agua v puede ser calculada a partir de la relación $v=q/q$, donde q es la velocidad de flujo media calculada sobre el área transversal total (densidad de flujo o simplemente flujo de Darcy) (Lt^{-1}) y q es el contenido volumétrico de humedad a saturación (o porosidad). Sin embargo, para la estimación de D es necesario considerar varios efectos de naturaleza físico-química y mecánica, cuyas contribuciones son difícilmente separables (Fried y Combarnous, 1971). El coeficiente de dispersión axial de la ecuación (1) puede expresarse como:

$$D = \frac{D_s}{\tau} + \alpha v \quad (2)$$

donde D_s es el coeficiente de difusión del soluto (L^2t^{-1}), τ es el factor de tortuosidad del medio, y α es la dispersividad (L). Las dos contribuciones de la ecuación (2) son respectivamente, la difusión en los poros y la dispersión mecánica. En la anterior expresión puede comprobarse como mientras el valor de la difusión permanece constante, la dispersión mecánica aumenta con la velocidad intersticial. Como orientación, un valor del coeficiente de difusión molecular de Cl^- en suelos puede ser del orden de $5 \cdot 10^{-4}$ cm²/min, esto supondría que para un valor de dispersividad de 0.5 cm, la contribución de la difusión resulta despreciable (al 95%) cuando se trabaja con valores de velocidad intersticial ≈ 0.1 cm/min.

Difusión

Surge de un gradiente de potencial químico relacionado principalmente con la actividad del soluto en la disolución. En un experimento real (todavía en un medio poroso homogéneo y un solo soluto en agua con flujo estacionario) la difusión comprende procesos de difusión en macroporo, en microporo (intrapartícula) y en película (a través de la superficie estanca alrededor de las partículas). En todos los suelos en general, pero especialmente en arenosos y suelos no alterados, la principal contribución a la difusión es la difusión en macroporos (Brusseau, 1993).

Dispersión Mecánica

Se debe a la no uniformidad de la distribución de velocidades de un fluido que atraviesa un lecho poroso, debido a los efectos de contorno. (Fried y Combarnous, 1971). Cuando se trabaja con valores suficientemente elevados de la velocidad intersticial, la contribución de la difusión puede suponerse despreciable y la ecuación (2) se expresaría como:

$$\alpha' = \frac{D'}{v} \quad (3)$$

La notación a' y D' indica que se trata de valores de dispersividad y dispersión aparentes. El valor D' es el que se obtendría al ajustar una curva de ruptura mediante la ecuación (1) y puede identificarse con D siempre que la contribución de la difusión resulte despreciable. A este valor de D' pueden contribuir otros factores diferentes de la dispersión mecánica (además de la difusión, podrían citarse otros factores adicionales no contemplados en la ecuación (2) como exclusión aniónica, etc., véase por ejemplo Horvarth y Lin, 1976). El resultado de estas contribuciones adicionales es un valor de la dispersividad aparente a' superior al correspondiente valor de la dispersividad (α).

Mención aparte merecen valores de la dispersividad anormalmente elevados observados al realizar cambios de escala en experimentos de transporte. Estos fenómenos han sido atribuidos generalmente en la literatura a la contribución de la variabilidad espacial de la conductividad hidráulica y reciben el nombre de *macrodispersión*. Trabajando con el mismo material, Pickens y Grisak (1981) obtuvieron valores de dispersividad de 0.035 cm en experimentos de laboratorio frente a valores de 0.7 cm correspondientes a experimentos realizados en diferentes puntos de un acuífero. Las diferencias son atribuidas por estos autores a las inhomogeneidades dentro del acuífero y al promedio realizado por el sistema de muestreo. El efecto de escala resulta más evidente aún en los valores de dispersividad obtenidos para el acuífero completo, del orden de 3 y 9 cm. En dicho trabajo se proponen unas expresiones que relacionan la dispersividad del acuífero completo con propiedades estadísticas de un sistema geológico estratificado en el que la conductividad hidráulica posee una distribución log-normal o arbitraria. Este fenómeno de escala no será abordado en el presente trabajo, enfocado a experimentos de transporte en columnas.

Tratamiento de la Dispersión en algunos de los modelos más extendidos

En base a lo anteriormente expuesto, existen diferentes alternativas para implementar el proceso de dispersión en un modelo de transporte de solutos en suelos. Kemper y van Schaik (1966) propusieron una expresión que relaciona el valor del coeficiente de difusión del soluto en un medio poroso determinado con el valor (mucho más fácilmente obtenible) del coeficiente de difusión molecular del mismo soluto en agua D_0 y la humedad del suelo. Este es el tratamiento empleado en el modelo WAVE (Vanclouster et al., 1996). Por otro lado, Wagenet y Hutson (1987) en el modelo LEACHM siguen también el planteamiento de Kemper y van Schaik (1966) anteriormente expuesto. La diferencia con el modelo WAVE es que en este caso los autores consideran también flujo en fase gaseosa lo que supone una contribución interesante al transporte de compuestos volátiles en suelos subsaturados.

Otra alternativa consiste en recurrir a planteamientos menos rigurosos pero más fáciles de llevar a cabo en la práctica que han proporcionado buenos resultados en determinadas condiciones de trabajo. El modelo PRZM-2

(Mullins et al., 1993), segunda versión del extendido Pesticide Root Zone Model, es un buen ejemplo de ello. Aunque este modelo considera también difusión en fase líquida y fase vapor, el tratamiento en la resolución de la ecuación de transporte es menos sofisticado que en los casos anteriores. Se considera un único valor de D para cada soluto durante toda la simulación, independientemente de los contenidos de humedad del suelo. En este modelo, por lo tanto, se ha sacrificado precisión en favor de una mayor sencillez de aplicación.

Como denominador común en los modelos anteriores, y en general para aquellas alternativas de modelización del transporte de solutos en suelos basadas en la resolución de la ecuación de transporte, resulta clave disponer de valores de la dispersividad: en algunos casos como parámetro del modelo (WAVE, LEACHM, etc.) y en otros como estimación de la Dispersión en función de los regímenes de velocidad intersticial durante la simulación. La dispersión axial es además, uno de los parámetros más importantes en los estudios de sensibilidad de los modelos de transporte (Álvarez et al., 1995), lo que implica que indeterminaciones en los valores de este parámetro se traducen en variaciones notables de la respuesta del modelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Suelos

Se seleccionó una parcela experimental de 4800 m² situada en la comarca de Valle de Guerra, en la zona Norte de Tenerife la mayor de las islas Canarias (2057 Km²). La parcela está dedicada al cultivo de plátano y se considera representativa (riego, aplicaciones de productos fitosanitarios y prácticas culturales) de esta zona de interés para la agricultura de la Isla.

Debido al paisaje de ladera y la ausencia de suelo agrícola en las partes bajas de la isla, el método tradicional es el cultivo en terrazas de poco espesor (50-70 cm), denominadas "sorribas", sobre la roca basáltica fracturada. La principal característica de estas sorribas es que su suelo no es de origen local, sino que en la mayoría de los casos se ha transportado desde zonas altas de la isla donde las condiciones de humedad y temperatura permiten la formación de suelos de textura fina. El suelo de la parcela de ensayo es de tipo arcilloso, con caracteres ándicos. Estudios de difracción de rayos-X mostraron una mineralogía con materiales amorfos y arcillas 1:1 con carga dependiente de pH (haloisita) y 2:1 nontronita. La elevada concentración de oxihidróxidos de hierro de alta actividad encontrados podría relacionarse con el desarrollo de una buena estructura y elevada conductividad hidráulica, si tenemos en cuenta el alto contenido en arcilla.

Se excavaron 7 calicatas en las parcelas para hacer un estudio de las características del perfil del suelo (Soil Survey Staff, 1978) y tomar 42 muestras

(7 puntos x 3 profundidades alteradas y otras tantas inalteradas) de suelo para la determinación de las propiedades químicas, físicas e hidráulicas siguiendo métodos estándar (Klute, 1986). En la figura 1 se muestra la localización de las 7 calicatas empleadas para el muestreo. El contenido volumétrico de humedad a saturación o porosidad (θ) y la densidad del suelo real y aparente (ρ_s y ρ_a) se midió sobre la muestra de suelo inalterada obtenida con un muestreador tipo USDA en un anillo de aluminio de 7.62 cm de diámetro y altura. La muestra se saturó por capilaridad desde su base durante un periodo de 72 horas por elevación sucesiva del nivel de agua para permitir la salida del aire, se pesó a saturación y se secó posteriormente en estufa a 102 °C hasta pesada constante. La medida de la conductividad hidráulica a saturación (K_s) se realizó en un permeámetro de laboratorio sobre los mismos cilindros de muestra inalterada por aplicación de la ley de Darcy manteniendo una altura de agua constante sobre la muestra. Los valores obtenidos se contrastaron con valores realizados con un permeámetro de Guelph (Reynolds y Elrick, 1985). Las Tablas 1 y 2 resumen las propiedades del suelo. Las curvas características del suelo (pF vs θ) se obtuvieron sobre muestra inalterada utilizando un sistema de células tipo Tempe (Klute, 1986). Los valores experimentales obtenidos para las curvas se ajustaron a la ecuación de van Genuchten (van Genuchten, 1980) (Figura 2).

Tabla 1.

Propiedades físicas de los suelos de las parcelas experimentales

Prof. (cm)	K_s (cm/h)	ρ_s (g/cm ³)	ρ_a (g/cm ³)	$P=\theta_s$ (cm ³ /cm ³)	Parámetros del modelo de α_{ps} ¹			Textura (USDA) ²
					n	θ_r		
15	13.0 ± 3.77	2.51 ± 0.19	1.09 ± 0.06	0.55 ± 0.02	0.28 ± 0.04	1.38 ± 0.05	0.15 ± 0.03	Ac
30	8.38 ± 2.08	2.49 ± 0.06	1.18 ± 0.06	0.52 ± 0.03	0.22 ± 0.04	1.41 ± 0.05	0.15 ± 0.03	Ac
60	7.65 ± 2.18	2.34 ± 0.20	1.09 ± 0.10	0.49 ± 0.03	0.19 ± 0.04	1.29 ± 0.05	0.11 ± 0.03	Ac-F

1. La notación original de van Genuchten (1980) ha sido modificada para distinguir el parámetro α_{ps} del símbolo utilizado en nuestro trabajo para la dispersividad.

2. Ac = Arcilloso; F = Franco

Tabla 2.

Propiedades químicas de los suelos de las parcelas experimentales

Profundidad (cm)	MO (%)	CE_{25} (dS/m)	pH	CIC (meq/100g)	K_d N-NH ₄
15	2.32 ± 0.79	1.49 ± 0.25	6.44 ± 0.62	37.1 ± 3.40	10.1 ± 2.8
30	1.70 ± 0.63	1.34 ± 0.39	6.33 ± 0.59	33.7 ± 2.24	13.3 ± 3.6
60	1.03 ± 0.24	1.47 ± 0.26	7.27 ± 0.17	32.0 ± 2.75	18.9 ± 4.1

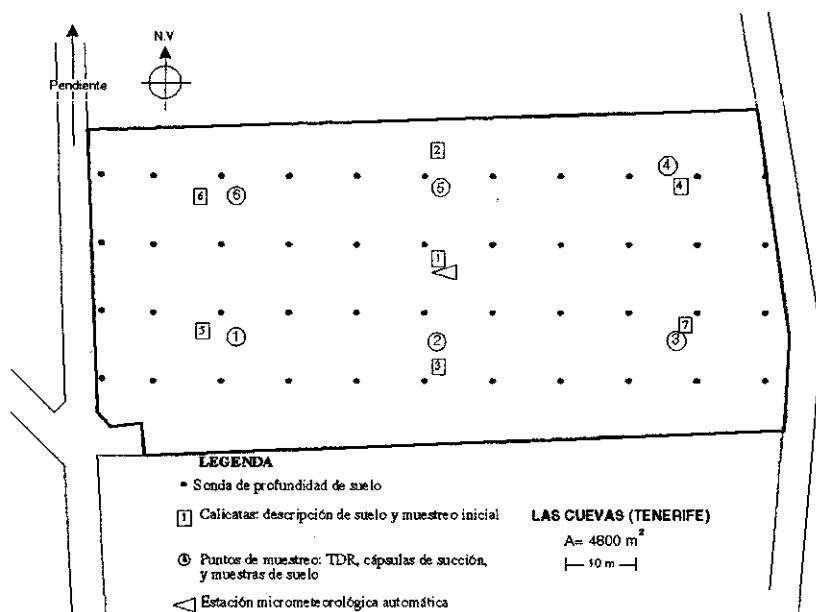


Fig. 1. Parcela experimental

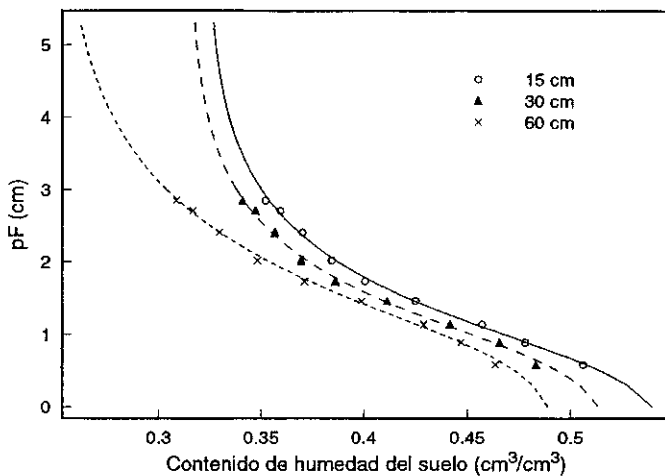


Fig. 2. Curvas de succión para los suelos de las parcelas experimentales

Los altos valores de arcilla encontrados en los horizontes más superficiales se traducen en una mayor capacidad de retención. La contrastación de estos resultados con los altos valores de conductividad hidráulica saturada (K_s), indica la existencia de una importante agregación natural (conferida por sus propiedades ándicas y presencia de oxihidróxidos), así como por el flujo preferencial alrededor de raíces y material grueso.

En una segunda etapa, como parte de un estudio realizado durante los años 1995-1996 sobre transporte y degradación de nitrógeno (Muñoz-Carpena et al. 1997a) y pesticidas (Muñoz-Carpena et al. 1997b) se realizó un muestreo sistemático de suelos, solución del suelo, y seguimiento del balance de humedad a 3 profundidades del suelo (15, 30, 60 cm) sobre 6 puntos de muestreo señalados en la Figura 1. En una de las campañas de muestreo se recogieron muestras que se secaron y tamizaron (fracción <2 mm) y emplearon en el estudio de columnas en laboratorio.

Se realizaron 4 curvas de ruptura con cada una de las 18 muestras de suelo (completando un total de 72 experimentos), a flujos volumétricos de 0.6, 0.4, 0.3 y 0.2 cm^3/min , respectivamente. El flujo máximo para la realización de las experiencias estaba limitado por las altas caídas de presión que se originan en las columnas de suelos tan arcillosos, que llegan a valores del orden de 2000 psi cuando se pretende sobrepasar regímenes de 0.6 cm^3/min . Por otro lado, flujos por debajo de 0.1 cm^3/min implican requerimientos de tiempo muy elevados para completar los experimentos. Además, dichas experiencias no aportarían mucha información adicional, puesto que se pretende trabajar con velocidades intersticiales de fluido elevadas de manera que resulte despreciable la contribución de la difusión molecular,

Dispositivo Experimental

El dispositivo experimental utilizado para la realización de curvas de ruptura ha sido descrito por Álvarez et al., (1995). Dos bombas de cromatografía de líquidos de alta eficacia impulsan disoluciones con y sin trazador, respectivamente a través de las columnas de suelo. La concentración del effluente se determina en continuo a la salida de la columna con un detector de absorción en UV-Visible. Todo el dispositivo se encontraba instalado en un laboratorio climatizado con estricto control de temperatura a 25 °C para minimizar efectos de deriva térmica en los equipos. Se utilizaron columnas de cromatografía preparativa (20 mm diámetro, 10 cm longitud) acondicionadas en este caso para solventar problemas eventuales de subidas de presión al forzar los flujos volumétricos programados. Las columnas fueron empaquetadas en varios pasos para obtener una densidad uniforme y eran saturadas con agua posteriormente por capilaridad. Antes del primer experimento de cada serie se dejaban equilibrar (una vez instaladas en el dispositivo), haciendo pasar una solución de CaCl_2 (0.01M) durante periodos comprendidos entre 48 y 72 horas. Un estudio de la reproducibilidad de la

metodología y posibilidades del dispositivo utilizado puede encontrarse en Álvarez e Isla, (1997).

Soluto Utilizado Como Trazador

Existen varias alternativas para la elección de un soluto que cumpla la ecuación (1) sin necesidad de términos adicionales de adsorción y reacción. De entre los más utilizados habitualmente, pueden destacarse isótopos, aniones de elementos no metálicos como Cl⁻ o Br⁻, o aniones orgánicos, generalmente derivados fluorados, como Tri, Tetra y Pentafluorobenzoatos (Benson, y Bowman, 1994). Un buen trazador para el dispositivo utilizado en este trabajo es el ión PentafluoroBenzoato (PFB), con señal en el UV que permite su detección en continuo. Álvarez et al (1995) compararon para este mismo dispositivo curvas de ruptura obtenidas con PFB y Br⁻. Considerando la ecuación (2), el valor de la dispersividad será en esencia independiente del soluto siempre y cuando la dispersión mecánica sea la causa principal de dispersión. Este hecho ha sido contrastado por Brusseau (1993), comparando curvas de ruptura de los trazadores ³H₂O y PFB.

Determinación del Coeficiente de Dispersión Mecánica

Los resultados de los experimentos en columnas fueron tratados con el programa LM-BIC (Álvarez et al, 1995) con las condiciones particulares de soluto no retenido (factor de retraso fijado como R=1) y considerando el modelo de equilibrio local, que corresponde a la ecuación (1). Esta suposición resultó adecuada en la mayoría de los casos: tan sólo en 2 de los 72 experimentos fue necesario considerar la existencia de dos regiones (fracciones de agua móvil y estanca) para obtener un ajuste satisfactorio. Los valores de ν y el tiempo de duración del pulso en cada caso (T_0 en el programa) eran conocidos, del ajuste se obtenían valores del Número de Peclet ($\nu L/D$, donde L es la longitud de la columna). De acuerdo al procedimiento propuesto por Ma y Selim (1994), se ajustaban entonces ν y D, simultáneamente a partir de las curvas de ruptura (incluyendo entonces el efecto de la tortuosidad en el número de Peclet). Las condiciones iniciales para ν eran los valores de ν estimados a partir de la expresión $\nu = \theta_s / \theta_s$ (siendo θ_s el contenido de humedad a saturación).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 3 muestra las curvas de ruptura obtenidas para los experimentos 5-30 (suelo 5 a 30 cm de profundidad), como ejemplo de una de las 18 series de experimentos. En la Tabla 3 se reflejan los valores correspondientes a este experimento en concreto. La duración de los pulsos de concentración de

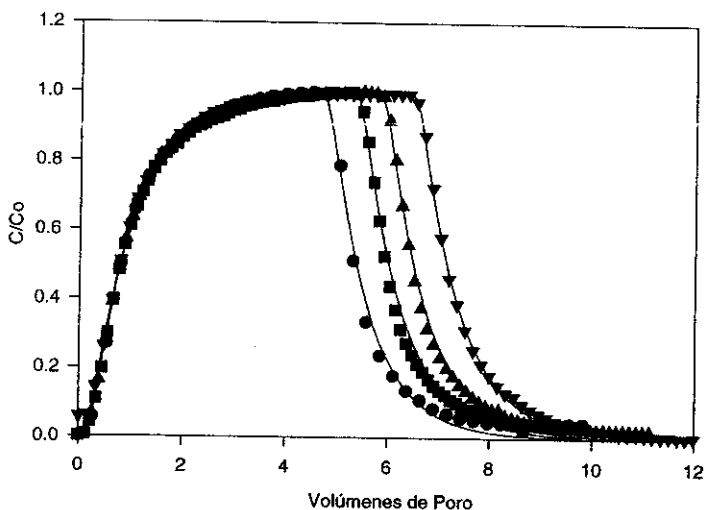


Fig. 3. Curvas de ruptura obtenidas para una de las 18 muestras de suelo FIGURA 3:
Curvas de ruptura obtenidas para una de las 18 muestras de suelo estruñadas
(experimento 5-30). l 0.2 cm³/min, n 0.3 cm³/min, s 0.4 cm³/min, t 0.6 cm³/min.
Las líneas continuas representan los resultados del ajuste con el programa IM-
BIC.

trazador (PFB) a la entrada de la columna para esa serie de experimentos fue de 720, 480, 360 y 240 min, respectivamente (valores asignados *a priori* para asegurar que se alcanzaba el punto de concentración $C/C_0=1$ en el efluente). Por claridad, se ha representado en abscisas en función del parámetro adimensional T (volúmenes de poro), que puede ser definido como $T=v t / X$ (siendo X la longitud de la columna en cm).

El modelo de equilibrio local, tal y como ha sido planteado en la ecuación (1), representa razonablemente bien el comportamiento del soluto. Las principales discrepancias entre datos experimentales y modelo se encuentran en las colas de las curvas de ruptura. Este hecho puede ser en parte debido a procesos de no-equilibrio vinculados al transporte del soluto (fenómenos de transferencia de materia) descritos en profundidad por Brusseau y Rao (1989). Sin embargo, estas variaciones tan pequeñas pueden deberse también muy probablemente a efectos de deriva del detector UV-Vis, suposición que es coherente con el hecho de que las diferencias son más patentes en los experimentos con mayor duración (por ejemplo, el experimento de 0.2 cm³/min, con un pulso de 12 horas, implica una duración total del orden de 24 h.). En la Tabla 3 se muestran los resultados del ajuste (v y D).

Tabla 3.
Resultados del ajuste de las Curvas de Ruptura para el experimento 5-30.

To (min)	v (cm/min)	D (cm ² /min)
240	0.25	0.45
360	0.16	0.28
480	0.12	0.19
720	0.07	0.10

La Figura 4 muestra, para la serie de experimentos anterior (5-30), la regresión lineal de los valores de D y v, cuya pendiente corresponde con la estimación de la dispersividad. El ajuste de los valores de D y v fue, en todos los casos, similar al presentado en dicha figura. La poca desviación de la linealidad en la relación D frente a v es razonable para el intervalo de velocidades lineales estudiado (relativamente estrecho). También puede comprobarse en dicha figura como un valor orientativo del coeficiente de difusión del orden de 10^{-4} cm²/min resultaría en una contribución despreciable en todo el intervalo estudiado. Precisamente por la contribución de fenómenos de difusión apuntados en la introducción, la tendencia de la curva D vs v no puede ser extrapolada para velocidades lineales de fluido más bajas. Lo mismo puede decirse de la extrapolación para velocidades superiores a las estudiadas. Los valores de la dispersividad obtenidos para los 18 experimentos se presentan en la Tabla 4

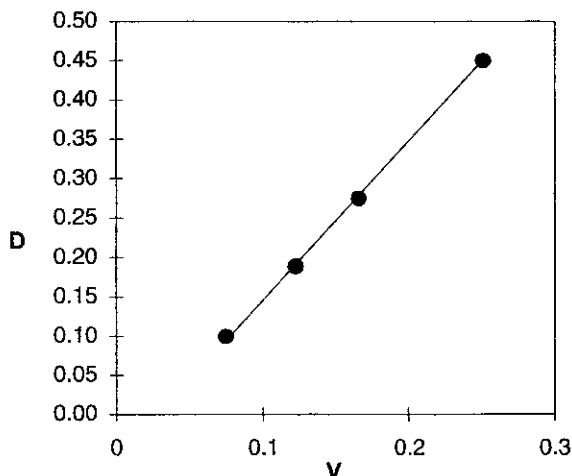


Fig. 4: Variación del coeficiente de Dispersión obtenido del ajuste en función de la velocidad lineal de flujo. La línea continua representa el resultado del ajuste por mínimos cuadrados ($a = D/V 1.71$ cm).

Tabla 4.
Valores obtenidos en las 18 series de experimentos de transporte en columnas

Experimento	ρ_{col} (g/cm ³)	θ_{col} (cm ³ /cm ³)	α (cm)
1-15	1.055	0.68	0.45
2-15	1.028	0.65	0.89
3-15	1.191	0.81	5.48
4-15	1.166	0.60	3.74
5-15	1.103	0.57	1.71
6-15	1.116	0.71	5.02
1-30	1.088	0.73	2.44
2-30	1.084	0.51	0.56
3-30	1.088	0.69	10.0
4-30	1.146	0.70	7.94
5-30	1.085	0.60	5.06
6-30	1.124	0.62	1.45
1-60	1.082	0.60	7.87
2-60	1.103	0.68	6.46
3-60	1.105	0.59	2.81
4-60	1.161	0.71	3.72
5-60	1.211	0.57	1.71
6-60	1.124	0.66	7.92

El primer aspecto a considerar en esta Tabla 4 son los valores de densidad aparente del suelo en las columnas (ρ_{col}). Es razonable pensar que el grado de compactación logrado en las columnas repercute posteriormente en los parámetros de transporte descritos en la introducción. Por esta razón, inicialmente se pretendió alcanzar en cada experimento un valor de la densidad aparente lo más aproximado posible a los valores experimentales en campo (a pesar de que ahora se trataba de suelo tamizado a 2mm). Sin embargo, existe muy poco margen para jugar con los valores de la densidad aparente en suelos con elevados contenidos de arcilla. En aquellas columnas en las que se aumenta la cantidad de suelo, los valores de la caída de presión necesaria para forzar el paso del eluyente se disparan incluso por encima de 3000 psi, valores ya muy elevados para el dispositivo experimental. Por el contrario, si se pretendían grados de compactación menores, las presiones a la entrada de la columna durante los experimentos producen un efecto de compresión en el suelo a la vez que se genera un espacio sin suelo en la entrada que no corresponde con las condiciones de contorno del modelo. En la Figura 5 se muestra la relación entre la densidad aparente final de las columnas de suelo y la experimental en campo. Como regla general, los valores obtenidos en las columnas fueron ligeramente superiores a los valores medidos en campo. Los valores de los contenidos volumétricos de humedad del suelo a saturación (θ_{col}) determinados al finalizar cada experimento, resultaron también sensiblemente superiores a las determinaciones con suelo inalterado pero es éste un factor difícilmente modificable en los experimentos en laboratorio.

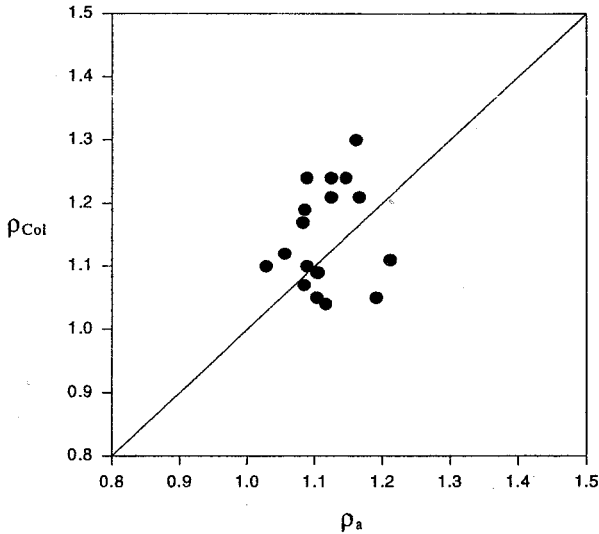


Fig. 5: Relación entre la densidad aparente del suelo medida después de cada experimento ρ_{Col} (g/cm^3) y los valores obtenidos para la misma propiedad en campo ρ_a (g/cm^3).

Comparando los valores de dispersividad obtenidos en este trabajo con la recopilación de Beven et al. (1994), tanto el intervalo de valores recogidos en la Tabla 4 (0.5 a 10 cm. aproximadamente), como su valor medio (4.5) son similares a valores correspondientes a 18 replicados con suelo franco arcilloso ofrecidos por los anteriores autores (media de 6 cm e intervalo de 3 a 14 cm).

Como último punto, cabe destacar en la Tabla 4 la gran variabilidad en los valores de la dispersividad obtenidos en los 18 experimentos. Esta variabilidad sorprende si se compara con los resultados de cada experimento mostrados en la Figura 4. Un Análisis de varianza de doble vía considerando como factores profundidad y punto de muestreo no mostró diferencias significativas entre los valores de dispersividad de diferentes profundidades ni entre los 6 puntos de muestreo (test de Duncan, 5%). Sin embargo, el estudio previo de suelo sobre muestra inalterada (Tabla 1) a pesar de poner manifiesto la gran variabilidad espacial de los parámetros físicos del suelo, sí mostró diferencias significativas en algunas propiedades físicas entre las tres profundidades del muestreo. Por este motivo y dada la enorme simplificación que conlleva en el posterior tratamiento de datos, se han considerado ya desde los primeros estudios los valores promediados a tres profundidades (15, 30 y 60 cm.).

La Tabla 5 muestra los valores de las propiedades físicas más relevantes obtenidas con suelo (alterado) de la parcela experimental. En la misma Tabla se han incluido los valores de la dispersividad promediados por profundidades.

Tabla 5.
Valores obtenidos sobre muestra alterada*

Prof.	α (cm)	p_a (g/cm ³)	pesp (g/cm ³)
15 cm	2.88±1.97 (68%)	1.12±0.06 (7%)	3.62±0.06 (20%)
30 cm	4.58±3.45 (75%)	1.10±0.02 (6%)	3.28±0.02 (11%)
60 cm	4.80±2.59 (54%)	1.15±0.04 (10%)	3.67±0.04 (27%)

Prof.	θ_s (cm ³ /cm ³)	K_s (cm/h)	% Arcilla
15 cm.	0.67±0.08 (12%)	2.08±3.00 (144%)	44.6±1.7 (4%)
30 cm.	0.64±0.07 (12%)	2.38±0.77 (32%)	48.2±3.5 (7%)
60 cm.	0.64±0.05 (12%)	1.54±0.74 (48%)	48.1±3.1 (6%)

* Coeficientes de variabilidad entre paréntesis

En la Figura 6 se muestra la relación entre la densidad aparente y porosidad del suelo utilizado en cada experimento de transporte (ρ_{col} y θ_{col} , respectivamente) y la determinada para cada muestra en el laboratorio. Esta comparación pone de relieve el hecho curioso de que, mientras que el intervalo de densidades es sensiblemente inferior en las columnas que en los experimentos de laboratorio (probablemente por que se siguieron diferentes criterios de relleno), el intervalo de porosidad del suelo de las columnas resultó más amplio (hecho que podría ser debido al efecto de la presión del sistema de bombeo). Además, a la vista de estos resultados es de esperar que, en general, las correlaciones entre cualquier otra propiedad determinada después de cada experimento de transporte y los valores que se disponían de los ensayos en laboratorio no muestren valores del coeficiente de correlación muy elevados. La correlación de los valores de las propiedades determinadas sobre muestra alterada con la dispersividad se presenta en la Tabla.

A la luz de los resultados presentados en la Tabla 6 puede destacarse que el contenido de arcilla se muestra como la propiedad más importante junto

Tabla 6.
Correlación entre los valores de propiedades obtenidos sobre muestra alterada y el coeficiente de dispersividad estimado en columnas.

Prof.	ρ (g/cm ³)	θ_s (cm ³ /cm ³)	K_s (cm/h)	% Arcilla
Correlación con α	-0.89	-0.43	-0.77	0.97

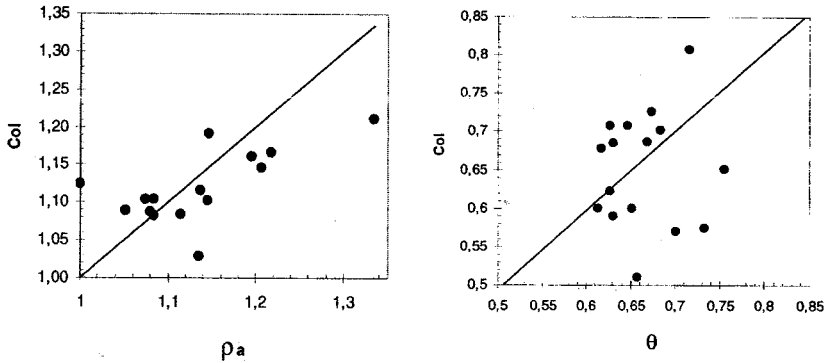


Fig. 6: Relación entre densidad aparente y porosidad determinadas después de cada experimento y los valores obtenidos para las mismas propiedades en las muestras de suelo en el laboratorio.

con la densidad aparente. No es sorprendente que la textura haya sido tradicionalmente el principal parámetro a considerar a la hora de asignar valores aproximados de dispersividad en suelos (para aquellos suelos en los que se requiere y no se dispone de estos valores). Puede citarse, por ejemplo, los valores de α recopilados en la documentación del modelo WAVE, al que se ha hecho referencia anteriormente.

Realizado el mismo ejercicio de correlación con los datos de las propiedades físicas estimadas en campo, se obtuvieron los mostrados en la Tabla 7.

Tabla 7.
Correlación entre los valores de propiedades obtenidos sobre muestra inalterada y el coeficiente de dispersividad estimado en columnas.

Prof.	ρ (g/cm ³)	θ_s (cm ³ /cm ³)	Ks (cm/h)
Correlación con α	-0.75	-0.95	-0.995

En la Tabla se pone en evidencia una correlación aceptablemente buena de los valores de la dispersividad con los valores de porosidad determinada en campo y los valores de conductividad hidráulica sobre muestra inalterada promediados a tres profundidades.

CONCLUSIONES

Los experimentos de transporte en columnas de suelo con el ión PFB como trazador no retenido mostraron una relación lineal del coeficiente de Dispersión axial con la velocidad intersticial en el intervalo de velocidades estudiado. Las curvas de ruptura pudieron ser ajustadas con un modelo de equilibrio local excepto en 2 de los 72 experimentos en los que fue necesario recurrir a un modelo que contemplase procesos de no-equilibrio, que en este caso han de atribuirse al transporte entre fases de fluido estancas y móviles.

Considerando el tratamiento de la dispersión de los modelos comentados en el apartado de Teoría, los modelos LEACHM y WAVE, que tienen en cuenta la variación de la dispersión con la velocidad intersticial, ofrecerían mejores resultados en la descripción de los procesos de dispersión en los experimentos llevados a cabo en condiciones de trabajo similares a las de este estudio, habida cuenta de la relación lineal entre D y v mostrada en la Figura 4. Sin embargo, es importante puntualizar que los valores de dispersividad finalmente obtenidos no incluyen posibles efectos de macrodispersión descritos anteriormente, lo que puede ser importante en algún caso.

Los valores de la dispersividad obtenidos en este trabajo se encuentran dentro de los intervalos de valores publicados por otros autores y su coeficiente de variación es del orden de otras propiedades físicas determinadas en el mismo suelo, lo que hace atribuir su origen a la propia variabilidad espacial del suelo sorribado más que a *ruido* introducido en el proceso experimental. No se detectaron diferencias significativas del coeficiente de dispersividad entre los seis puntos de muestreo ni entre las tres profundidades consideradas.

De las propiedades físicas determinadas en laboratorio, el contenido de arcilla y la densidad aparente se mostraron como las más importantes a la hora de realizar estimaciones del coeficiente de dispersividad. Si se consideran datos obtenidos, o con muestras de suelo inalteradas, la conductividad hidráulica y la porosidad mostraron los mejores resultados en la correlación. No obstante y dadas las particulares características del suelo sorribado objeto de este trabajo, parece interesante para investigaciones futuras, ampliar este tipo de estudios a suelos que abarquen un intervalo más amplio de propiedades, principalmente aquellas que han sido destacadas en el párrafo anterior

AGRADECIMIENTOS

Este Trabajo es fruto de la Celebración de las II Jornadas en ZNS en Vitoria, y ha sido financiado en parte por el Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Proyectos SC-95059 (I.C.I.A., Canarias) y SC-95001 (S.I.D.T.A., Valladolid).

REFERENCIAS

- Álvarez J., Herguedas A., Atienza J., Bolado S., 1995. Modelización y estimación de parámetros para la descripción del transporte de solutos en columnas de suelo en laboratorio. Monografías INIA, No. 91. Madrid.
- Álvarez J., Isla T., 1997. Seguimiento del Transporte de Contaminantes en Suelos. Dispositivo Automático para la Obtención de Curvas de Ruptura. *Ingeniería Química* 334:183-187.
- Benson C. F. and Bowman R. S., 1994. Tri- and Tetrafluorobenzoates as Nonreactive Tracers in Soil and Groundwater. *Soil Sci.Soc.Am.J.* 58:1123-1129.
- Beven K.J., Henderson D. E., Reeves A. D., 1994. Dispersion Parameters for Undisturbed Partially Saturated Soil. *J. of Hydrol.* 143: 19-43.
- Brusseau M. L., 1993. The Influence of Solute Size, Pore Water Velocity, and Intraparticle Porosity on Solute Dispersion and Transport in Soil. *Water Resour. Res.*, 29:1071-1080.
- Brusseau M.L., Rao P.S.C., 1989. Sorption Nonideality during Organic Contaminant Transport in Porous Media. *CRC Crit. Rev. in Environm. Control.* , 19: 33-99.
- Chung S, Horton R., 1987. Soil Heat and Water Flow With a Partial Surface Mulch, *Water Resour. Res.*, 23, 2175-2186.
- De Vries D. A., 1963. Thermal Properties of Soils. En: W.R. Van Wijk (ed.) Physics of Plant Environment. North-Holland Publ. Co., Amsterdam.
- Fried J.J., Combarnous M. A., 1971. Dispersion in Porous Media. En: Ven Te Chow (ed.), Advances in Hydroscience. Vol 7:169-282.Academic Press, New York.
- Horvath C., Lin H., 1976. Movement and Band Spreading of Unsorbed Solute in Liquid Chromatography. *J. Cromatogr.*, 126:401-420.
- Kemper W.D., van Schaik J.C., 1966. Diffusion of Salts in Clay-Water Systems. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 30:534-540.
- Klute, A. (ed) 1986. Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods. 2nd. Ed. Agronomy monograph no.9. Madison:ASA-SSSA.
- Ma L. M. and Selim H. M.,1994. Tortuosity, Mean Residence Time, and Deformation of Tritium Breakthroughs from Soil Columns. *Soil Sci.Soc.Am.J.* 58:1076-1085.
- Mullins J. A., Carsel R. F., Scarbrough J. E., Ivery A. M., 1996. PRZM-2 A Model for Predicting Pesticide Fate in the Crop Root and Unsaturated Soil Zones: Users Manual for Release 2.0. U.S-EPA/600/R-93/046, Athens.
- Muñoz Carpena, R., A.R. Socorro, G. González, N. Pérez y R. Poncela. 1997a. Field monitoring of nitrogen evolution and fate in a Canary Islands (Spain) sprinkler fertigated agricultural plot. *Paper of ASAE* no. 97-2108. St. Joseph: ASAE
- Muñoz Carpena, R., M.C. Cabrera, A.R. Socorro, G. González, N. Pérez y R. Poncela, J.M. Hernández Moreno, J. Beltrán. 1997b. Contaminación por plaguicidas en acuíferos y suelos en las Islas Canarias - Comparación de métodos de muestreo. En: Morell, I, y L. Candela (eds.).Plaguicidas: Estado Actual del Conocimiento. CICYT-AIH: Madrid.
- Philip J. R., De Vries D. A. 1957. Moisture Movement in Porous Materials under Temperature Gradients, *Eos Trans. AGU*, 38, 222-232.
- Pickens J. F., Grisak G. E., 1981. Scale-Dependent Dispersion in a Stratified Granular Aquifer. *Water Resour.-Res.* 17: 1191-1211.
- Reynolds, W.D. and Elrick, D.E., 1985. The constant head well permeameter effect of

- unsaturated flow. *Soil Science*, 99(2): 172.
- Samper F. J., 1995. Modelos de Transporte de Masa en Medios no Saturados. En: Gonzalo J.M., Antigüedad I., (eds.). Avances en la Investigación en Zona no Saturada. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco, Vitoria.
- Soil Survey Staff. 1978. Keys to Soil Taxonomy. US Dept. of Agr:Washington.
- Van Bavel C. H. M., Hillel D. I., 1976. Calculating Potential and Actual Evapotranspiration from a Bare Soil Surface by Simulation of Concurrent Flow of Water and Heat, *Agric. Meteorol.*, 17, 453-476.
- van Genuchten, M.T.1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *SSSA Proc*, 44:892-898.
- Vanclooster M. P., Viaene P., Christiaens K., Ducheyne S., 1996. Water and Agrochemicals in Soil and Vadose Environment, WAVE-Reference Manual. Rel. 2.1. Institute for Land and Water Management, Leuven.
- Wagenet R. J., Hutson J. L., 1987. LEACHM: Leaching Estimation And Chemistry Model: A process based model of water and solute movement transformations, plant