Agronomía Costarricense 20(2): 105-112. 1996

MÉTODO DE LABORATORIO PARA INVESTIGAR FLUJOS DE AGUA Y FERTILIZANTES EN SUELOS SIN DISTURBAR[1/*]

*José F. Aguilar***
*José R. Chaves***
*Jorge M. Arroyo***
*Edwin Solórzano***
*Philippe Baveye****
*Ricardo Radulovich[2/]***

ABSTRACT

Laboratory method to investigate flow of water and fertilizers in undisturbed soils. The effects that the high degrees of structure and micro-structure of tropical soils can have on water flow and interaction with fertilizers have not been thoroughly studied, in spite of being possibly of great relevance on economic and environmental aspects. This article describes laboratory equipment and instrumentation, as well as sampling methodology, designed for the study of undisturbed soil samples in the laboratory or under natural rainfall. The apparatus described are mainly a combination of electronic balances connected to a microcomputer which registers readings at pre-defined time intervals, coupled to a high-precision rainfall simulator operated through a peristaltic pump. After describing the methodology, equipment and instrumentation used, results that can be obtained are illustrated, briefly indicating their potential applications to fertilizer management and related water pollution.

INTRODUCCIÓN

Muchos suelos tropicales exhiben un alto grado de estructuración, que se expresa en gran medida a nivel de microagregados (Sánchez, 1976). Esta situación, combinada con los efectos de una biota muy activa y grietas naturales del suelo, resulta en una porosidad amplia y muy variable, que va desde macro hasta microporos, con la solución del suelo dentro de estos últimos a menudo considerada como una fase estancada o inmóvil. Esto tiene un efecto muy marcado en flujos de agua, solutos y gases a través de estos suelos, lo cual solamente en los últimos años ha venido a ser reconocido (Wild, 1972; Thomas y Phillips, 1979; Bouma, 1981; White, 1985; Sollins y Radulovich, 1988), y se antepone al paradigma tradicional basado en el suelo agrícola de clima templado, que además incluye frecuente destrucción de la estructura por laboreo (Arya *et al.*, 1992; Radulovich *et al.*, 1992).

En términos teleológicos, Sollins y Radulovich (1988) han descrito el alto grado de estructuración de muchos suelos tropicales húmedos como un elemento que favorece la preservación

1/ Recibido para publicación el 28 de junio de 1996.
2/ Autor para correspondencia: rrad@ns.fing.ucr.ac.cr
* Proyecto 340-92-574 de la Vicerrectoría de Investigación, Universidad de Costa Rica. Esta investigación fue apoyada en parte por la donación DHR-5600-G-001070-00 del Programa de Cooperación en Ciencia y Tecnología (PSTC), Oficina del Asesor Científico, USAID, a través de la Universidad de Cornell. Ithaca, NY, USA.
** Escuela de Ingeniería Agrícola, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
*** Departamento de Ciencias del Suelo, Cultivo y Atmósfera, Universidad de Cornell. Estados Unidos.

de nutrimentos contra el efecto de excesiva precipitación. Esto, sin embargo, se aplica solamente contra la lixiviación de solutos que se encuentran ya incorporados en la matriz del suelo y que naturalmente son incorporados por una relativamente lenta descomposición de la materia orgánica. En el caso de una adición masiva de solutos, por fertilización o aplicación de otros químicos, el fenómeno es a la inversa, ya que se inhibe la incorporación de solutos, la cual se da principalmente por difusión hacia adentro de los agregados, debido al poco tiempo de interacción que permite el rápido flujo por macroporos de la solución percolante (Sollins y Radulovich, 1988; Solórzano y Radulovich, 1989). En este sentido, la no incorporación de estos solutos a la matriz del suelo no es un fenómeno de lixiviación sino de pérdida por flujo preferencial (conocido en inglés como "bypass flow").

Las implicaciones de este flujo preferencial pueden ser enormes, en particular para la agricultura y para la contaminación de aguas por las aplicaciones de sustancias químicas en estos suelos. Por una parte, la eficiencia de incorporación de fertilizantes puede ser diferente de lo que tradicionalmente se asume por características químicas de las arcillas; por otra parte, esa menor incorporación, junto con la rapidez con que el agua se mueve por estos suelos, permite concluir que una gran proporción de los fertilizantes y otros químicos agregados al suelo percolarán rápidamente fuera de éste, terminando como contaminantes en fuentes de agua subterráneas o superficiales.

Ya que cada proceso debe ser estudiado al nivel en que ocurre, el flujo preferencial debe estudiarse a nivel de campo. Sin embargo, debido a limitaciones metodológicas, problemas de variabilidad espacio-temporal y replicabilidad, larga duración de los trabajos de campo y elementos presupuestarios, se consideró idóneo el poder estudiar el fenómeno en laboratorio, trabajando con muestras de suelos sin disturbar y de un volumen adecuado que permita inferir respecto a los procesos en el campo, que posteriormente podrán ser corroborados *in situ*. Este artículo reporta sobre la metodología que se desarrolló con este propósito, ilustrando con algunos ejemplos los resultados que se pueden obtener con ella.

MATERIALES Y MÉTODOS

El objetivo principal del método es estudiar el movimiento de agua y solutos a través del suelo a nivel de laboratorio, reproduciendo lo más fielmente posible las condiciones de campo respecto a las características de la muestra. De esta forma, muestras de suelo pueden ser sometidas a condiciones controladas de aplicación de lluvia y/o solutos, y los procesos pueden ser caracterizados con un detalle imposible de lograr en el campo.

Un primer punto a resolver es la mínima unidad de muestra requerida para ese fin, dado que tamaños pequeños de muestra podrían no representar condiciones de campo u ofrecer otras limitaciones, mientras que muestras relativamente grandes son poco prácticas de manipular.

Debido a la característica expansión radial de una gota de agua que incide sobre el suelo, se consideró la forma cilíndrica para la muestra como la más apropiada, y en adelante se hace referencia solamente a esa configuración.

No existe una definición precisa del volumen mínimo de muestra para estudios de flujo a nivel de laboratorio; sin embargo, 2 consideraciones indican que el tamaño necesario para este tipo de estudio se sitúa en una escala de centímetros: el tamaño de los agregados varía de milímetros a alrededor de uno o más centímetros y, mientras no se llegue a saturación, el agua fluirá preferencialmente por mesoporos y las paredes de macroporos, procediendo eventual y progresivamente a fluir por macroporos llenos (Radulovich *et al.*, 1989), lo cual indica que solamente los macroporos más grandes, como serían fisuras en el suelo, no son considerados a nivel de pocos centímetros, y en este caso solamente en la medida que el suelo se aproxima a saturación.

Otra condición, necesaria para minimizar la influencia de las paredes del cilindro que contiene la muestra, lo cual permite además alguna libertad respecto a flujo lateral, es que el área de la muestra debe ser considerable en comparación con su perímetro. Matemáticamente, la relación perímetro/área (P/A) permite una estimación del grado de influencia de las paredes en los procesos que se desarrollan en la muestra.

En la Figura 1 se muestran valores de la relación P/A para varios diámetros. Se aprecia que la relación disminuye radicalmente y tiende a la asíntota para cilindros con diámetros >10 cm. En esta investigación se utilizaron cilindros de 15,5 cm de diámetro, los cuales presentan una relación P/A de 0,26 (cm/cm^2), la que se consideró apropiada porque diámetros mayores (20 ó 50 cm, por ejemplo) no logran mejorar sustancialmente la relación, con la desventaja de elevar la masa de la muestra en

un 67% para el caso de 20 cm de diámetro y en 9,4 veces para el de 50 cm. Según se observa en la Figura 1, de ninguna manera debe trabajarse con muestras con diámetros < 10 cm. La longitud de la muestra es un criterio más manejable respecto a la representatividad, y puede variarse según la capa o profundidad de suelo que desee estudiarse. Sin embargo, una muestra muy delgada, aparte de ser frágil, puede presentar el problema de que se sature prematuramente ya que debido a la discontinuidad en su extremo inferior, es posible que para que el agua fluya fuera de la misma la formación de una pequeña carga interna podría saturarla.

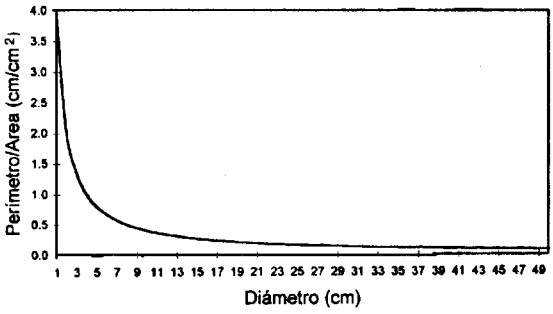

Fig. 1. Relación de la razón de perímetro y área en función del diámetro de un cilindro.

En este estudio, y utilizando cilindros de 25,0 cm de longitud, la mayoría de las muestras de suelo utilizadas fueron de 20 a 22 cm, tomadas desde la superficie del suelo después de un corte manual de la vegetación.

La obtención de la muestra en sí es otra de las facetas importantes en la búsqueda de que la muestra represente la condición de campo. El muestreo debe garantizar la mínima disturbación del suelo, lo que significa principalmente evitar la compactación y el resquebrajamiento de la muestra. Por ello, los cilindros utilizados son de acero, de pared delgada (3,0 mm) y tienen su cara inferior biselada en el borde externo para que el empuje de la penetración sea hacia afuera. Antes de muestrear, las paredes del cilindro se cubren con grasa inorgánica para lograr un mejor deslizamiento de la muestra dentro del cilindro, lo cual a la vez permite un sellado entre la muestra y la pared del cilindro. La ausencia de flujo entre la muestra y la pared ha sido corroborada en varias ocasiones, mediante el uso de tintes (por ej., Sollins y Radulovich, 1988; Solórzano y Radulovich, 1989; Radulovich *et al.*, 1989; 1992).

La inserción del cilindro en el suelo se hace aplicando presión en forma uniforme sobre el borde superior, manteniendo en todo momento la verticalidad y utilizando una combinación de remoción manual de suelo y martilleo suave. Para evitar la presencia de gradientes de potencial mátrico, y también para evitar resquebrajamiento en suelos secos y fangueo en suelos húmedos, se requiere que al muestrear el suelo esté a capacidad de campo. De esta forma, la dirección del flujo de agua en la muestra será determinada solamente por la gravedad. Esta condición, que debe obtenerse en el campo en forma previa al muestreo, se aproxima bastante a situaciones durante la estación de lluvias, que es el énfasis del estudio. La condición de capacidad de campo se logra mojando el suelo hasta saturación, cubriéndolo luego con un plástico y dejándolo que drene de 24 a 48 h; la instalación de un tensiómetro en al área de muestreo sirve para controlar esta condición. Durante un período de lluvias pueden aprovecharse aquellos aguaceros que lleven el suelo a capacidad de campo, muestreando de 24 a 48 h después de la última lluvia.

Es importante notar que un estudio preliminar en suelos que presentan altos grados de microagregación (Chaves, 1989), encontró que tras un período prolongado de sequía la capacidad de campo no se logra con sólo una saturación y drenado. La implicación es que el suelo posee un estado "seco" y uno "húmedo" y que el paso del primero al segundo no se logra rápidamente. Esto es congruente con el fenómeno que se estudia aquí, en el sentido de que los microagregados son resistentes al mojado. Esta situación agrega un elemento de complejidad al trabajo, ya que implica que es preferible no tomar muestras durante la estación seca, a menos que se mantenga constantemente la humedad del lote experimental, lo cual puede ser contrario a los procesos naturales de formación y mantenimiento de la estructura de estos suelos mediante encogimiento por secado y expansión por humedecimiento (Kursar *et al.*, 1995).

Una vez que se ha insertado el cilindro a la profundidad deseada, el suelo alrededor de éste es removido excavando, lo cual facilita su extracción junto con exceso de suelo al fondo del mismo. Ese exceso de suelo es removido en el campo, mas no mediante un corte que podría sellar los poros, sino piqueteando el fondo de la muestra con un cuchillo. Los cilindros conteniendo las muestras se

transportan del campo al laboratorio dentro de bolsas plásticas para minimizar la evaporación. Para evitar que las muestras se disturben, lo que incluye evitar compactación del suelo al fondo, éstas se transportan y mantienen en una estructura de madera que tiene una capacidad de seis cilindros. Esta estructura permite que el cilindro esté apoyado sólo en 4 puntos en su parte superior externa, logrando evitar que la parte inferior sufra compactación ya que se encuentra suspendida. Para disminuir fuentes de error, todas las muestras son sometidas a análisis en un lapso de 48 h después de tomadas. También se mide volumen, contenido gravimétrico de humedad a capacidad de campo y saturación, y conductividad hidráulica saturada de la muestra, lo cual permite inferir sobre su porosidad y otras características. Las muestras pueden ser analizadas de 2 formas: bajo condición de lluvia natural o con lluvia simulada.

La disposición del equipo para cada modalidad se muestra en las Figuras 2 y 3, respectivamente. En cuanto al equipo con lluvia natural, el principio fundamental es garantizar que la lluvia incida sobre la superficie de la muestra de suelo que se encuentra en el cilindro, de una forma cuantificable.

La caseta para la muestra de suelo (No. 4 en Figura 2), posee una apertura en el techo para la entrada de la lluvia, en donde se ubica un tubo de 16 cm de alto con un diámetro igual al diámetro interno del cilindro con la muestra; este saliente evita que haya aporte de agua por salpicadura o escurrimiento del techo de la caseta a la muestra. La estructura que sostiene la muestra descansa sobre una balanza digital con capacidad de 18 kg con precisión de ±0,1 g. Por debajo de la muestra, a una distancia de 5 cm, se coloca otra balanza digital, con capacidad de 2,1 kg y precisión de ±0,01 g, cuya función es recolectar el agua que traspasa la muestra. Un recipiente que actúa como pluviómetro es colocado fuera de la caseta (No. 1 en Figura 2), descansando en una tercera balanza digital con capacidad de 2,1 kg y precisión de ±0,01 g. Las 3 balanzas electrónicas están conectadas a un computador para el registro de datos, los cuales se reciben mediante un programa producido en la Escuela de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Costa Rica (SERIAL, versión 1,2), que permite registrar continuamente las mediciones de las 3 balanzas (el programa SERIAL permite configurarse de manera que se pueden hacer registros a diferentes intervalos de tiempo, de 1 a 45 s). Los datos así registrados en función del tiempo son: el peso del cilindro con muestra conforme recibe el agua de lluvia y la pierde por percolación, el peso del agua efluente que ha traspasado la muestra y el peso del agua llovida.

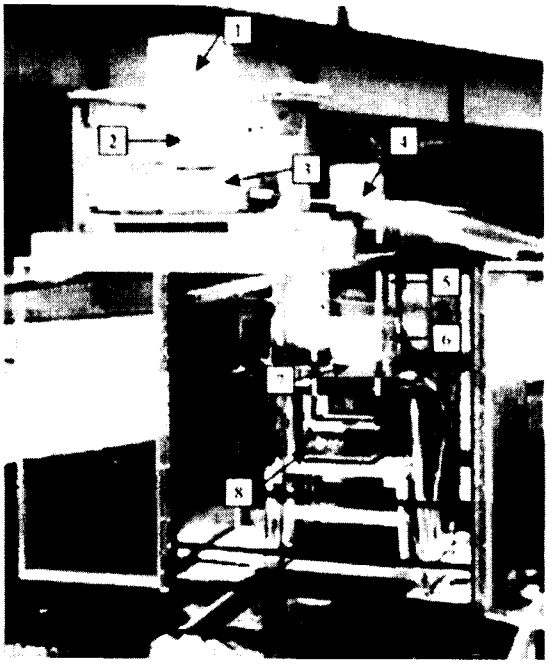

Fig. 2. Equipo para realizar pruebas con lluvia natural: 1. Caseta para la recolección de agua que tiene un saliente cilíndrico (pluviómetro). 2. Depósito con sifón que evacúa el agua cada 1,5 L. 3. Balanza digital con capacidad de 2,1 kg. (±0,01g), para control pluviométrico. 4. Caseta con muestra de suelo que va ser sometida a la lluvia natural. 5. Muestra de suelo sin disturbar, que es soportada por una estructura con cuatro puntos de apoyo. 6. Depósito donde se recolecta el agua de salida de la muestra, con un sifón que tiene la misma función que el anterior. 7. Balanza digital con una capacidad de 2,1 kg (±0,01g), para control del efluente. 8. Balanza con capacidad de 18 kg (±0,1g), que registra la dinámica del peso de la muestra durante el experimento. Adicionalmente, todas las balanzas están monitoreadas por computador.

Esta serie de datos permiten inferir la dinámica del flujo de agua a través del suelo bajo condiciones de lluvia natural. También es posible con este sistema realizar análisis de flujo de solutos, lo cual se logra agregando fertilizante o reactivos a la superficie del suelo antes de someterlo a lluvia, recolectando el efluente para su posterior análisis. La metodología con solutos es descrita con más detalle en relación al método de laboratorio con simulación de lluvia.

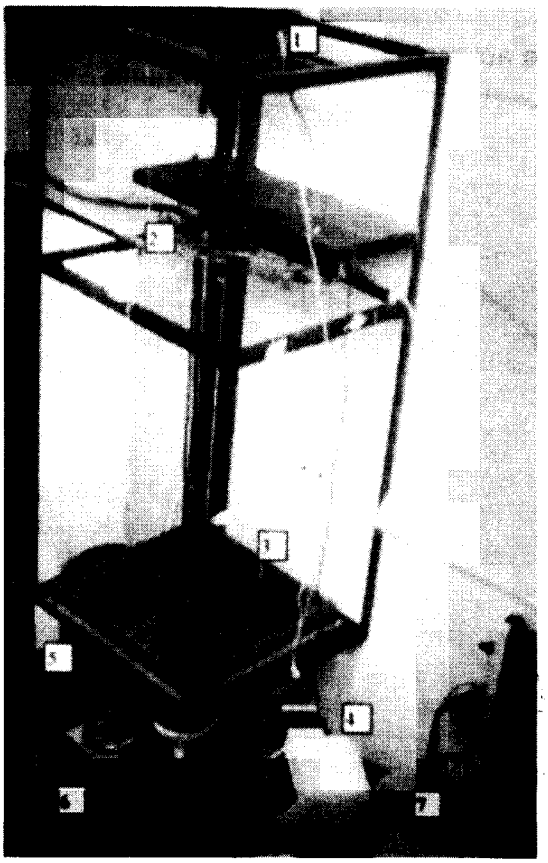

Fig. 3. Equipo de pruebas con lluvia artificial: 1. Motor enfriado por ventilador que permite movimiento circular, el cual es transmitido a un eje. 2. Interfase que permite colocar las mangueras para la caída libre de las gotas. Dicha interfase tiene una leva conectada al eje que facilita el movimiento excéntrico circular. 3. Malla de plástico (apertura de 1,8 mm) sobre la cual impacta la gota antes de llegar a la superficie del suelo. 4. Bomba peristáltica regulable, con mangueras No. 13. 5. Cilindros con muestras de suelo sin disturbar (capacidad para cuatro a la vez). 6. Balanzas digitales recibiendo efluente de las muestras, monitoreadas por computadora. 7. Depósito de agua que alimenta la bomba peristáltica.

El trabajo de laboratorio con lluvia simulada implicó primero diseñar y construir un simulador de lluvia satisfactorio y operacional, que permitiera aplicar el agua sobre la superficie de la muestra en forma de gotas pequeñas, homogéneamente distribuidas sobre el área, con tasas de aplicación variables y regulables. En este estudio, en contraste con aquellos de erosión de suelos, el impacto de la gota de agua sobre la superficie del suelo no se consideró relevante. El sistema que mejor se ajustó a estas condiciones se ilustra en la Figura 3. El agua es succionada de un depósito por una bomba peristáltica programable, la cual usa una manguera de tygon No. 13; la salida de la manguera gotea a una altura de 70 cm sobre la muestra. A una altura de 5 cm sobre la muestra, la gota en caída libre encuentra una malla con aberturas de 1,8 mm contra la cual impacta resultando en una dispersión de gotas pequeñas sobre la superficie del suelo con un patrón de mojado de un diámetro aproximado a 7,5 cm. Para garantizar el mojado de toda la superficie de la muestra, la manguera está sometida a una moción circular de un diámetro de 10 cm, gracias a la acción de un rotor operado por un motor eléctrico (Figura 3). El sistema así construido tiene 4 mangueras que entregan la misma cantidad de agua a respectivos cilindros, los cuales pueden o no estar sobre balanzas como se describió arriba, o pueden ser sometidos a flujos de solutos donde lo importante es la captura del efluente en forma de volumen contra el tiempo.

El sistema permite aplicaciones de lluvia simulada en tasas regulables entre 2,0 y 50,0 mm /h. Para el estudio de flujos de solutos se siguieron 2 modalidades básicas. Una consiste en aplicar como lluvia simulada soluciones de concentración conocida para estudiar la dinámica del traspaso de iones de una forma análoga al método desarrollado por Nielsen y Biggar (1961) para condiciones de flujo saturado, aunque con la innovación de que se puede realizar aquí bajo condiciones de flujo insaturado.

La segunda modalidad consiste en aplicar sobre el suelo un soluto, en polvo o granular (por ej., fertilizante) o en forma de solución concentrada (por ej., un fertilizante líquido), sometiendo luego la muestra a lluvia, ya sea simulada o natural. En ambas modalidades, aparte de conocer la tasa de aplicación de agua o solución, el elemento clave es recolectar el efluente en volúmenes prestablecidos para determinar la concentración del soluto en función del flujo a través del suelo. Esto último puede realizarse específicamente para un tipo de solutos o en general mediante determinación de la conductividad eléctrica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Algunos resultados obtenidos serán explicados como ejemplos de las aplicaciones que se pueden desarrollar con el uso de estos equipos. El

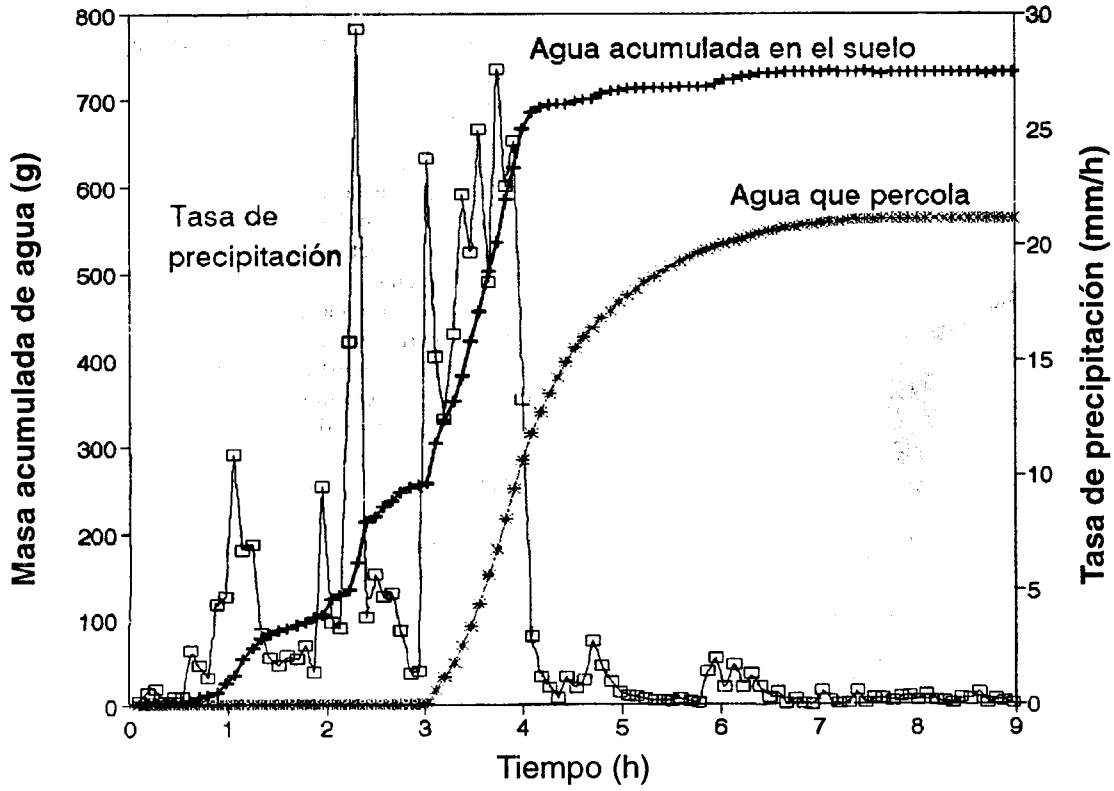

Fig. 4. Muestra de datos obtenibles durante un evento de lluvia natural. En la gráfica se aprecian: intensidad de la lluvia, valores acumulativos de la lluvia (agua acumulada en el suelo) y peso del efluente (agua que percola).

suelo que se utilizó para las pruebas fue clasificado como Typic Hapludand, de la Escuela de Agricultura de la Región del Trópico Húmedo (EARTH).

Capacidad de traspaso y retención de agua en el suelo

La Figura 4 muestra un evento de medición bajo lluvia natural, en la que se puede observar la precisión con que se logran registrar las 3 variables principales: la tasa de precipitación (intensidad de lluvia mm/h), el peso del agua acumulado en la muestra de suelo (lluvia), y el agua que percola a través de la muestra (salida de efluente). Como era de esperar, existe una gran variación en la tasa de precipitación, la cual se calculó como la diferencia de peso de agua precipitada (registrada por la balanza cada 10 seg) entre el área de recepción del cilindro en un tiempo determinado. En un inicio el agua precipitada es totalmente acumulada en el suelo hasta las 3 h, donde el acumulado de agua fue de aproximadamente 300 g y es en este momento donde la tercer variable, el agua que percola, empieza a registrarse en la balanza.

De este tipo de medición se puede obtener la velocidad con que el agua traspasa la muestra de suelo, la cual, según fuera mostrado por Radulovich *et al.* (1992) bajo condiciones de lluvia artificial, aumenta sustancialmente por sobre la tasa de aplicación inicial en la medida que se incrementa la tasa de aplicación de lluvia.

Este tipo de relaciones es de gran relevancia para el entendimiento del paso del agua y solutos disueltos en ella a través de los suelos, y su medición y comprensión permitirá refinar los diversos insumos que utilizan los modelos hidrológicos.

Traspaso de iones en una muestra de suelo con lluvia artificial

En la Figura 5 se muestra el traspaso a través del suelo de los iones de una solución de $CaCl_2$ con conductividad eléctrica de 290 µS aplicada por lluvia artificial, con intensidades variables de aplicación.

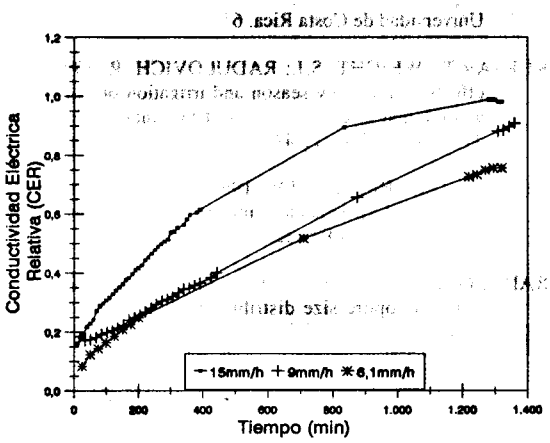

Fig. 5. Traspaso a través del suelo de una solución de $CaCl_2$ de conductividad eléctrica de 290 µS aplicada por lluvia artificial, con 3 diferentes intensidades de aplicación.

Se aprecia que a mayor intensidad de la precipitación, se logra un mayor traspaso de la solución a un menor tiempo de aplicación. Puede verse que con una tasa de aplicación de 15 mm/h se logra 0,9 de conductividad eléctrica relativa (CER = [Conductividad de salida-Conductividad Base] / [Conductividad de Entrada-Conductividad Base]) de la solución percolante en 850 min, mientras que con una tasa de aplicación de 9 mm/h se requieren cerca de 1.400 min; para una tasa de aplicación de 6,1 mm/h el tiempo requerido para alcanzar niveles altos de CER es aún mayor. Esto implica que la tasa de precipitación, y con ella de percolación, determina la interacción entre la solución percolante y la matriz del suelo. A mayor velocidad de flujo del agua por el suelo, es menor la interacción con éste, y los solutos que entran con el agua traspasarán más rápidamente el suelo.

Este tipo de información puede ser utilizada en diversas aplicaciones de fertilizantes u otros químicos al suelo.

Traspaso de fertilizante en la muestra de suelo

En la Figura 6 se ilustra la tasa de traspaso de fertilizante, a partir de una aplicación de 4 g de éste depositados sobre la muestra de suelo, la que posteriormente se sometió a una intensidad de lluvia artificial de 10 mm/h. Se utilizó un fertilizante nitrogenado granular de baja solubilidad, y se comparó el volumen de agua (o velocidad de traspaso) entre el fertilizante en gránulo contra el mismo pero molido a un diámetro de 0,5 mm (en polvo). Puede verse que el fertilizante granular es más resistente a disolución y traspaso de la muestra de suelo que el mismo en polvo.

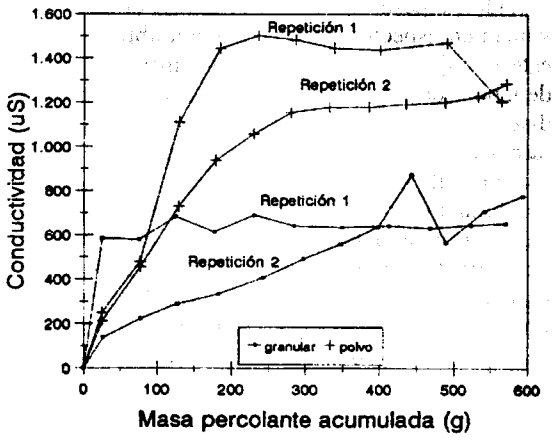

Fig. 6. Traspaso de fertilizante nitrogenado granular vs. polvo, aplicado en la superficie de muestras de suelo con una intensidad de lluvia artificial de 10 mm/h.

Experimentos con fertilizante 10 veces más soluble, que no se muestran aquí, sugieren una reversión en el patrón, por lo que la información mostrada en la Figura 6 no puede utilizarse para conclusiones en este momento.

Este tipo de experimentación puede utilizarse para determinar la mejor forma de aplicación de fertilizante para lograr una mayor incorporación del mismo al suelo, disminuyendo pérdidas por percolación profunda y la consecuente contaminación de aguas.

De los anteriores ejemplos puede concluirse que el método desarrollado para estudiar flujos a través de muestras de suelo sin disturbar que ha sido descrito aquí junto con algunas aplicaciones, permite el estudio de características de los suelos

tropicales de una forma previamente imposible. Estas y otras aplicaciones en curso, que conllevan algunas corroboraciones en el campo, permitirán refinar las diversas estrategias y recomendaciones actuales sobre el manejo de fertilizantes y otros químicos en suelos tropicales con alto grado de agregación.

RESUMEN

Los efectos que pueden tener los altos grados de estructuración y microestructuración de muchos suelos tropicales en el flujo de agua y la interacción con los fertilizantes han sido poco estudiados, a pesar de ser posiblemente de gran relevancia en aspectos económicos y ambientales. En este trabajo se describe equipo e instrumentación de laboratorio, así como metodología de muestreo, diseñados para estudiar muestras de suelo sin disturbar en el laboratorio o bajo condiciones de lluvia natural. Los aparatos descritos consisten de combinaciones de balanzas electrónicas conectadas a un computador que registra las mediciones en intervalos definidos de tiempo, así como un simulador de lluvia de alta precisión, la cual se logra gracias al uso de una bomba peristáltica. Tras describir la metodología seguida y los equipos e instrumentos utilizados, se ilustran los resultados obtenibles, y se indican brevemente sus potenciales aplicaciones al manejo de fertilizantes y la consecuente contaminación de aguas.

AGRADECIMIENTO

Se agradece la colaboración y facilitación de terrenos brindada por la Escuela de Agricultura de la Región Tropical Húmeda, en particular al Dr. B.K. Singh.

LITERATURA CITADA

ARYA, L.M.; DIEROLF, T.S.; RUSMAN, B.; SOFYAN, A.; WIDJAJA-ADHI, I.P.G. 1992. Soils structure effects on hydrologic processes and crop water availability in Ultisols and Oxisols of Sitiung, Indonesia. Soil Management CRSP, Bulletin No. 92-03, Raleigh, North Carolina. 51 p.

BOUMA, J. 1981. Soil morphology and preferential flow along macropores. Agricultural Water Management, 3:235-250.

CHAVES, R. 1989. Relaciones hídricas de tres Inceptisoles tropicales. Tesis Lic., Escuela de Ingeniería Agrícola, Universidad de Costa Rica. 65 p.

KURSAR,T.; WRIGHT, S.J.; RADULOVICH, R. 1995. The effects of the rainy season and irrigation on soil water and oxygen in a seasonal forest in Panama. Journal of Tropical Ecology 11:497- 516.

NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. 1961. Miscible displacement in soils: I. Experimental information. Soil Science Society of America Proceedings 25:1-5.

RADULOVICH, R.; SOLORZANO, E.; SOLLINS, P. 1989. Soil macropore size distribution from water breakthrough curves. Soil Science Society of America Journal 53:556-559.

RADULOVICH, R.; SOLLINS, P.; BAVEYE , P.; SOLORZANO, E. 1992. Bypass water flow through unsaturated microaggregated tropical soils. Soil Science Society of America Journal 56:721-726.

SOLLINS, P.; RADULOVICH, R. 1988. Effects of soil physical structure on solute transport in a weathered tropical soil. Soil Science Society of America Journal, 52:1168-1173.

SOLORZANO, E.; RADULOVICH, R. 1989. Flujo preferencial de agua y solutos en un suelo tropical sin disturbar. Turrialba 39:179-183.

SANCHEZ, P.A. 1976. Properties and management of soils in the tropics. John Wiley & Sons, New York.

THOMAS, G.W.; PHILLIPS, R.E. 1979. Consequences of water movement in macropores. Journal of Environmental Quality 8:149-152.

WHITE, R.E. 1985. The influence of macropores on the transport of dissolved and suspended matter through soil. Advances in Soil Science 3:95-120.

WILD, A. 1972. Nitrate leaching under bare fallow at a site in northern Nigeria. Journal of Soil Science 23:315-324.