

# Ensayos experimentales del flujo del agua y la distribución de la conductividad eléctrica en perfiles de la zona no saturada próximos a un vertedero de residuos sólidos urbanos

*Experimental essays about water flow and electrical conductivity distribution in unsaturated zone profiles near a municipal solid waste landfill*

M.J. Adarve Alcázar (\*), L.F. Rebollo Ferreiro (\*\*) y A.J. Hernández Sánchez (\*)

(\*) Ecología. Departamento de Geología. Universidad de Alcalá. Apartado 20. 28871 Alcalá de Henares (Madrid).

(\*\*) Geodinámica. Departamento de Geología. Universidad de Alcalá. Apartado 20. 28871 Alcalá de Henares (Madrid).

## ABSTRACT

*We present some results about water content, hydraulic conductivity, water flow, pH, organic matter and electrical conductivity determined in soil samples from unsaturated zone profiles made in a discharge area located near a municipal solid waste landfill. The results show a confluence of water flow and higher rates of electrical conductivity in the central part of the vadose zone. Water content and hydraulic conductivity have a clear relation with the texture of soil samples. The electrical conductivity increase strongly by landfill leachates, pH increase lightly and organic matter content decrease.*

**Key words:** *unsaturated zone, water content, water flow, conductivity, landfill leachates.*

*Geogaceta, 20 (6) (1996), 1311-1314*  
ISSN:0213683X

## Introducción

En los últimos años muchos autores están realizando el estudio de la capacidad de la zona no saturada (ZNS) del substrato en su papel como barrera o filtro para atenuar la carga contaminante de los lixiviados procedentes de diversos vertederos (Duchesneau y Partridge, 1985; Nielsen *et al.*, 1985; Demetra Copoulos *et al.*, 1988; Kool y Parker, 1988; Gould *et al.*, 1988; Gavasci *et al.*, 1992). En estos trabajos se pone de manifiesto que, durante su migración a través de la zona no saturada, las sustancias disueltas en los lixiviados están sometidas a una serie de procesos físico-químicos que condicionan su distribución y tiempo de tránsito, y producen transformaciones en su composición química.

Los principales factores locales de una zona que pueden afectar al transporte de los lixiviados a través del suelo y la ZNS son los factores climáticos, los tipos de suelos presentes, las prácticas de explotación en los vertederos y el espesor de la ZNS (Atwood y Dean, 1985). Las variables más destacadas en relación a los suelos son el contenido de agua, el potencial del agua en el suelo, la conductividad hidráulica, el contenido en materia orgánica (M.O.) y el pH. Mientras que los tres primeros parámetros hidráulicos controlan el flujo en la ZNS y determinan la velocidad con la que se mue-

ve el agua a su través, el contenido en M.O. afecta a la adsorción química, y el pH del suelo incide en su degradación.

La composición granulométrica del material constituyente del substrato es también de suma importancia, pues la curva de retención de un suelo que relaciona la succión y el contenido de humedad depende fundamentalmente de la distribución de frecuencias de los diferentes tamaños de los poros. La conductividad hidráulica en la ZNS es también función del estado de humedad, es decir, del potencial de presión, y varía con la textura de los suelos (Varela, 1993).

El objetivo principal de este estudio ha sido vislumbrar la dinámica de flujo del agua en la ZNS de un área de descarga próxima a un vertedero de residuos sólidos urbanos sellado y localizado sobre un substrato arcilloso en el término municipal de Alcalá de Henares (Madrid). Las aguas subterráneas de parte de esta zona de descarga se ven afectadas por los lixiviados procedentes del vertedero (Adarve y Rebollo, 1993). El interés por conocer el movimiento del agua en la zona vadosa se centra no sólo en su importancia en la determinación de los niveles de contaminación que se pueden alcanzar a lo largo de su perfil, sino también en su posible incidencia en la composición química del suelo más superficial y, a través de éste, en la vegetación de estas zonas (Adarve, 1993).

## Materiales y métodos

Para llevar a cabo el estudio del flujo del agua en la ZNS del área de descarga afectada por los lixiviados procedentes del vertedero mencionado se efectuaron dos ensayos experimentales en sendos piezómetros de investigación, construidos con una sonda manual en dicha zona de descarga. Uno de ellos en diciembre de 1991 y el otro en mayo de 1992. Durante la ejecución de estos piezómetros se recogieron con un equipo de toma de muestras inalteradas (acoplable a las barras de la sonda mencionada y por el método de hinca) diversas muestras del substrato a intervalos de 15 cm de profundidad a lo largo del perfil de la zona vadosa, desde los 10 primeros cm hasta aproximadamente los 150 cm, profundidad aproximada de la zona saturada. En varias de estas muestras se acometió posteriormente en laboratorio la determinación de algunos parámetros hídricos, así como diversas granulometrías.

Por una parte, en nueve de las muestras inalteradas correspondientes a estos dos piezómetros se realizaron en laboratorio cuarenta y cinco determinaciones analíticas relativas al grado de humedad de los suelos; concretamente se determinaron los  $pF_0$ ,  $pF_2$ ,  $pF_{2.7}$ ,  $pF_{4.2}$  y  $pF_6$  en cada una de ellas. Estas determinaciones han sido efectuadas utilizando el aparato de presión-membrana

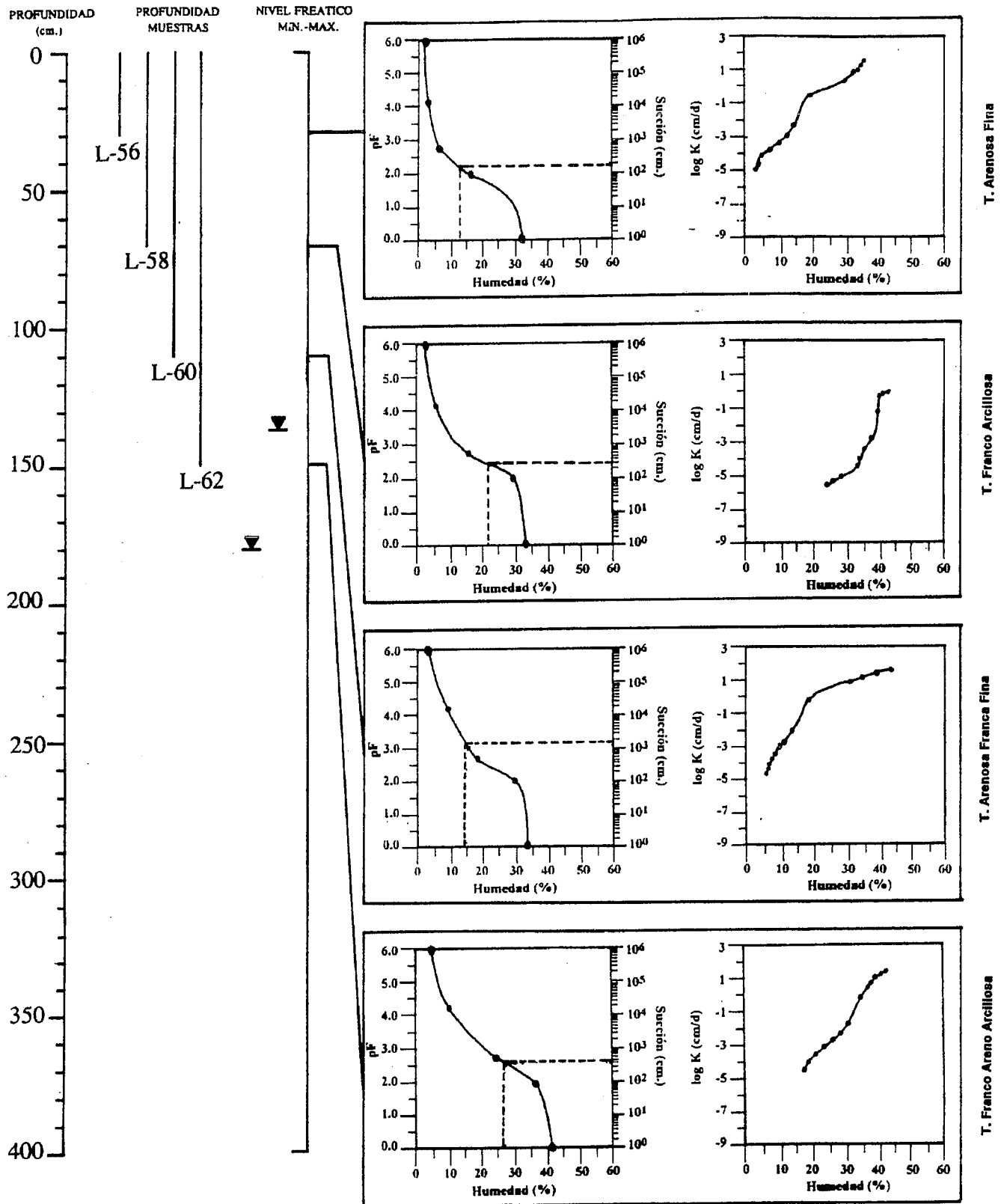


Fig. 1.-Curvas de retención (pF-humedad) y de conductividad hidráulica-humedad en muestras de suelo procedentes del perfil de un piezómetro próximo al vertedero de Alcalá de Henares.

Fig. 1.-Retention curves of soil moisture (pF-water content) and hydraulic conductivity-water content curves from a piezometer profile near the Alcalá de Henares landfill.

de Richards, descrito en Hernández y Pastor (1989). El cálculo de estos pF ha sido efectuado con el objeto de realizar las curvas característica de succión-humedad en la ZNS de dichas áreas. Estas curvas nos permiten determinar la succión que dichas muestra presentan en su entorno y en el momento de su recolección. Con los datos de succión obtenidos hemos podido determinar la variación del potencial mátrico con la profundidad en esta zona de descarga, y con ello el movimiento del agua en la ZNS.

Por otra parte, en veintuna de las muestras inalteradas procedentes de los sondeos citados se determinó el contenido de humedad. Este parámetro se obtuvo pesando las muestras en el laboratorio el mismo día de su recogida en los cilindros del tomamuestras utilizado, y de nuevo tras calentarlas en estufa a 105°C hasta peso constante. El conocimiento del grado de humedad nos permitió determinar de forma empírica la conductividad hidráulica de las muestras y, con ello, las curvas características de conductividad hidráulica-humedad en la zona no saturada mediante el método de Rijtema (1969).

La clasificación textural de las muestras se obtuvo a partir de sus granulometrías, llevadas a cabo mediante la separación de las fracciones muy gruesa, gruesa, media, fina y muy fina de arena con los correspondientes tamices colocados en un agitador. Los limos y arcillas se separaron según el método de Bouyoucus (Hernández y Pastor, 1989).

Por último, se determinaron el pH, el contenido en M.O. y la conductividad eléctrica en quince muestras recogidas a lo largo del perfil de la zona vadosa de otros dos piezómetros, construidos en la misma zona de estudio y en las mismas fechas arriba señaladas. Uno de ellos localizado en la parte de la zona de descarga cuyas aguas subterráneas se encuentran afectadas por los lixiviados del vertedero y otro en una zona de descarga próxima pero no afectada por tales lixiviados (Adarve y Rebollo, 1993). El pH y la conductividad eléctrica se determinaron en pasta saturada con un pH-metro y un conductímetro y el contenido en M.O. se determinó por oxidación con dicromato potásico y ácido sulfúrico concentrado (Hernández y Pastor, 1989).

## Resultados y discusión

Curvas características de succión-humedad y conductividad hidráulica-humedad: En la figura 1 están representadas las curvas de retención y conductividad hidráulica-humedad de las muestras del substrato recogidas a lo largo del perfil de uno de los piezómetros instalados en el área de descarga del vertedero (los datos procedentes del otro piezómetro serán comentados aunque no están representados). En dicha figura se indican también la profundidad a la que se recogieron las muestras y los niveles del

agua mínimo y máximo medidos en los piezómetros (entre 1.40 m y 1.80 m en ambos casos). Dos de estas muestras (L-62 en la figura y L-71 del piezómetro no representado) están en el límite entre la zona vadosa y la saturada.

La tensión o succión de los suelos está representada en términos de pF y puede verse cómo a medida que disminuye la succión aumenta el contenido de humedad de las muestras. En las muestras recogidas a profundidades de 110 y 150 cm (L-62 y L-71) se han obtenido los mayores contenidos de humedad para todos los pF determinados, siendo el contenido neto de humedad o saturación (pF0) de 40.9 y 39.5% de humedad, respectivamente. En las muestras de la ZNS dicho valor oscila entre 30.9 y 34.3% para los procedentes del perfil representado en la figura y entre 27.8 y 38.2% en las correspondientes al no representado.

El contenido neto de humedad a saturación representa la porosidad total de las muestras, siendo estos valores algo inferiores a los determinados a partir de la densidad aparente y densidad real para muestras de piezómetros instalados en este mismo entorno hidrogeológico (entre 41.2 y 50.4%) (Adarve, 1993). Resultados similares han obtenido Casado *et al.* (1992) para muestras areno-arcillosas y arcillosas de la ZNS del Terciario detrítico de Madrid en la determinación de los valores pF mediante la cámara de Richards (entre 37 y 42%), señalando que son valores bastante aceptables aunque algo inferiores a los indicados por Fornés (1988) (en Casado *et al.*, 1992) para estas mismas áreas.

En la gráfica puede observarse también que las muestras recogidas a menor profundidad (30 cm) son las que presentan los menores contenidos de humedad para todos los pF determinados (30.9 y 27.8% a pF0, 16.2 y 17.5% a pF2; 7.2 y 6.4% a pF2.7, 3.3 y 3.2% a pF4.2, y 1.3 y 1.5% a pF6). El contenido de humedad para todas las succiones es muy similar en muestras tomadas a igual profundidad en ambos piezómetros, a la vez que dicha humedad aumenta en todos ellos con la profundidad. Así, además de los citados, en las muestras tomadas a profundidades de 70, 110 y 150 cm tienen, respectivamente, los siguientes contenidos de humedad para los distintos pF determinados y para ambos piezómetros: a 70 cm y para pF0 los contenidos de humedad son de 34.0 y 34.3%; a 110 cm de 34.3 y 38.2%, y a 150 cm de 40.9 y 39.5%; a 70 cm, y para pF2, los valores obtenidos son de 30.5 y 28.3%, a 110 cm de 30.1 y 33.7%, y a 150 cm de 36.3 y 34.2%; para pF2.7, los contenidos de humedad a 70, 110 y 150 cm son, respectivamente, de 15.6 y 15.0%, 18.7 y 20.5%, y 23.6 y 20.4%; y análogamente para el resto de los pF.

Respecto a las curvas características de conductividad hidráulica-humedad obtenidas para cada una de las muestras (figura 1), puede observarse, de acuerdo con Vare-

la (1993), que el valor de la conductividad decrece exponencialmente al disminuir el contenido de humedad y esta disminución es más brusca cuanto más gruesa es la textura del suelo. Se han obtenido curvas características similares para las muestras tomadas a 30, 70, 110 y 150 cm de profundidad en ambos piezómetros, cuyas texturas determinadas mediante el método empírico de Rijtema son, respectivamente, arenosa fina, franco arcillosa, arenosa franca fina y franco areno arcillosa, siendo también la muestra L-75 franco arcillosa. Se puede apreciar cómo las muestras con más alto porcentaje de partículas de mayor tamaño (arena fina y arenosa franca fina) alcanzan valores de conductividad hidráulica algo superiores al resto, siendo además las curvas en estas últimas más verticales que en las primeras, es decir, con decrecimientos más bruscos de la conductividad a medida que disminuye el contenido de humedad.

Movimiento del agua en la zona no saturada: La determinación en laboratorio del contenido de humedad en las muestras inalteradas de substrato procedentes de los piezómetros nos ha permitido extrapolar en cada una de sus curvas de retención el valor de la succión (en cm) que presentan dichas muestras en el momento de su recolección. Los datos de succión obtenidos están representados en los perfiles de la figura 2, donde puede verse la variación del potencial mátrico con la profundidad. En dicha figura se ha señalado también la profundidad del agua (Pa) registrada en los piezómetros durante los meses en que se recogieron las muestras. Para estimar el flujo del agua en la ZNS, hemos representado solamente el potencial mátrico, considerando que éste corresponde básicamente al potencial total, pues la influencia del potencial osmótico es muy limitada, salvo en casos de suelos arcillosos muy salinos (Varela, 1993), y dada la pequeña variación del potencial gravitacional o de posición, se podría admitir que el flujo está controlado principalmente por el potencial de presión.

Como puede verse en la figura 2, para ambos piezómetros el potencial mátrico disminuye en la zona más superficial de los perfiles, y, por tanto, el flujo del agua es descendente desde los 30 cm a los 110 cm y 70 cm, respectivamente. Por otra parte, desde el nivel de saturación en el caso del primer piezómetro representado y los 110 cm en el segundo el agua se mueve en sentido ascendente hasta los 110 cm y 70 cm, respectivamente. A partir de los 110 cm en el segundo piezómetro se observa que el flujo es descendente hasta llegar a la zona saturada.

Esta dinámica del flujo que tiende a converger en algún sector más o menos intermedio de la ZNS sugiere la posibilidad de que algunos compuestos procedentes de los lixiviados podrían acumularse en esos puntos. Por otra parte, puede verse cómo el flujo del agua, y con él la posible migración de

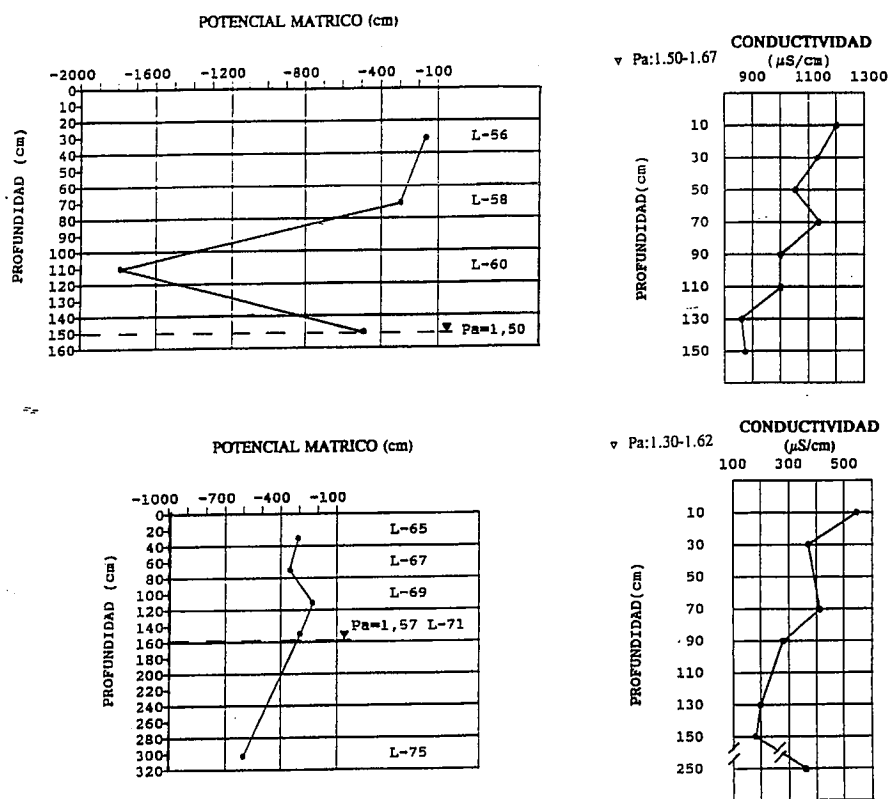


Fig. 2.-Variación del potencial mátrico y de la conductividad eléctrica con la profundidad en muestras de suelo procedentes de dos piezómetros próximos al vertedero de Alcalá de Henares.

Fig. 2.-Variation with depth of matric head and electrical conductivity in soil samples from two piezometers near the Alcalá de Henares landfill.

los compuestos disueltos en ella, tiene un considerable recorrido ascendente en estas zonas, que además podría alcanzar niveles más someros en los momentos en que la evapotranspiración es mayor, lo que apoya el supuesto de la posible llegada de contaminantes a la capa superficial del suelo en estas áreas con pequeños espesores de la ZNS.

**Determinaciones químicas:** En la misma figura 2 se han representado los resultados analíticos de conductividad eléctrica obtenidos en las muestras recogidas a lo largo del perfil de dos piezómetros, uno afectado y otro no por los lixiviados del vertedero. Las concentraciones registradas en las muestras correspondientes al piezómetro afectado por los lixiviados son muy superiores (entre 860 y 1200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) a las obtenidas en las muestras del piezómetro no afectado (entre 191 y 540  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), lo que coincide con la mayor afección encontrada en las aguas subterráneas del primer piezómetro mencionado con respecto al segundo (Adarve y Rebollo, 1993).

En los gráficos puede apreciarse también que a excepción de los primeros centímetros, la conductividad eléctrica presenta los máximos de concentración en la parte intermedia del perfil, coincidiendo, por tanto, con la confluencia del flujo del agua en esa zona, de forma que la conductividad

disminuye con la profundidad desde la superficie a la zona intermedia de la ZNS y aumenta desde la zona saturada a la intermedia. Esta distribución de las concentraciones en la zona vadosa ha podido apreciarse igualmente con diversos parámetros inorgánicos en éstos y otros perfiles de piezómetros construidos en áreas de descarga próximas a vertederos (Adarve, 1993).

Respecto al pH no hay diferencias notables entre ambos grupos de muestras, oscilando entre 7.30 y 8.00 para las procedentes del piezómetro no afectado, y entre 7.60 y 8.20 para el otro. En lo referente al contenido en materia orgánica, es algo superior en las muestras procedentes del piezómetro no afectado (entre 0.07 y 2.75%) que en el afectado por los lixiviados (entre 0.24 y 0.79%). Esta disminución de la M.O. y el ligero aumento del pH se ha observado también en ensayos de laboratorio con suelos básicos superficiales tratados con aguas subterráneas contaminadas por los lixiviados del vertedero citado (Adarve, 1993). Los valores mayores de contenido en M.O. corresponden a los primeros 30 cm del suelo y se observa también una tendencia general de disminución de las concentraciones con la profundidad hasta los 90 y 50 cm, respectivamente, seguido de un ligero aumento de las mismas.

Conclusiones

El estudio realizado es representativo de la zona concreta estudiada y en el periodo de tiempo considerado, y proporciona algunas pautas relativas al movimiento del agua en el perfil de estas zonas de descarga. Los resultados obtenidos han permitido corroborar que el reducido espesor de la ZNS en las áreas de descarga juega un papel primordial en los procesos de contaminación, dado que la dinámica de flujos ascendentes que imperan en determinados momentos pueden transportar diversos elementos o compuestos a zonas más superficiales.

Se ha confirmado también la confluencia del flujo del agua y de las mayores concentraciones de conductividad eléctrica en la parte intermedia de la zona vadosa. Igualmente, se ha encontrado una estrecha relación entre el contenido de humedad y la conductividad hidráulica con la textura de las muestras, de forma que la conductividad hidráulica se reduce al disminuir el contenido de humedad y este descenso es más brusco cuanto más gruesa es la textura del suelo.

Agradecimientos

A la C.I.C.Y.T., proyecto NAT89-0995, por la financiación de esta investigación y al Centro de Ciencias Medioambientales del CSIC de Madrid, donde hemos podido realizar los análisis físicos y químicos mencionados.

Referencias

Adarve, M.J. (1993). *Tesis Doctoral*. Universidad de Alcalá.  
 Adarve, M.J. y Rebollo, L.F. (1993). *Problemática Geoambiental y Desarrollo* 1:205-214.  
 Atwood, D.F. y Dean J.D. (1985). *Environ. Engin. Proc. Spec. Conf.*: 112-119.  
 Casado, M; Llamas, M.R. y Cruces de Abia, J. (1992). *Hidrog. y Rec. Hidr.*, XVII:443-461.  
 Demetra Copoulos, A.C. et al. (1988). *Water Resour. Bull.*, 22(4): 601-604.  
 Duschesneau, M. y Partridge, L.J. (1985). *Environ. Engin.* XVI: 1-9.  
 Gavasci, R.; Misiti, A.; Rolle, E. y Sirini, P. (1992). *Proc. 6th Int. Solid Wastes Congr.*  
 Gould, J.P.; Pohland, F.G. y Cross, W.H. (1988). *Partic. Sci. and Tech.*, 6: 381-392.  
 Hernández, A. J. y Pastor, J. (1989). *Henares, Rev. Geol.*, 3: 67-102.  
 Kool, J.B. y Parker, J.C. (1988). *Water Resour. Res.*, 24(6): 817-830.  
 Nielsen, D.M.; Genuchten, V. y Biggar, J. (1985). *Water Resour. Res.*, 22(9): 895-1085.  
 Rijtema, P.E. (1969). *Soil moisture forecasting*. Winand Staring Centre, Wageningen, 28 pp.  
 Varela, M. (1993). *La zona no saturada y la contaminación de las aguas subterráneas*:11-26.