

Flujo Preferencial de Agua y Solutos en un Suelo Tropical sin Disturbar¹

E. Solórzano*, R. Radulovich*

ABSTRACT

Work was conducted with a soil classified as Oxic Dystropept, highly aggregated and practically undisturbed, under secondary forest and long-abandoned pasture, in the humid tropical region of Sarapiquí, Costa Rica. The behavior of water and solute flux was studied using the dye Rodhamine B in the field and in undisturbed soil cores in the laboratory, and solute (CaCl₂) breakthrough curves in the laboratory. Pathways of preferential flux were determined for water and solutes, through macropores that generate a biphasic behavior, with two types of flux: one mobile (inter-aggregates) and one practically immobile (intra-aggregates). The effects of these factors in relation to water are that excesses drain rapidly due to structure, while large amounts of moisture are retained in the soil matrix due to clayey texture. The results of the solute breakthrough curves indicate that, due to the high resistance to leaching exhibited by the soil, the biphasic behavior represents an efficient mechanism of nutrient retention against the high amounts of percolating waters. However, the soil matrix also presents high resistance to the incorporation of solutes, which tend to travel preferentially, via macropores, with little opportunity to become incorporated in the intra-aggregate space. It is suggested that the relevance of these processes in perennial agricultural systems should be studied, because of their similarity with the natural systems described here, with possible negative effects on fertilizer application efficiency.

INTRODUCCION

Recientes modelos de caracterización del flujo de agua en el suelo proponen un comportamiento bifásico, presentando una solución móvil en la fase inter-agregados, formada por los macroporos, mientras que en la matriz del suelo, o fase intra-agregados, se encuentra una solución básicamente inmóvil contenida en los microporos (5, 11, 16, 17).

Así, en suelos altamente estructurados, el flujo de agua podría ocurrir principalmente por caminos preferenciales, dentro de la fase inter-agregados, producidos éstos por la alta agregación y la acción de micro-

COMPENDIO

El presente trabajo se realizó con un suelo clasificado como Oxic Dystropept, altamente agregado y poco disturbado, bajo bosque secundario y pastizal abandonado por largo tiempo en la región tropical húmeda de Sarapiquí, Costa Rica. Se estudió el comportamiento del flujo de agua y de solutos mediante el uso del tinte Rodhamina B en el campo y utilizando muestras indisturbadas en laboratorio, y de curvas de traspaso de iones (CaCl₂) en laboratorio. Se determinó la presencia de caminos de flujo preferencial del agua y solutos en el suelo, vía macroporos, generando un comportamiento bifásico, con dos tipos de flujo: uno móvil (inter-agregados) y otro prácticamente estático (intra-agregados). La consecuencia de estos factores, con relación al agua, es que los excesos drenan rápidamente debido a la estructura, mientras que la matriz retiene alta humedad debido a la textura arcillosa. Los resultados de las curvas de traspaso de iones indican que, debido a la alta resistencia que presenta el suelo a la lixiviación, el comportamiento bifásico representa un eficiente mecanismo de retención de nutrientes contra el lavado que produciría la alta precipitación de la zona. Sin embargo, la matriz del suelo también ofrece alta resistencia a la incorporación de solutos, los cuales tienden a viajar preferencialmente vía macroporos, con poca oportunidad de incorporación a los espacios intra-agregados. Se sugiere estudiar la relevancia de estos procesos en sistemas agrícolas de cultivos perennes ya que podrían presentar gran similitud con los sistemas naturales aquí estudiados, lo que podría incidir negativamente en aspectos de eficiencia en la aplicación de fertilizantes.

organismos y raíces (2, 3, 15). La importancia de los flujos preferenciales del agua se relaciona con la dinámica de entrada y salida de nutrientes y otros solutos a la matriz, ya que la solución percolante, vía macroporos, interacciona débilmente con ésta. Sin embargo, estos procesos han sido poco estudiados en suelos tropicales y sus efectos en la dinámica nutricional del suelo son poco entendidos, e incluso controversiales (10, 12, 13).

Este estudio, diseñado para elucidar algunos de los procesos de intercambio de iones entre matriz del suelo y solución percolante, se basó en análisis de patrones de conducción de agua a través del perfil y en la generación en laboratorio de curvas de traspaso de iones (8) utilizando muestras sin disturbar. Se logró una caracterización física del patrón de drenaje interno, relacionando a la vez su influencia en la resisten-

¹ Recibido para publicación el 20 de junio 1988.

* Profesores, Escuela de Ingeniería Agrícola, Universidad de Costa Rica Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San José, Costa Rica.

cia o facilidad ofrecida por el suelo al intercambio de solutos

MATERIALES Y METODOS

Descripción del suelo

El área de estudio está localizada en Puerto Viejo de Sarapiquí, Costa Rica (10:26 N, 83:59 O), en el Anexo La Guaría de la Estación Biológica La Selva. Tiene una elevación de alrededor de 50 msnm, con una precipitación promedio anual de 4000 mm, sin período seco definido y temperatura media de 24°C (Estación Meteorológica La Selva, 1957-83). Las muestras de suelo provienen de un bosque secundario y de un pastizal poco utilizado y abandonado por varios años, por lo que presentan poca disturbación (9, 10).

El suelo en estudio es de origen volcánico, clasificado como *Oxic Dystrocept* (F. Sancho y R. Mata, 1987, clasificación sin publicar). Se caracteriza por la ausencia de capas limitantes al drenaje hasta una profundidad mínima de 2 m, alto contenido de arcilla, alto grado de agregación, densidad aparente menor de 1.0 g cm⁻³ hasta 1 m de profundidad, marcada dispersión tras agitación por sonicación, alto grado de compactibilidad, baja resistencia a la penetración y altas tasas de infiltración inicial que superan los 100 cm h⁻¹ (9, 10, 14).

Tanto los experimentos de flujo como de traspaso de iones descritos seguidamente, fueron realizados durante la época lluviosa, con el suelo alrededor de capacidad de campo.

Áreas conducentes durante el flujo saturado

Las secciones conducentes de agua libre en el suelo se estudiaron a nivel de campo y de laboratorio, usando el tinte Rodamina B disuelto en agua, con una concentración aproximada de 1:10 v/v. (1).

En los análisis de laboratorio se utilizaron 20 muestras de suelo sin disturbar, contenidas en cilindros de acero de 20 cm de largo por 10.75 cm de diámetro interno, con grosor de paredes de 2 mm. La saturación se realizó con agua destilada; seguidamente, se adicionó a cada muestra un litro de la solución de tinte, manteniendo siempre una columna de líquido de 1 cm sobre la superficie de la muestra.

En el campo, la solución del tinte se aplicó sobre 10 lotes de 50 cm por lado, con una regadera, para simular condiciones de lluvia intensa, no permitiendo el desarrollo de carga sobre el suelo en ningún momento.

Las secciones conducentes marcadas por el tinte, en ambos casos, se obtuvieron mediante disección de las muestras de suelo, colocando láminas plásticas transparentes sobre ellas y dibujando las siluetas o secciones marcadas por el tinte. En el caso de los cilindros, la disección mostrada corresponde a 18 cm de profundidad.

Curvas de traspaso de iones

Para generar las curvas de traspaso de iones (7, 8), se utilizaron 15 muestras de suelo sin disturbar, contenidas en los cilindros de acero descritos y recolectadas al azar en las áreas de estudio. Para un proceso de homogenización de la solución de la matriz, se saturaron las muestras en el laboratorio con CaCl₂ 0.5 mN como solución de saturación, manteniendo una columna de 1.0 cm de solución sobre la superficie de la muestra. Esta concentración, 0.5 mN, asemeja a la encontrada naturalmente en este suelo. La conductividad eléctrica (CE) de las soluciones empleadas se utilizó como parámetro representativo de sus concentraciones.

Una vez saturada la muestra, esto es, cuando la conductividad eléctrica de la solución efluente (CE_{ef}) fue igual a la de la solución de saturación (CE_{sat}), se interrumpió la aplicación de CaCl₂ 0.5 mN, agregándose una solución de conductividad eléctrica 10 veces superior (CaCl₂ 5 mN) al momento que la columna de CaCl₂ 0.5 mN alcanzó la superficie de la muestra. Se estableció de nuevo y sin interrupción, la carga de 1 cm sobre la superficie, esta vez con CaCl₂ 5 mN que se convirtió en la solución de traspaso (CE_{tras}). Así, primero se saturó la muestra con una solución diluida (0.5 mN) la cual fue luego reemplazada por una solución diez veces más concentrada (5 mN).

Durante el proceso de saturación con la solución 0.5 mN se muestreó la solución efluente cada 50 ml midiendo su CE (CE_{ef}). Luego del cambio de solución de 0.5 a 5 mN, la conductividad eléctrica de la solución efluente se midió cada 15 ml para los primeros 150 ml, aumentando luego el volumen de las muestras hasta un total recolectado de alrededor de 5000 ml.

Similarmente, se generaron curvas de traspaso de iones en forma inversa, provocando una acción de lavado de los iones, en muestras que se habían sometido a la incorporación de solutos a la matriz, según el procedimiento anterior. Para ello se saturó primero con la solución de CaCl₂ 5 mN y el lavado se realizó con CaCl₂ 0.5 mN como solución de traspaso, utilizando un procedimiento análogo al descrito anteriormente en la generación de las curvas.

La representación gráfica de las curvas muestra en el eje de las ordenadas el cociente de las concentraciones efluentes y de traspaso, mientras que en las abscisas se ubica la fracción del volumen de poros drenada. La fracción de volumen de poros drenada (VP_i) está dada por el cociente del volumen efluente colectado entre el "volumen de poros" unitario de la muestra, definido por Nielsen y Biggar (7) como el equivalente al contenido volumétrico de agua a saturación

Para el cálculo del cociente de concentraciones (C/C_0 , donde C = conductividad eléctrica de la solución efluente, y C_0 = conductividad eléctrica de la solución de traspaso) se empleó la relación siguiente:

$$C/C_0 = (CE_{ef} - CE_{sat}) / (CE_{tras} - CE_{sat}) \quad (1)$$

RESULTADOS Y DISCUSION

El suelo estudiado, con una textura arcillosa, es por su estructura un suelo bien drenado y de buenas condiciones de trabajabilidad, aún bajo condiciones de alta humedad. Las muestras de los cilindros presentaron alta conductividad hidráulica saturada, con un promedio de 80 cm h^{-1} y una amplia variación, desde los 20 hasta los 350 cm h^{-1} , incluso, para muestras recolectadas en el campo separadas sólo 50 cm entre sí

La existencia de conductos de flujo preferencial en el suelo, para la condición de flujo saturado, se evidenció en los patrones de conducción marcados por el tinte Rodhamina B (Fig. 1), donde se observó cla-



Fig. 1. Secciones de flujo preferencial, marcadas por el tinte Rodhamina B, en muestras sin disturbar contenidas en los cilindros.

ramente la presencia de canales y grietas en el suelo que actúan como conductores principales del agua hacia niveles inferiores del perfil. Aún de mayor importancia fue el encontrar un patrón semejante en flujo preferencial en el campo, con aplicaciones simulando lluvia que no superaron la capacidad de infiltración del suelo (Fig. 2), lo cual evidenció que el agua fluye por macroporos (o espacios inter-agregados) sin necesidad de una carga sobre el suelo. Estos caminos de flujo preferencial le confieren al suelo características deseables en cuanto a drenaje, pues, en condiciones de alta pluviosidad, evacúan rápidamente el agua y restauran el equilibrio líquido-gas necesario para el buen desarrollo de la vegetación

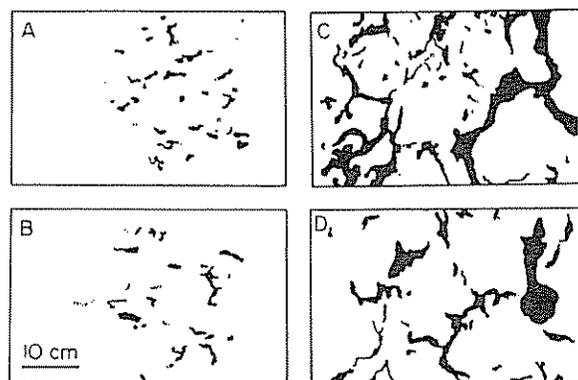


Fig. 2. Patrones de flujo preferencial en el campo obtenidos por aplicación de tinte. Areas de pastizal (A, B) y de bosque (C, D), a dos profundidades: A y C = 10 cm, B y D = 20 cm. La solución con tinte fue aplicada simulando precipitación, en ningún momento excediendo la capacidad de infiltración del suelo

Los patrones de conducción marcados por el tinte, presentaron continuidad a diferentes profundidades e indicaron la existencia de cauces principalmente verticales, explicando las altas tasas de infiltración encontradas y su variabilidad (Fig. 2). Así mismo, las grietas observadas, en algunos casos de tamaño considerable, fueron encontradas aún en temporadas de alta precipitación, donde su presencia obedeció a condiciones de estructura y no de humedad. También, es notable que en su gran mayoría los conductos se encontraban llenos de material esponjoso, producto posiblemente de descomposición de raíces. Así, se deduce que no toda el área con tinte participa en conducción sino que éstas comprenden una matriz de material poroso altamente conductente.

La Fig. 3 presenta curvas de traspaso de iones en dos modalidades, ascendente y descendente, para el suelo en estudio. Se encontró que la solución percolante traspasó rápidamente la muestra a bajos volúmenes de poros percolados (0.1 a 0.2 volúmenes de poros), como resultado de la presencia de caminos de flujo preferencial, con escasa interacción con la solu-

ción del suelo en los espacios intra-agregados. También, se observó la resistencia del suelo a ser completamente lavado por la solución percolante, lo cual se evidenció por el comportamiento asintótico de las curvas hacia el valor de completa sustitución $C/C_0=1$ y $C/C_0=0$, ascendente o descendente, respectivamente, aún después de 4 y 5 volúmenes de poros percolados (Fig. 3).

La caracterización del sistema de conducción mediante curvas de traspaso de iones ha generado modelos matemáticos que explican el comportamiento del agua en su recorrido por el perfil de suelo (4, 8, 11, 17). De la comparación de las formas de las curvas obtenidas con las curvas típicas de los modelos de flujo (ver recuadro de la Fig. 3), se observó su correspondencia con el patrón bifásico "C" especialmente en la forma asintótica hacia el valor de 1.0 del cociente de concentración, después de varios volúmenes de poros percolados. También, se manifestó la presencia de alta macroporosidad en el rápido cambio inicial de los valores del cociente de concentración, los cuales alcanzaron, tanto en ascenso como en descenso, valores de $C/C_0 = 0.5$ en menos de un volumen de poros.

El paso de agua por estos canales preferenciales durante condiciones de saturación promueve que ésta no

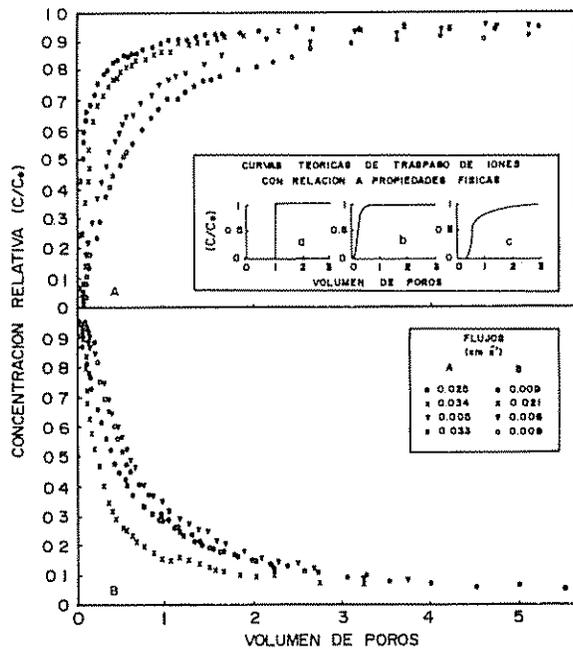


Fig 3 Curvas de traspaso de iones obtenidas para muestras de suelo sin disturbar en cilindros, en forma ascendente (A) y descendente (B) en relación a incorporación o lavado de solutos, respectivamente. En el recuadro se muestran patrones típicos: a-flujo pistón, b-flujo por macroporos, c-flujo bifásico. (Adaptados de McVoy, (6))

se mezcle con la solución almacenada en la matriz, lo que define la existencia del sistema bifásico característico de suelos muy estructurados. Es importante notar que esto sucedió en el campo, sin necesidad de carga simulando precipitación (Fig. 2).

Las características tan apreciadas para el drenaje parecieron desfavorables para la adición de fertilizantes u otros productos que requieran su disolución en agua mediante la lluvia, pues, bajo condiciones de alta precipitación y en suelos que exhiben flujo preferencial podría producirse una pérdida considerable de éstos, por percolación hacia niveles profundos, debido a la poca interacción con la matriz, disminuyendo la asimilación para uso de los cultivos. Esto indicaría la necesidad de efectuar aplicaciones de fertilizantes escalonados en este tipo de suelos, bajo condiciones de alta precipitación, en forma similar a las prácticas recomendadas para suelos arenosos.

El mantenimiento del contenido nutricional en los sistemas naturales es sin embargo, favorecida por estos procesos ya que el contenido de solutos presentes en la matriz se verá poco alterado por el agua percolante por flujo preferencial. Esto tendería a disminuir la lixiviación y podría representar un mecanismo poco explorado de mantención de homeostasis en sistemas naturales.

El flujo preferencial, así como el comportamiento bifásico observado en los sistemas naturales estudiados, hacen pensar que los sistemas agrícolas de cultivos perennes podrían presentar características similares; sin embargo, esta comprobación, como el estudio detallado del flujo en sistemas agrícolas de mayor laboreo, sugiere la necesidad de mayor investigación al respecto relacionada con el movimiento del fertilizante a través del perfil del suelo y sus pérdidas por percolación.

CONCLUSIONES

Los sistemas naturales estudiados, con suelos altamente agregados y sometidos a alta precipitación, presentan un comportamiento bifásico del flujo de agua y solutos a través del perfil. Este comportamiento confiere a los suelos características de buen drenaje y de alta retención de humedad, a la vez que fomenta la mantención de su contenido nutricional, al percolar el agua por caminos de flujo preferencial. Esto último, aparentemente, representa una desventaja en relación a la incorporación de solutos en la matriz, afectando negativamente la eficiencia de la aplicación de fertilizantes.

Se sugiere el estudio de los efectos de estos mecanismos en las relaciones nutricionales en sistemas agri-

colas de cultivos perennes. dada su similitud con los sistemas naturales aquí descritos, así como de otros sistemas agrícolas con mayor grado de disturbación del suelo por laboreo

LITERATURA CITADA

1. ANDERSON, J.L.; BOUMA, J. 1973. Relationships between hydraulic conductivity and morphometric data of an argillic horizon. Soil Science Society of America Proceedings (EE UU) 37:408-413
2. AUBERTIN, G.M. 1971. Nature and extent of macropores in forest soils and their influence on subsurface water movement. New York, USDA Forest Service Research 33 p. Paper no. 192.
3. BEASLEY, R.S. 1976. Contribution of subsurface flow from the upper slopes of forested watersheds to channel flow. Soil Science Society of America Journal (EE UU) 40:219-222
4. BEVEN, K.; GERMANN, P.F. 1982. Macropores and water flow in soil. Water Resources Research (EE UU) 18:1311-1325
5. HILLEL, D. 1980. Fundamentals of soil physics. New York, Academic Press. 413 p.
6. McVOY, C. W. 1985. Water and solute movement in an aggregated tropical soil: use of iodide and dyes for a morphological characterization. M.Sc. Thesis. Florida, University of Florida. 101 p.
7. NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. 1961. Miscible displacement in soils: I. Experimental information. Soil Science Society of America Proceedings (EE UU) 25:1-5
8. NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. 1962. Miscible displacement in soils: III. Theoretical considerations. Soil Science Society of America Proceedings (EE UU) 26:216-221.
9. RADULOVICH, R.; SOLLINS, P. 1985. Compactación de un suelo aluvial por tráfico de personas. Agronomía Costarricense (C.R.) 9:143-148.
10. RADULOVICH, R.; SOLLINS, P. 1987. Improved performance of zero-tension lysimeters. Soil Science Society of America Journal (EE UU) 51:1386-1388
11. RAO, P.S.C.; GREEN, R.E.; BALASUBRAMANIAN, V.; KANEHIRO, Y. 1974. Field study of solute movement in a highly aggregated oxisol with intermittent flooding: II. Picloram. Journal of Environmental Quality (EE UU) 3:197-202
12. RUSSELL, A.E.; EWEL, J.J. 1985. Leaching from a tropical Andept during big storms: a comparison of three methods. Soil Science (EE UU) 139:181-189
13. SEYFRIED, M.S.; RAO, P.S.C. 1987. Solute transport in undisturbed columns of an aggregated tropical soil: preferential flow effects. Soil Science Society of America Journal (EE UU) 51:1434-1444.
14. SOLLINS, P.; ROBERTSON, G.P.; UEHARA, G. 1988. Nutrient mobility in variable- and permanent-charge soils. Biogeochemistry (EE UU). (En prensa).
15. TIPPKOTTER, R. 1983. Morphology, spatial arrangement and origin of macropores in some hapludalls, West Germany. Geoderma (Nether) 29:355-371
16. VAN GENUCHTEN, M.T.; DALTON, F.N. 1986. Models for simulating salt movement in aggregated field soils. Geoderma (Nether) 38:165-183.
17. VAN GENUCHTEN, M.T.; WIERENGA, P.J. 1976. Mass transfer studies in sorbing porous media. I. Analytical solutions. Soil Science Society of America Journal (EE UU) 40:473-480.