

## Revisión crítica de los métodos de medida de la lixiviación de nitrato en suelos agrícolas

C. Ramos<sup>1</sup> y M. Kücke<sup>2</sup>

1. Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias, Apdo Oficial, 46113 Moncada, Valencia.
2. Institute of Crop Science and Grassland Research, F.A.L., Bundesallee 50, 38116 Braunschweig, Germany.

**RESUMEN.** Aunque la lixiviación de nitrato tiene una gran importancia medioambiental, su medida no es fácil. Los métodos de medida más directa se basan en el muestreo de la solución del suelo a la profundidad a la que se quiere efectuar la medición, la determinación de la concentración de nitrato de esta solución, y la medida del drenaje. En este trabajo se revisan las principales opciones disponibles para determinar el drenaje señalando los problemas y ventajas de cada una de ellas y las condiciones más apropiadas para aplicarlas. Se revisa de manera especial la utilización de los métodos basados en el balance de agua y de cloruro, así como los que emplean medidas de gradiente hidráulico y conductividad hidráulica del suelo. En los métodos que utilizan el balance de agua, la medida o estimación de la evapotranspiración resulta fundamental, ya que ésta es uno de los términos más importantes del balance; sin embargo, medir la evapotranspiración resulta, en general, difícil y por ello se emplean métodos semi-empíricos para su estimación. También se discuten los diferentes métodos de muestreo de la solución del suelo con sus ventajas e inconvenientes y los problemas que plantea la utilización de lisímetros para la medida de la lixiviación de nitrato.

**ABSTRACT.** Despite the environmental importance of nitrate leaching, its measurement is not easy. The more direct measurement methods are based on the sampling of the soil solution at a given depth, its nitrate content determination, and the measurement of downward flow of this solution. In this review the different methods of soil solution sampling are discussed as well as their advantages and problems. Also, several of the more common methods of drainage measurement or estimation are considered, with emphasis on the conditions where their use is more appropriate. A special attention is given to the water and chloride balance methods, as well as the methods for hydraulic gradient and hydraulic conductivity measurement or estimation. Water balance methods are very sensitive to evapotranspiration measurement, and this variable is difficult to measure accurately. An review of the different evapotranspiration methods will be made. The problems that the use of lysimeters present for nitrate leaching measurement will also be considered.

---

*Correspondencia:* C. Ramos, IVIA, Apdo. Oficial, 46113 Mocada  
*E-mail:* carlos.ramos@ivia.es

### 1.- Introduction.

Aunque la lixiviación de nitrato tiene una gran importancia en la contaminación de las aguas subterráneas por nitrato, su medida no resulta fácil y, en los pocos casos en que se han comparado diferentes métodos de medida, los resultados han sido contradictorios (Kleeberg 1995, Kücke and Kleeberg 1997).

Básicamente, la lixiviación de nitrato se puede medir conociendo para cada período corto de tiempo el flujo de solución del suelo, a través de un determinado plano, y su concentración media de nitrato. La exactitud de estas dos mediciones determina la de la lixiviación de nitrato.

Existen varios métodos para medir cada una de las dos variables mencionadas: el flujo hacia abajo de la solución del suelo (que en adelante denominaremos drenaje) y la concentración de nitrato en esta solución. Este mismo tema fue revisado por Addiscott (1990) y Armstrong y Burt (1993).

En este trabajo se hace una revisión crítica de los diferentes métodos de medida de estas variables, subrayando los problemas y ventajas de cada método.

### 2.- Métodos de medida del drenaje.

Wagenet (1986) hizo una revisión de los métodos de medida del flujo de agua en el suelo a una determinada profundidad y concluyó que sólo hay unos pocos métodos directos. Entre los principales problemas de estos métodos están: a) el carácter puntual de la medida; y b) la modificación del suelo debida a la instalación del equipo de medida. Estas son quizás las razones por las que estos métodos directos no se han empleado mucho.

Los métodos indirectos de medida son más frecuentes. Entre ellos tenemos:

- Métodos basados en medidas de gradiente hidráulico y conductividad hidráulica.
- Métodos basados en el balance de agua.
- Modelos de simulación (que, en general, combinan los dos métodos anteriores con algún método de estimación de la evapotranspiración).

En este trabajo no se considerarán los modelos de simulación ya que es un método de estimación demasiado indirecto. Una revisión sobre enfoques recientes en la simulación del flujo de agua y solutos en suelos es la de

Feyen et al. (1998).

2.1.- Métodos de medición del drenaje basados en medidas del gradiente hidráulico y la conductividad hidráulica del suelo.

Estos métodos calculan el flujo de agua entre dos puntos del suelo mediante el producto del gradiente de potencial hidráulico por la conductividad hidráulica media del suelo ( $K$ ) entre los dos puntos. Esta última depende de la humedad volumétrica,  $\theta$ , o de la tensión del agua en el suelo,  $h$ . Puesto que la determinación de  $K(\theta)$  o  $K(h)$  es costosa, existen diferentes fórmulas empíricas que aproximan estas funciones a partir de propiedades fisicoquímicas del suelo (textura, densidad aparente, contenido en materia orgánica, etc.). Estas relaciones empíricas se han denominado "funciones de pedotransferencia" (FPT). Schaap y Leij (1998) evaluaron la bondad e incertidumbres de varias FPT y concluyeron que la exactitud de la predicción de estas funciones dependía mucho de los datos empleados en su calibración.

Algunas revisiones sobre estos métodos para la estimación de las propiedades hidráulicas de los suelos son las de Rawls et al. (1991), van Genuchten et al. (1992) y más recientemente las de Rajkai et al. (1996), Timlin et al. (1996) y Williams et al. (1996). Otros métodos de medida de las  $K(\theta)$  o  $K(h)$  del suelo son los de Libardi et al. (1980), Ankeny et al. (1991), y los recopilados en Topp et al. (1992).

En el método de Libardi, se emplea un método gráfico para obtener los parámetros de la ecuación:

$$K = K_0 \exp [\beta (\theta - \theta_0)] \quad (1)$$

donde  $\beta$  es una constante y  $K_0$  y  $\theta_0$  son los valores de  $K$  y  $\theta$  durante la infiltración en régimen permanente, respectivamente.

En el método de Ankeny et al. (1991) sólo se necesitan medidas de infiltración, en régimen permanente, obtenidas mediante un infiltrómetro de tensión.

Simunek et al. (1998) compararon tres métodos de campo para la medida de las propiedades hidráulicas del suelo: 1) un método que utiliza un infiltrómetro de tensión, 2) un método que emplea un penetrómetro de cono modificado, y 3) un método que usa un equipo de extracción secuencial de humedad del suelo. Los tres métodos emplean la inversión numérica de la ecuación de Richards y se seleccionaron por su simplicidad experimental.

Otro método sencillo de campo para estimar las características hidráulicas de la capa superficial del suelo es el de Shani et al. (1987). Este método sólo requiere la medida del radio de encharcamiento cuando se aplican al suelo diferentes caudales de agua mediante goteros.

Green et al. (1986) revisaron los métodos de campo disponibles para la determinación de la función  $K(\theta)$  o  $K(h)$ , dando más énfasis al método del drenaje transitorio, también llamado del "perfil instantáneo" así como algunas versiones simplificadas del mismo (Chong et al. 1981; Libardi et al. 1980).

Ahuja et al. (1993) encontraron una alta correlación entre el cambio de humedad en la capa superficial del suelo (0-30 cm) en los dos días siguientes después de humedecer mucho el suelo y cubrirlo con un plástico para impedir la evaporación,  $(-\Delta\theta)$ , y la conductividad saturada media del perfil del suelo ( $K_s$ ). Así pues, se puede estimar la variación espacial de  $K_s$  a partir de unas pocas medidas experimentales de  $K_s$  y medidas de  $(-\Delta\theta)$ .

Recientemente, Kosugi y Nakayama (1997), propusieron un método para la estimación de la curva característica de humedad del suelo y de  $K(h)$  a partir de la medida de la tensión del agua en el suelo durante el proceso de redistribución del agua. Este método se puede aplicar a perfiles de suelo estratificado y no requiere establecer condiciones de contorno ni en la superficie del suelo ni en su capa inferior.

2.2.- Métodos basados en el balance de agua.

En estos métodos el drenaje,  $D$ , se calcula en función de los otros términos del balance de agua de una capa de suelo, durante un período de tiempo determinado:

$$D = \text{Lluvia} + \text{Riego} - \text{Evapotranspiración} - \Delta H - \text{Escorrentía}$$

donde  $\Delta H$  es el incremento de agua del suelo. En esta ecuación se supone que no hay flujos laterales de agua (excepto la escorrentía superficial).

La exactitud de la estimación del drenaje, depende de aquella con la que se determinen los otros términos del balance. La importancia relativa de estos términos varía con las diferentes situaciones: por ejemplo, para períodos largos (uno o más meses) en época de riego, el término  $\Delta H$  es pequeño en comparación a los otros, en cambio, en un ciclo de riego,  $\Delta H$ , puede ser muy próximo al término Evapotranspiración (ET). En una parcela en barbecho, durante la época de lluvias, la principal fuente de incertidumbre puede ser la falta de buenas medidas de escorrentía, sobre todo si el suelo tiene cierta pendiente y estaba húmedo en el momento de la lluvia.

En muchos casos, la exactitud en la determinación de la ET es muy importante para tener buenas estimaciones del drenaje. Así pues, la medida de la ET constituye uno de los principales retos para la estimación del drenaje por balance de agua. Los métodos micrometeorológicos de medida de la ET requieren un equipo complejo y caro, así como experiencia en su manejo, por lo que su uso no es frecuente. Itier y Brunet (1996) hicieron una revisión de estos métodos. Métodos para la medida o estimación de la escorrentía se describen en Schwab et al. (1996).

Debido a las dificultades que presenta la medición directa de la ET, ésta se calcula más a menudo a partir de datos climáticos. Una revisión de estos métodos se puede encontrar en Jensen et al. (1990), Burman y Pochop (1994), Allen et al. (1994) y Doorenbos y Pruitt (1984).

Amatya et al. (1995) compararon varios métodos (Makkink, Priestley-Taylor, Turc, Hargreaves-Samani y

Thornthwaite) con el de Penman-Monteith y encontraron diferencias de hasta  $\pm 16\%$  en la determinación anual de la evapotranspiración de referencia,  $ETo$ , de aquellos métodos con el de Penman-Monteith.

En la estimación de la ET, conviene considerar dos casos: a) la ET no está limitada por un déficit de agua en el suelo u otro factor, y b) la ET está limitada por la falta de agua o nutrientes, o algún factor no climático que afecta el crecimiento normal de las plantas (enfermedades o plagas). En el primer caso, hay métodos que calculan la ET del cultivo a partir de la ET máxima de un cultivo de referencia (normalmente una cubierta vegetal de césped bien regado), ( $ETo$ ), mediante la expresión:  $Kc \cdot ETo$ , donde  $Kc$  es un coeficiente que depende del cultivo y de la fase de desarrollo en la que se encuentra (Fig. 1). Este método puede adaptarse a la situación de déficit de agua en el suelo, utilizando un coeficiente modificado ( $Ks$ ):

$$Ks = (\theta - \theta_{LL}) / (\theta_t - \theta_{LL}) \quad (2)$$

donde  $\theta$  es la humedad volumétrica media del perfil del suelo,  $\theta_{LL}$  es el límite inferior de  $\theta$  y  $\theta_t$  es el valor umbral de  $\theta$  por debajo del cual la evapotranspiración disminuye por debajo de la ET potencial. Valores de  $\theta_t$  se pueden obtener de Doorembos y Kassam (1979).

Hatfield y Allen (1996) evaluaron las fórmulas de Penman-Monteith y Priestley-Taylor para calcular  $ETo$  y concluyeron que en climas semiáridos la de Penman-Monteith dio buenos resultados, mientras que en climas húmedos la de Priestley-Taylor fue mejor. En condiciones de déficits de agua, las funciones de ajuste si no se calibran con datos locales pueden dar errores en la estimación de la ET de hasta el 50%.

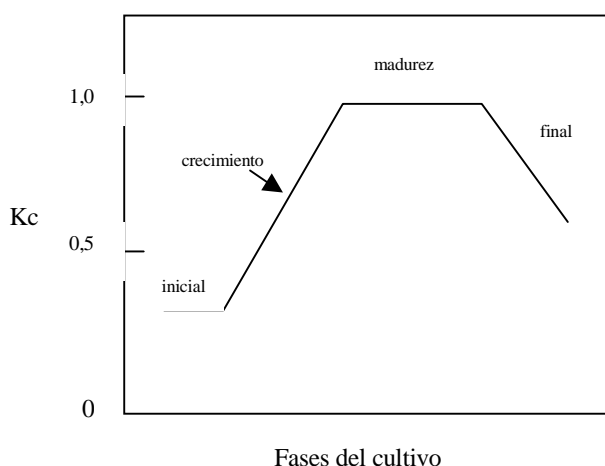


Fig. 1. Variación típica del coeficiente  $Kc$  a lo largo del desarrollo del cultivo (adaptado de Allen et al., 1997).

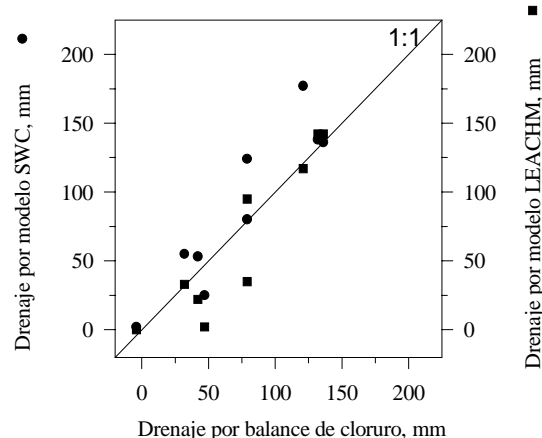
Jensen et al. (1997) estudiaron el efecto de varias simplificaciones en el procedimiento de Penman-Monteith adaptado por la FAO para determinar  $ETo$  y concluyeron que en situaciones donde los datos requeridos por este

método no están disponibles, o su calidad es algo dudosa, es preferible emplear métodos que requieren menos variables climáticas como el de Hargreaves et al. (1985).

### 2.3.- Balance de cloruro.

El balance de cloruro se ha empleado para estimar el drenaje (Slavich y Yang 1990; Walker et al., 1991; Lidón et al. 1994; Al-Jamal et al., 1997; Snow et al., 1999), la lixiviación de nitrato (Pratt et al., 1978; Dasberg et al., 1984; Ramos, 1988) y la recarga de acuíferos (Claasen et al. 1986; Allison et al. 1994).

#### Parcela A



#### Parcela B

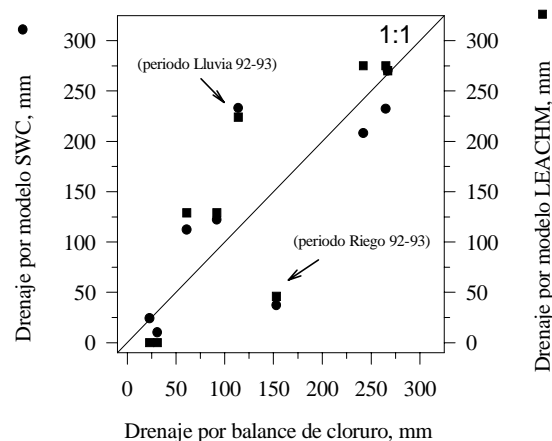


Fig. 2. Comparación del drenaje medido en dos huertos de cítricos con tres métodos diferentes (Lidón et al., 1999).

Lidón et al. (1999) compararon el drenaje calculado mediante balance de cloruro con el calculado mediante dos modelos de diferente grado de complejidad (el modelo LEACHM y un modelo sencillo de capacidad de retención de agua por el suelo) en un huerto de cítricos durante tres

años y obtuvieron un acuerdo razonable entre los diferentes métodos (Fig. 2). Snow et al. (1999) en un experimento de riego de eucaliptos con aguas residuales, encontraron que el drenaje calculado empleando un balance de cloruro fue similar al obtenido mediante un modelo mecanístico (se encontraron diferencias de  $\pm 25\%$ ).

### 3.- Métodos de muestreo de la solución drenante.

#### 3.1.- Lisímetros.

Los lisímetros permiten obtener muestras de la solución que drena y, además, el volumen de drenaje. Sin embargo, este método que podría considerarse como el método estándar de medida de la lixiviación de nitrato presenta también algunos inconvenientes:

- los lisímetros en los que se puede recoger los lixiviados suelen ser caros (Goulding y Webster, 1992).
- las condiciones del suelo en el lisímetro, rara vez son representativas de las condiciones del suelo en la parcela experimental en la que se quiere obtener las medidas, tanto en lo relativo al movimiento del agua como a algunos componentes del ciclo del nitrógeno en el suelo, principalmente la mineralización y la desnitrificación.
- pueden presentar problemas de poca profundidad para el desarrollo de las raíces.
- en suelos en los que se forman grietas con facilidad, pueden haber problemas de flujo preferencial en la zona de contacto del suelo con las paredes del lisímetro (Poss et al. 1995).
- por algunos de los efectos mencionados anteriormente o por otros, el crecimiento de las plantas en los lisímetros puede ser diferente del que ocurra fuera del lisímetro, y con ello la evapotranspiración puede ser también diferente.

En algunos casos, se han empleado monolitos de suelo no alterado, para evitar uno de los inconvenientes señalados (Armstrong y Burt, 1993; Shepherd y Webb, 1999). En los lisímetros llamados de gravedad, el drenaje ocurre sólo cuando la tensión del agua en la parte inferior del suelo del lisímetro es igual a cero. Para evitar este inconveniente que no ocurre bajo condiciones normales de campo, se puede emplear un sistema de succión con tubos porosos que permiten mantener una tensión de agua en el suelo en la capa inferior del lisímetro (Hoyningen-Hühne y Bramm, 1978).

#### 3.2.- Muestreo de suelo.

Hay algunos métodos que evalúan la lixiviación de nitrato a partir de la variación del nitrato presente en el suelo entre dos fechas. Este método se ha empleado en Alemania para determinar la lixiviación de nitrato durante el invierno: la diferencia entre el nitrato del suelo en el otoño y en primavera se considera que se ha lixiviado durante el invierno (Scheffer y Ortseifen, 1997). En este caso, no hace falta conocer el drenaje. Sin embargo, el método no tiene en cuenta las variaciones en el contenido de nitrato del suelo

atribuibles a la mineralización, desnitrificación, y otros términos del ciclo del nitrógeno.

En otros casos, se muestrea el suelo para determinar la concentración de nitrato de la solución del suelo y esta concentración se multiplica por el drenaje estimado por cualquiera de los métodos discutidos anteriormente (Kücke y Kleeberg, 1997).

Otros investigadores muestrean el suelo hasta gran profundidad y determinan la lixiviación de nitrato a partir de la velocidad de movimiento de los picos de concentración del nitrato (Bouwer et al. 1997).

El método basado en el muestreo profundo del suelo es costoso ya que hace falta maquinaria pesada y, además, una variación en la concentración de nitrato en profundidad puede ser debida parcialmente a la desnitrificación (Lammel, 1990).

En la medida de la lixiviación de nitrato basado en el muestreo de suelo hay que tener en cuenta la posible alteración que se puede introducir en el sistema en el que hacemos las mediciones (compactación del suelo por los muestreos, etc.).

#### 3.3.- Cápsulas porosas de succión.

Las cápsulas porosas se emplean con frecuencia para la extracción de la solución del suelo en condiciones de campo. Son relativamente baratas, se pueden instalar fácilmente y permiten el muestreo de solución del suelo con cierta frecuencia (Goulding y Webster, 1992). Se recomienda que la succión que se aplica a los tubos que llevan las cápsulas sea sólo ligeramente superior a la tensión del agua en la zona del suelo donde se muestrea (Barbee y Brown, 1986).

El volumen de suelo muestreado no es muy grande y depende, en parte, de la humedad del suelo. En cualquier caso, el número de cápsulas a emplear depende de la variabilidad espacial de la concentración de nitrato esperada y de la precisión que se desee. Por ejemplo, Alberts et al. (1977) encontraron que en sus mediciones de campo, para obtener un valor medio que estuviera dentro del 5% y 10% del valor verdadero, con un 95 % de nivel de confianza, hacía falta tener 246 y 64 cápsulas, respectivamente.

Normalmente los muestreadores de cápsula cerámica constan de un tubo de PVC en el que en un extremo se pega una cápsula cerámica porosa y en el otro extremo, que es el que sobresale del suelo, lleva un tapón que permite la aplicación de una determinada succión que se mantiene casi constante durante varios días. Estos muestreadores se instalan en un agujero que se hace en el suelo con un diámetro ligeramente superior al del tubo que lleva la cápsula cerámica, introduciéndolos hasta que la cápsula cerámica llega al fondo del agujero. Para facilitar el contacto hidráulico de la cápsula con el suelo de alrededor, se suele preparar inmediatamente antes de introducir el muestreador en el agujero una pasta hecha con el mismo suelo o con caolín que se introduce en el fondo del agujero. Como los tubos suelen sobresalir del suelo, ello dificulta las labores agrícolas y, para resolver

este problema, en ocasiones se instalan los muestreadores en oblicuo, para que la superficie del suelo en la vertical donde está la cápsula el suelo se pueda cultivar como el resto de la parcela.

Beckmann et al. (1992) estudiaron el contacto de las cápsulas cerámicas con el suelo y encontraron evidencia visual de compactación y grietas en el suelo alrededor de las cápsulas. Las grietas que se pueden formar en los suelos arcillosos pueden aumentar a medida que el suelo se seca y reducir sustancialmente la superficie de contacto de la cápsula con el suelo y reducir la facilidad de extracción de la solución del suelo. También es posible que se produzca flujo preferencial en la zona de contacto del tubo del muestreador con el suelo; la importancia de este flujo en la representatividad de la muestra es variable.

En cuanto a la comparación de los resultados obtenidos con las cápsulas porosas con los obtenidos mediante muestreo de suelo, los resultados en diferentes estudios son variables. Poss et al. (1995) encontraron que en un luvisol ambos métodos dieron resultados similares cuando las concentraciones de nitrato en la solución del suelo eran superiores a 10 mg/l. Para concentraciones inferiores las concentraciones obtenidas por muestreo de suelo fueron menores que las obtenidas con cápsulas cerámicas. Kücke y Kleeberg (1997) encontraron, también en un luvisol, que las concentraciones de nitrato fueron similares en períodos en los que éstas eran inferiores a unas 12 mg/l, pero cuando las concentraciones fueron mayores, los valores obtenidos con cápsulas cerámicas fueron hasta cuatro veces superiores a los obtenidos por muestreo de suelo; en suelos arenosos, los resultados con los dos métodos fueron similares. En suelos francos, Ramos y Domingo (resultados no publicados) compararon la concentración de nitrato y cloruro obtenida por estos dos métodos y no encontraron una diferencia significativa entre los dos métodos.

### 3.4.- Muestreadores de bandeja (“Pan samplers”).

Estos muestreadores son unos recipientes en forma de bandeja que se instalan a una cierta profundidad en el suelo y permiten recolectar el drenaje. Se considera que este tipo de muestreadores está especialmente indicado en condiciones en las que es probable que exista un flujo preferencial importante (White, 1987). Jemison y Fox (1994) consideran que son la mejor opción para medir la lixiviación de nitrato, si se pueden instalar sin alterar las capas superiores del suelo. Sin embargo, estos muestreadores, si no se aplica succión, sólo pueden obtener muestras de solución del suelo bajo condiciones de saturación y, por tanto, en esta situación se pueden producir flujos laterales de la solución drenante y obtener eficiencias de recogida de la solución inferiores al 100% (Boll et al. 1982; Jemison y Fox, 1992). Así pues, esta eficiencia necesita evaluarse experimentalmente y ello resta utilidad al método.

Sin embargo, Barbee y Brown (1986) encontraron que los muestreadores de bandeja y las cápsulas cerámicas dieron resultados similares en suelos arenosos y limosos y concluyeron que los muestreadores de bandeja recogen mayores

volumenes de lixiviado y que muestrean también la solución que fluye por los macroporos. Un inconveniente de los muestreadores de bandeja es que se necesita hacer una zanja para instalarlos lateralmente y esto es mucho más costoso que la instalación de los tubos con cápsulas cerámicas porosas.

### 3.5.- Muestreadores de mecha de fibra de vidrio.

También denominados “muestreadores capilares pasivos” (passive capillary samplers) fueron desarrollados por Brown et al. (1986) al unir la idea de los muestreadores de bandeja con la aplicación de succión para obtener muestras de la solución del suelo. El muestreador consiste en una mecha de fibra de vidrio que se pone en contacto con el suelo en una instalación similar a la de un muestreador de bandeja. Una parte de esta mecha cuelga sobre un recipiente que recoge la solución del suelo que gotea de la mecha (Brandi-Dohrn et al. 1996a). La mecha colgante es la que crea una succión adicional en la parte inferior del suelo en contacto con la mecha que permite la extracción de la solución del suelo. La mecha solo puede gotear cuando la succión cerca del extremo inferior de la mecha es igual a cero; esto limita el muestreo de la solución del suelo a un cierto rango de humedad (cuando mayor es la longitud de la mecha colgante, más seco puede estar el suelo y aún extraer solución). Esta limitación, sin embargo, no es tan importante si tenemos en cuenta que el mayor drenaje ocurre bajo condiciones de baja tensión del agua en el suelo. Este tipo de muestreador intercepta el flujo de una sección conocida de suelo y recoge el flujo de los macroporos y el de los microporos (Boll et al. 1992). Una gran ventaja de estos muestreadores es que la succión que se aplica al suelo varía de manera similar a la del suelo, siendo siempre un valor superior constante, que depende de la longitud de la mecha que cuelga. La fibra de vidrio tiene muy poco poder de adsorción y ello permite utilizar este tipo de muestreador para toda clase de solutos, incluso de coloides (Biddle et al. 1995).

La instalación en el suelo es similar a la de los muestreadores de bandeja, si bien la cavidad es más alta, para permitir la mecha colgante que puede ser de 30-50 cm. En una comparación de estos muestreadores con las cápsulas cerámicas, Brandi-Dohrn et al. (1996a) encontraron resultados en general similares para el nitrato, aunque con el bromuro las diferencias fueron mayores. Un problema de estos muestreadores es la eficiencia de intercepción del lixiviado, de manera similar a los muestreadores de bandeja, ya que Brandi-Dohrn et al. (1996b) encontraron que la eficiencia de intercepción de drenaje varió de 66% a 80%.

## 4.- Discusión.

En la determinación de la lixiviación de nitrato los errores en la medida del drenaje se combinan con aquellos cometidos en la obtención de la concentración de nitrato de

la solución drenante. No existe un método estándar con el que comparar los diferentes métodos, ya que los lisímetros, que se podrían considerar como los más exactos, también pueden presentar problemas derivados de la dificultad que presentan para reproducir las condiciones que existen en el campo. Quizás la opción más exacta sea cuando se pueden emplear lisímetros con grandes bloques de suelo inalterado. Sin embargo, aún en este caso existe el problema de que hacen falta varios bloques si queremos que los resultados incorporen también la variabilidad espacial del suelo que existe en el campo, y esto resulta muy caro.

Una de las dificultades de los métodos basados en el muestreo de la solución del suelo por muestreo del suelo o por succión, es que con estos métodos no se puede conocer con certeza la concentración de la solución del suelo que está fluyendo: en el muestreo de suelo, la concentración que se mide es la concentración media (agua móvil e inmóvil), mientras que en el muestreo por succión se supone que la solución obtenida es representativa de la solución que fluye, y esto no se puede asegurar totalmente, ya que la solución que fluye puede no haberse equilibrado, en cuanto a su concentración de nitrato con la solución más inmóvil de los poros más pequeños. Debido a estas dificultades, Kreft y Zuber (1978) definieron la concentración del flujo  $C_f$  (la concentración de la solución que atraviesa una sección determinada del suelo en un intervalo de tiempo dado) y la concentración residente  $C_r$ , que representa la concentración de soluto en la solución de un volumen de suelo considerado en un intervalo de tiempo dado. El muestreo de suelo daría valores de  $C_r$  y los muestreadores de bandeja darían valores de  $C_f$ . Las cápsulas de succión darían concentraciones intermedias a  $C_r$  y  $C_f$  dependiendo, en parte de la succión empleada. Scotter et al. (1993) discuten las diferencias de estas dos concentraciones en el contexto de un análisis crítico del uso de la ecuación de Burns para el cálculo de la lixiviación de nitrato en el suelo, y muestran por qué el cálculo de la lixiviación de nitrato como producto del flujo de agua por la concentración residente no es válido, en general.

En el caso de equilibrio de la solución de los macroporos con la de los microporos, los valores de  $C_r$  y  $C_f$  serían iguales. Por tanto, cabría esperar que en las capas más profundas donde, en general, los picos de concentración de solutos son menos pronunciados, las dos concentraciones fueran más próximas que en las capas más superficiales, y esto reduciría la incertidumbre en los cálculos de la lixiviación como producto del flujo por la concentración residente.

Brandi-Dohrn et al. (1996a) sugieren que para estudios de larga duración, los resultados medios de  $C_r$  y  $C_f$  no son significativamente diferentes, pero que en estudios de corta duración las diferencias pueden ser importantes. Estos resultados pueden ser debidos a la compensación de errores, ya que en ciertos períodos ocurriría que  $C_r \leq C_f$  y en otros lo contrario.

Otro factor a tener en cuenta y que afecta a todos los métodos mencionados, aunque de diferente manera a cada uno de ellos es la variabilidad espacial, tanto de los flujos de

agua como de las concentraciones de nitrato. Bruckler et al. (1997) ofrecen un buen ejemplo de la variabilidad espacial y temporal de la lixiviación de nitrato (y sus componentes: drenaje y concentración de nitrato) en un cultivo de endivia y lechuga bajo riego en una zona del sur de Francia de clima mediterráneo. Una de sus conclusiones relativas al muestreo de la concentración de nitrato en el suelo es que, contrariamente a la recomendación tradicional del muestreo al azar, el muestreo sistemático en una malla regular es más adecuado.

## 5.- Conclusiones.

Como se ha visto, existen muchas opciones para la determinación de la lixiviación de nitrato en condiciones de campo. Aunque aún no hay un acuerdo general entre los diferentes métodos disponibles, un conocimiento de las bases en las que se fundan los diferentes métodos y de las condiciones experimentales de cada caso (tipo de cultivo, prácticas de cultivo, suelo y clima), así como de la experiencia del equipo investigador en las técnicas requeridas en cada método, pueden servir para que la elección del método sea la más acertada.

## Referencias.

- Addiscott, T.M. (1990). Measurement of nitrate leaching: a review of methods. In: Nitrates, Agriculture, Water (ed. R. Calvet), pp. 157-168
- Ahuja L.R., Wendroth O., Nielsen D.R. (1993). Relationship between initial drainage of surface soil and average profile saturated conductivity. *Soil Sci Soc Am J* 57:19-25.
- Al-Jamal, M.S., Sammis, T.W., Jones, T. (1997). Nitrogen and chloride concentration in deep soil cores related to fertilization. *Agric. Water Manag.* 34:1-16.
- Alberts A.E., Burwell R.E. and Schuman G.E. 1977. Soil nitrate-nitrogen determined by coring and solution extracting techniques. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41:90-92.
- Allen RG, Smith M, Pereira LS, Perrier A. (1994) An update for the calculation of reference evapotranspiration. *ICID Bulletin* 43 (2): 35-91
- Allen, R.G., Smith, M., Pereira, L.S., Pruitt, W.O. 1997. Proposed revision to the FAO procedure for estimating crop water requirements. *Acta Horticulturae* 449:17-33.
- Allison, G.B., Gee, G.W., Tyler, S.W. 1994. Vadose-zone techniques for estimating groundwater recharge in arid and semiarid regions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58:6-14.
- Amatya, D.M., Skaggs, R.W., Gregory, J.D. 1995. Comparison of methods for estimating REF-ET. *J. Irrig. Drain. Eng.* 121:427-435.
- Ankeny MD, Ahmed M, Kaspar TC, Horton R. 1991. Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Sci Soc Am J* 55:467-470.
- Armstrong, A.C. and Burt, T.P. (1993) Nitrate losses from agricultural land. In: Nitrate, Processes, Patterns and Management. T. P. Burt, A.L. Heathwaite, and S.T. Trudgill (eds) John Wiley and Sons, Chichester, UK, pp. 239-267
- Barbee and Brown (1986) Comparison between suction and free-drainage soil solution samplers. *Soil Sci.* 141, 1, 149-154
- Beckmann, T., Kücke, M., Hasenpusch, K. und Altemüller, H. J. (1992) Einbaubedingte Gefügeänderungen in der Bodenzone um keramische Saugkerzen. *Z. Pflanzenernähr. Bodenkn.*, 155, 247-250
- Biddle, D.L., Chittleborough, D.J. and Fitzpatrick, R.W. (1995). Field monitoring of solute and colloid mobility in a gneissic sub-catchment, South Australia. *Appl Clay Sci* 9, 433 - 442
- Boll, J., Steenhuis, T.S. and Selker, J.S. (1992). Fiberglass wicks for

- sampling of water and solutes in the vadose zone. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 701-707
- Bouwer, W., Gäth, S. und Frede, H.-G. (1997) Vergleich dreier Instrumentarien zur Abschätzung und Kontrolle der nutzungsbedingten Nitratauswaschung auf auswaschungsgefährdeten Standorten. *Z. f. Kulturtechnik und Landentwicklung* 38, 154-160.
- Brandi-Dohrn, F.M., Dick, R.P., Hess, M. and Selker, J.S. (1996a) Suction cup sampler bias in leaching characterization of an undisturbed field soil. *Water Resour Res* 32: 1173 - 1182
- Brandi-Dohrn, F.M., Dick, R.P., Hess, M. and Selker, S. J. (1996b) Field evaluation of passive capillary samplers. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 1705-1713
- Brown, K.W., Thomas, J.C. and Holder, M.W. (1986). Development of a capillary wick unsaturated zone water sampler. *Coop. Agreement CR812316-01-0*. U.S. E.P.A., Environ. Monit. Syst. Lab., Las Vegas, Nevada.
- Bruckler L., de Cockborne A.M., Renault P., and Claudot B. 1997. Spatial and temporal variability of nitrate in irrigated salad crops. *Irrig Sci.* 17: 53-61.
- Burman R. and Pochop L.O. (1994) Evaporation, evapotranspiration and climatic data. Elsevier, Amsterdam.
- Claasen HC, Reddy MM, Halm DR (1986) Use of the chloride ion in determining hydrologic-basin water budgets. A 3-year case study in the San Juan Mountains, Colorado (USA). *J Hydrol* 85: 49-71
- Chong Sk, Green RE, Ahuja LR. (1981). Simple in situ determination of hydraulic conductivity by power function description of drainage. *Water Resources Res.* 17:1109-1114.
- Dasberg S, Erner Y, Bielorai H (1984) Nitrogen balance in a citrus orchard. *J Environ Qual* 13: 353-356
- Doorenbos J. and Kassam A.H. (1979). Yield response to water. *FAO Irrig.&Drainage Paper No. 33*, FAO, Rome.
- Doorenbos J, Pruitt WO, (1984) Crop water requirements. *FAO Irrig and Drainage Paper n° 24*. Rome.
- Feyen J, Jacques D, Timmerman A, Vanderborght J. 1998. Modelling water flow and solute transport in heterogeneous soils: A review of recent approaches. *J Agric Engng Res.* 70: 231-256
- Goulding, K.W.T. and Webster, C.P. (1992) Methods for measuring nitrate leaching. In: *Nitrate and Farming Systems. Aspects of Applied Biology* 30: 63-69.
- Green RE, Ahuja LR, Chong SK. 1986. Hydraulic conductivity, diffusivity, and sorptivity of unsaturated soils: Field methods. In: *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. 2nd edn, A. Klute (ed) *Soil Sci Soc Am, Madison, WI*, pp. 771-798.
- Hargreaves GL, Hargreaves GH, Riley JP. 1985. Irrigation water requirements for Senegal River Basin. *J Irrig Drain Engng*, 111:265-275
- Hatfield, J.L., Allen, R.G. 1996. Evapotranspiration estimates under deficient water supplies. *J. Irrig. Drain. Eng.* 122:301-308.
- Hoyningen-Hühne, J. y Bramm, A. (1978). Die wägbaren Unterdrucklysimeteranlage in Braunschweig-Völkenrode - Aufbau und erste Erfahrungen. *Landbauforschung Völkenrode* 26, 2, 95 - 102
- Itier, B., Brunet, Y. 1996. Recent developments and present trends in evaporation research: A partial survey. In: *Evapotranspiration and irrigation scheduling Proc Int Conf, San Antonio, Texas. ASCE*. pp. 1-20.
- Jemison, M. J. and Fox, R. H. (1992): Estimation of zero-tension pan lysimeter collection efficiency. *Soil Sci.* 154, 2, 85 - 94
- Jemison, M.J. and Fox, R.H. (1994) Nitrate leaching from nitrogen-fertilised and manured corn measured with zero-tension pan lysimeters. *J. Environ. Qual.* 23: 337 - 343
- Jensen M.E, Burman R.D., Allen R.G. (1990) Evapotranspiration and irrigation water requirements. *ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70*, Am Soc Civil Engrs., New York, NY
- Jensen, D.T., Hargreaves, G.H., Temesgen, B., Allen, R.G. 1997. Computation of ETo under nonideal conditions. *J. Irrig. Drain. Eng.* 123:394-400.
- Kleeberg, P. (1995) Stickstoffhaushalt auf niedersächsischen Ackerstandorten in Abhängigkeit von Bodenart und Düngungsintensität. PhD thesis Universtiy Giessen
- Kosugi K. y Nakayama Y. (1997). A method for estimating unsaturated hydraulic properties of vertically heterogeneous soils from transient capillary pressure profiles. *Agric Forest Meteorol* 84:37-50
- Kreft A. y Zuber A. 1978. On the physical meaning of the dispersion equation and its solutions for different initial and boundary conditions. *Chem Eng Sci* 33:1471-1480
- Kücke, M. and Kleeberg, P. (1997) Nitrogen balance and soil nitrogen dynamics in two areas with different soil, climatic and cropping conditions. *European J. Agron.* 6, 89 - 100
- Lammel, J. (1990) Nährstoffausträge durch Vorfluter und Dräne. *Angewandte Wissenschaft* 386, 147 pp.
- Libardi PL, Reichardt K, Nielsen DR, Biggar JW. 1980. Some simple field methods for estimating soil hydraulic conductivity. *Soil Sci Soc Am J* 44:3-6.
- Lidón A, Ramos C, Rodrigo A. 1999. Comparison of drainage estimation methods in irrigated citrus orchards. *Irrig Sci* (en prensa).
- Poss, R., Noble, A.D., Dunin, F.X. and Reyenga, W. (1995) Evaluation of ceramic cup samplers to measure nitrate leaching in the field. *European J Soil Sci* 46: 667-674.
- Pratt PF, Lund LJ, Rible JM (1978) An approach to measuring leaching of nitrate from freely drained irrigated fields. In: *Nitrogen in the environment, Vol. 1*, DR Nielsen and JG MacDonald (eds) Academic Press, New York, pp 223-256
- Rajkai, K., Kabos, S., Van Genuchten, M. Th., Jansson, P.E. (1996). Estimation of water-retention characteristics from the bulk density and particle-size distribution of Swedish soils. *Soil Sci.* 161:832-845.
- Ramos, C. (1988) The use of the chloride balance method for estimating nitrate leaching. In: *Nitrogen efficiency in agricultural soils*, D.S. Jenkinson and K.A. Smith (eds), Elsevier Appl Sci, London, pp.: 256-268.
- Rawls WJ, Gish TJ, Brakensiek DL. 1991. Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristics. *Adv Soil Sci.* 16: 213-234
- Schaap, M.G., Leij, F.J. 1998. Database-related accuracy and uncertainty of pedotransfer functions. *Soil Sci.* 163:765-779.
- Scheffer-B; Orseifen-U. 1997. Zur Abschätzung des Nitrataustrags in die Gewässer am Beispiel der Boden Niedersachsens. *Brunswick Groundwater Colloquium 1997. Environmentally friendly management of groundwater and soil.* pp. 61-70
- Schwab GO, Fangmeier DD, Elliot WJ. 1996. Soil and water management systems. (4th ed), John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Scotter D.R., White R.E., Dyson J.S. (1993). The Burns leaching equation. *J Soil Sci* 44:25-33.
- Shani U., Hanks RJ., Bresler E., Oliveiera CAS. 1987. A simple field method for estimating the hydraulic conductivity and matric potential-water content relations of soils. *Soil Sci Soc Am J* 51:298-302
- Shepherd MA y Webb J. 1999. Effects of overwinter cover on nitrate loss and drainage from a sandy soil: consequences for a water management? *Soil Use & Management* 15:109-116
- Šimunek J., Van Genuchten, M.Th., Gribb, M.M., Hopmans, J.W. 1998. Parameter estimation of unsaturated soil hydraulic properties from transient flow processes. *Soil & Tillage Res.* 47:27-36.
- Slavich PG, Yang J (1990) Estimation of field scale leaching rates from chloride mass balance and electromagnetic induction measurements. *Irrig Sci* 11: 7-14
- Snow, V.O., Bond, W.J., Myers, B.J., Theiveyanathan, S., Smith, C.J., Benyon, R.G. (1999). Modelling the water balance of effluent-irrigated trees. *Agric. Water Manage.* 39:47-67.
- Timlin, D. (1996). Indirect estimation of hydraulic conductivity and its spatial distribution. *Proc. ARS Workshop on "Real World" Infiltration. CO Water Resour. Res. Inst. Information. Series # 86*. pp. 76-90
- Topp GC, Reynolds WD, Green RE (eds). (1992). Advances in measurement of soil physical properties: Bringing theory into practice. *Soil Sci Soc Am Special Publ. N° 30*, Madison, WI.
- Van Genuchten, MT, Leij F., Lund L. (eds). (1992). Indirect methods for estimating the hydraulic properties of unsaturated soils. *Proc. Intl. Workshop, Univ. of California, Riverside*.
- Wagenet RJ. (1986). Water and solute flux. In: *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. 2nd edn, A. Klute (ed) *Soil Sci Soc Am, Madison, WI*, pp. 1055-1088.
- Walker, G.R., Jolly, I.D., Cook, P.G. 1991. A new chloride leaching approach to the estimation of diffuse recharge following a change in land use. *J. Hydrol.* 128:49-67.
- Webster, C.P., Goulding, K.W.T. Shepherd, M.A. and Lord, E. (1992) Methods for measuring nitrate leaching from sandy soils. In: *Nitrate and Farming System Aspects of Applied Biology* 30: 77-80
- Webster, C.P., Shepherd, M.A., Goulding, K.W.T. and Lord, E. (1993) Comparisons of methods for measuring the leaching of mineral nitrogen from arable land. *J Soil Sci* 44: 49-62.

White, R.E. (1987) Leaching. In: Advances in nitrogen cycling in agricultural ecosystems, Ed. J.R. Wilson, 193-211. CAB Intl., Wallingford, UK.

Williams RD, Ahuja LR, Timlin D. 1996. Estimating the soil water

retention curve with soil bulk density and  $-33$  kPa value. Proc. ARS Workshop on "Real World" Infiltration. CO Water Resour. Res. Inst. Information. Series # 86. pp. 91-101.