

VENTAJAS E INCONVENIENTES DEL USO DEL BALANCE DE CLORURO PARA ESTIMAR EL DRENAJE EN SUELOS AGRÍCOLAS.

Carlos RAMOS, Antonio LIDON, Alfredo RODRIGO y Aurelio AGUT

Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias. Apdo. Oficial-46113 Moncada (Valencia)

INTRODUCCION

En los estudios de contaminación de acuíferos como resultado de la actividad agraria, el movimiento de los solutos contaminantes hacia las aguas subterráneas depende del flujo de solución del suelo (drenaje o percolación profunda) y de su concentración. Este enfoque es válido para cualquier soluto pero se ha aplicado principalmente a solutos como el nitrato. En el caso de contaminantes que se adsorben al suelo o que sufren procesos de degradación importantes como ocurre, por ejemplo, con muchos productos fitosanitarios, este procedimiento tiene menos valor porque las medidas para estimar su flujo hacia los acuíferos suelen tomarse a profundidades relativamente pequeñas (por ser menos costosas), y estas medidas no guardan mucha relación con la cantidad de soluto que llega hasta el agua subterránea debido a los fenómenos de adsorción y degradación mencionados anteriormente.

Existen varios métodos para estimar la concentración de solutos en la solución del suelo (Adams, 1974) pero los más frecuentes son el análisis de suelo o la extracción de la solución con cápsulas cerámicas. Por otra parte, la determinación del drenaje se puede realizar mediante el balance de agua de la capa de suelo considerada o a partir de medidas de gradiente hidráulico y conductividad hidráulica de la capa de suelo en la que se quiere estimar el drenaje (Jury *et al.*, 1991).

Los métodos basados en la medida de gradientes de potencial hidráulico y de la conductividad hidráulica del suelo tienen como principal inconveniente el ser muy laboriosos y la elevada variabilidad espacial de la conductividad hidráulica (Biggar y Nielsen, 1976).

Existen también métodos para la estima del drenaje basados en balances de sales o de cloruro en la capa de suelo estudiada. Por ejemplo, Rhoades (1980) estimó la fracción de lavado en suelos de regadío a partir de medidas de salinidad del suelo. Matthias *et al.* (1986) emplearon medidas de salinidad de las capas más profundas del suelo para estimar la evapotranspiración de épocas pasadas a partir de datos de láminas de riego aplicadas, pluviometría y contenido en sales del agua de riego y lluvia durante aquellos años.

En el presente trabajo se discute el balance de cloruro como método de estima del drenaje y se compara con el método del balance de agua, en suelos agrícolas de regadío.

EL BALANCE DE AGUA

El método del balance de agua es uno de los más empleados; los términos del balance normalmente considerados son:

$$\text{Riego} + \text{Lluvia} = \text{Evapotranspiración} + \text{Drenaje} \pm \text{Humedad suelo} [1]$$

En esta ecuación no se han tenido en cuenta las pérdidas o entradas laterales de agua ni el ascenso capilar (éste se puede considerar equivalente a un drenaje negativo). A partir de [1] resulta fácil determinar el drenaje si se conocen los otros términos.

El principal problema de este método es poder determinar con suficiente precisión la *Evapotranspiración* (ET), ya que los métodos disponibles son muy laboriosos y algunas aproximaciones, como las basadas en variables climáticas (Doorenbos y Pruitt, 1977), sólo se pueden aplicar cuando no hay ninguna limitación importante en la evapotranspiración debido a déficits hídricos u otras causas. Por otra parte, en los cultivos de regadío el término *Evapotranspiración* suele ser algo mayor que el *Drenaje* y, por tanto, los errores cometidos en su determinación repercuten en unos mayores errores relativos en la estima del drenaje. En periodos de tiempo de varios meses el término *Incremento de humedad del suelo* es pequeño en relación a la *Evapotranspiración* y el *Drenaje*.

EL BALANCE DE CLORURO

El balance de cloruro en el suelo fue empleado por Pratt (1979) en un importante estudio para determinar la lixiviación de nitrato en suelos de regadío en los EEUU. Otros estudios en los que se ha empleado este método son los de Lund *et al.* (1978) y Schalscha *et al.* (1979) en cultivos hortícolas, y Embleton *et al.* (1978, 1980) y Dasberg *et al.* (1984) en cítricos. Bielora *et al.* (1978) en un ensayo con pomelos en Israel encontraron resultados similares en la estima del drenaje mediante balance de agua en el suelo, empleando medidas de humedad con sonda de neutrones, y con un balance de cloruro. Este último método se ha empleado también en estudios de recarga de acuíferos (Allison y Hughes, 1978; Claassen *et al.*, 1986). Ramos (1988) hizo un estudio crítico del método, basándose en los resultados de diferentes estudios publicados.

Para un volumen determinado de suelo en un tiempo dado se cumple:

$$\text{Entradas de Cl}^- = \text{Salidas de Cl}^- \pm \text{Contenido de Cl}^- [2]$$

Las principales entradas de cloruro al suelo en agricultura de regadío son: agua de riego, abonos y agua de lluvia; las principales salidas son: drenaje y extracción por el cultivo. Podríamos considerar como una entrada también la

producida por el ascenso capilar de la solución del suelo de capas más profundas, pero esta entrada sería equivalente a una salida por "drenaje" negativa. Al aplicar la ecuación [2] hay que tener en cuenta que en ocasiones pueden haber entradas o salidas que normalmente son difíciles de determinar como ocurre con las escorrentías superficiales o subsuperficiales.

Cuando consideramos las principales entradas y salidas de cloruro mencionadas, la ecuación [2] se convierte en:

$$Cf_{riego} + Cf_{fertil.} + Cf_{lluvia} = Cf_{drenaje} + Cf_{cosecha} + \Delta Cf_{suelo} \quad [3]$$

y por tanto:

$$Cf_{drenaje} = Cf_{riego} + Cf_{fertil.} + Cf_{lluvia} - Cf_{cosecha} - \Delta Cf_{suelo} \quad [4]$$

En la ecuación [4] todos los términos vienen expresados en unidades de *masa/superficie* referidos al período de tiempo en el que se realiza el balance; el término de *Incremento de contenido* en el suelo se calcula como *profundidad capa suelo* \cdot *masa/volumen* lo que equivale también a unidades de *masa/superficie*.

Por otra parte, el flujo de cloruro en el agua de drenaje puede expresarse como:

$$Cf_{drenaje} = Drenaje \cdot [Cl]_{ss} \quad [5]$$

donde $[Cl]_{ss}$ indica la concentración de Cl^- en la solución de suelo a la profundidad a la que se mide el drenaje. Combinando las ecuaciones [4] y [5] obtenemos:

$$Drenaje = \frac{Cl_{Riego + lluvia + fertil} - Cl_{cosecha} - \Delta Cl_{suelo}}{[Cl]_{ss}}$$

donde el *Drenaje* viene expresado en m^3/ha si los términos del numerador se expresan en kg/ha y el denominador en kg/m^3 .

El método es más eficiente y de más fácil aplicación si el suelo, como suele ocurrir, no actúa como fuente o sumidero importante para el cloruro (es decir, si el cloruro no precipita ni se disuelve, no se adsorbe en el suelo ni entra o sale de manera importante en el reservorio de la biomasa microbiana).

EL PROBLEMA DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL

Uno de los principales inconvenientes de la utilización del balance de cloruro en la estima del drenaje es la gran variabilidad espacial del contenido de cloruro en el suelo y de la $[Cl]_{SS}$. La influencia de la variabilidad del suelo en los estudios de transporte de solutos se ha estudiado mucho en los últimos años (Wagenet, 1985; Dagan *et al.*, 1990). La variabilidad del contenido de Cl en el suelo y de la $[Cl]_{SS}$ es aparente en los estudios de Pratt *et al.* (1978), Lund *et al.* (1981) y Lund (1982); esta variabilidad hace que sea necesario tomar un número considerable de muestras para obtener estimas de los valores medios con una aceptable precisión. En la Tabla 1 se presenta el número de muestras necesarias para obtener valores medios de $[Cl]_{SS}$ con una determinada precisión para un nivel de confianza del 95%, en los estudios de Pratt *et al.* (1978) en California.

Como se puede observar en la Tabla 1, el número de puntos de muestreo requerido es muy grande sobre todo cuando se quieren valores que estén a menos del 10% del valor verdadero. Conviene tener en cuenta, sin embargo, que en este estudio las medidas se hicieron en campos relativamente grandes en comparación con las dimensiones típicas de los campos regados en zonas de agricultura intensiva como la zona mediterránea en España. Así, por ejemplo, en las Tablas 2 y 3 se presentan el número de muestras necesario para poder obtener el contenido y la concentración de Cl media con una precisión determinada. Los datos corresponden a una parcela experimental de hortalizas y otra de cítricos en la Comunidad Valenciana. Como se puede observar, en general, el número de muestras requerido es inferior a los obtenidos por Pratt *et al.* (1978) (Tabla 1).

| Campo | Muestras por punto | Desviación admitida (%) | Puntos requeridos |
|-----------------|--------------------|-------------------------|-------------------|
| Ventura (25 ha) | 8 | 10 | 980 |
| | " | 20 | 245 |
| | " | 30 | 112 |
| K1 (32 ha) | 8 | 10 | 369 |
| | " | 20 | 95 |
| | " | 30 | 44 |
| K2 (25 ha) | 7 | 10 | 544 |
| | " | 20 | 136 |
| | " | 30 | 63 |
| Madera (90 ha) | 7 | 10 | 55 |
| | " | 20 | 16 |
| | " | 30 | 9 |

(1) Muestras tomadas por debajo de 1,8 m de profundidad.

Tabla 1. Número de muestras de suelo necesarias para que la media verdadera de $[Cl]_{SS}$ se encuentre a menos del 10, 20 y 30% de la media observada, a un nivel de confianza del 95%, en cuatro campos (Pratt *et al.*, 1978)(1).

Los coeficientes de variación del contenido de Cl^- en la parcela de hortalizas fue de 38% en el primer muestreo y 24% en el segundo; en la parcela de cítricos estos valores fueron de 27% y 22%, respectivamente. En el caso de la $[Cl^-]_{SS}$ estos coeficientes fueron 45% y 26% en la parcela de hortalizas y 64% y 17% en la de cítricos. La variabilidad observada fue mayor para $[Cl^-]_{SS}$ que para el contenido de Cl^- en el suelo y, además, cambió con en el tiempo.

| PARCELA | DESVIACION ADMITIDA (%) | MUESTREO 1 | MUESTREO 2 |
|------------|-------------------------|---------------------|---------------------|
| | | MUESTRAS REQUERIDAS | MUESTRAS REQUERIDAS |
| HORTICOLAS | 10 | 57 | 24 |
| | 20 | 16 | 8 |
| | 30 | 9 | 5 |
| CITRICOS | 10 | 30 | 21 |
| | 20 | 9 | 7 |
| | 30 | 5 | 5 |

Tabla 2. Número de muestras de suelo necesarias para estimar el contenido de cloruro en una parcela de hortalizas (0-90cm) y otra de cítricos (0-100 cm) de la Comunidad Valenciana, para diferentes niveles de desviación respecto a la media verdadera (datos obtenidos de dos muestreos en diferentes fechas).

| PARCELA | DESVIACION ADMITIDA (%) | MUESTREO 1 | MUESTREO 2 |
|------------|-------------------------|---------------------|---------------------|
| | | MUESTRAS REQUERIDAS | MUESTRAS REQUERIDAS |
| HORTICOLAS | 10 | 80 | 28 |
| | 20 | 21 | 9 |
| | 30 | 11 | 5 |
| CITRICOS | 10 | 157 | 14 |
| | 20 | 42 | 5 |
| | 30 | 20 | 4 |

Tabla 3. Número de muestras de suelo necesarias para estimar la $[Cl^-]_{SS}$ en una parcela de hortalizas (0-90cm) y otra de cítricos (0-100 cm) de la Comunidad Valenciana, para diferentes niveles de desviación respecto a la media verdadera (datos obtenidos de dos muestreos en diferentes fechas).

EJEMPLOS DE APLICACION DEL BALANCE DE CLORURO EN CULTIVOS DE LA COMUNIDAD VALENCIANA

En dos parcelas de patatas se establecieron dos tratamientos con dosis de abonado nitrogenado mineral diferentes, con el objetivo de estimar la lixiviación de nitrato. El drenaje, se estimó a partir del balance del cloruro y también mediante balance de agua, donde la ET se calculó por el método propuesto por Doorenbos y Kassam (1979). Durante el período de cultivo se tomaron los datos necesarios para realizar los balances: muestreos de suelo (hasta 150 cm, a intervalos de 30 cm), muestreos de plantas y cálculo de las entradas de agua por riego y precipitación, así como sus concentraciones en

Cl^- y la evaporación del tanque evaporímetro Clase A. El drenaje se calculó a 60 cm y la $[\text{Cl}^-]_{55}$ a esta profundidad se estimó como valor medio de las muestras obtenidas a 30-60 cm y las de 60-90 cm.

En una parcela de cítricos se estudió también el drenaje siguiendo la misma metodología; en este caso para el balance de agua se aplicaron los coeficientes de cultivo obtenidos para cítricos en Valencia por Castel *et al.* (1987); más detalles de este trabajo se pueden encontrar en Lidón *et al.* (1993a).

En la tabla 4 se muestran algunos de los resultados obtenidos en las parcelas experimentales mencionadas anteriormente. En ella se puede observar:

i) Cítricos: En los tres períodos considerados (dos parciales y el total) la extracción de Cl^- por la planta fue muy pequeña comparada con los demás términos del balance. En el período anual el incremento de Cl^- en el suelo fue pequeño frente a los aportes, lo cual mejora la precisión de la estima del drenaje al ser este uno de los términos del balance de mayor variabilidad (Lidón *et al.*, 1993b). El signo negativo del drenaje en el período de riego indica un ascenso capilar debido, posiblemente, a que el agricultor espació excesivamente los riegos.

Cuando se compara el drenaje obtenido por los dos métodos se observa una gran diferencia entre ambos valores en los tres períodos, que podría ser debida, en parte, a un error en la estima de la evapotranspiración como consecuencia del estrés hídrico que ocurrió por falta de un riego adecuado y/o porque los coeficientes empleados para determinar la ET no son correctos.

ii) Patata: En todos los casos el término más importante es el de aportes de Cl^- , debido a la elevada frecuencia de riego con aguas de alta concentración de Cl^- . Hay que destacar, que la extracción de Cl^- por la planta, a diferencia de lo que ocurre en los cítricos, es importante, y que el incremento de contenido de Cl^- en el suelo es relativamente pequeño frente a las entradas. En las tres parcelas se observan pocas diferencias entre los drenajes obtenidos por ambos métodos. La alta frecuencia de riego en este caso hace poco probable que se produjeran déficits hídricos importantes.

VENTAJAS E INCONVENIENTES DEL BALANCE DE CLORURO FRENTE AL BALANCE DE AGUA

Ventajas:

- * La estima del drenaje por balance de cloruro no depende de la ET, mientras que cuando se emplea el balance de agua la ET es una variable muy importante. Esta es difícil de medir o calcular con exactitud debido a:

- errores en la determinación de la evapotranspiración de referencia
- errores en la determinación de los coeficientes de cultivo
- errores producidos por limitación de la evapotranspiración máxima del cultivo como consecuencia de déficits hídricos, u otras causas que reduzcan el crecimiento normal del cultivo.

* En casos de lluvias intensas que produzcan una escorrentía importante, el balance de agua resulta más afectado que el del cloruro si no se dispone de medidas de escorrentía (Lidón *et al.*, 1993b).

Inconvenientes:

* El balance de cloruro es bastante laborioso ya que requiere diferentes medidas en campo, muestreos de tierra y análisis químico. Sin embargo, si se quiere estudiar el drenaje para determinar la lixiviación de nitrato, el mismo muestreo de suelo necesario para medir la $[NO_3]_{SS}$ puede servir para determinar ΔCl_{suelo} y $[Cl]_{SS}$.

| PERIODO | PROF (cm) | BALANCE DE CLORURO | | | | DRENAJE (mm) | B. AGUA |
|-----------------|--------------|-------------------------------|---------------------------|----------------------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|
| | | $Cl^-_{rieg+lluv}$ (Kg/ha) | Cl^-_{Cosec} (Kg/ha) | ΔCl^-_{suelo} (Kg/ha) | $[Cl^-]_{SS}$ (mg/l) | | DRENAJE (mm) |
| CITRICOS | | | | | | | |
| MAY-OCT | 0-100 | 150 | 1.9 | 190 | 307 | -14 | -162 |
| OCT-ABR | 0-100 | 160 | 3.1 | -178 | 435 | 77 | 22 |
| MAY-ABR | 0-100 | 310 | 5.0 | 12 | 350 | 84 | -142 |
| PATATAS | | | | | | | |
| PARCELA 1 | 0-60 | 475 | 87 | -23 | 181 | 227 | 191 |
| PARCELA 2 | 0-60 | 372 | 99 | 58 | 177 | 180 | 176 |
| PARCELA 3 | 0-60 | 315 | 63 | -95 | 230 | 151 | 132 |

(1) En estos ensayos no hubo aportes de Cl^- en los fertilizantes.

Tabla 4. *Estimas de drenaje por balance de cloruro y balance de agua en algunas parcelas de la Comunidad Valenciana. (1)*

BIBLIOGRAFIA

ADAMS, F., 1974. Soil solution. En: "The plant root and its environment", E.W. Carson (ed.), pp.441-506. University Press of Virginia, Charlottesville.

ALLISON, G.B. y HUGHES, M.W., 1978. The use of environmental chloride and tritium to estimate total recharge to an unconfined aquifer. *Aust. J. Soil Res.* 16, 181-195.

BIELORAI, H., SHALHEVET, J. y LEVY, J., 1978. Grapefruit response to variable salinity in irrigation water and soil. *Irrig. Sci.* 1, 61-70.

BIGGAR, J.W. and NIELSEN, D.R., 1976. Spatial variability of the leaching characteristics of a field soil. *Water Resour. Res.* 12, 78-84.

- CASTEL, J.R., BAUTISTA, I., RAMOS, C. and CRUZ, G., 1987. Evapotranspiration and irrigation efficiency of mature orange orchards in Valencia (Spain). *Irrigation and Drainage Systems* 3: 205-217.
- CLAASSEN, H.C., REDDY, M.M. and HALM, D.R., 1986. Use of the chloride ion in determining hydrologic-basin water budgets. A 3-year case study in the San Juan Mountains, Colorado, (U.S.A.). *J. Hydrol.* 85: 49-71.
- DAGAN, G., RUSSO, D., and BRESLER, E., 1990. Effect of spatial variability upon subsurface transport of solutes from nonpoint sources. En: *Proc. Int. Symp. on Water Quality Modeling of Agricultural Non-Point Sources, Part 2*, D.G. de Coursey (ed.), pp.523-548, U.S. Dep. Agric., A.R.S., ARS-81.
- DASBERG, S., ERNER, Y. and BIELORAI, H., 1984. Nitrogen balance in a citrus orchard. *J. Environ. Qual.* 13: 353-356.
- DOORENBOS, J. and PRUITT, W.O., 1977. Crop water requirements. FAO. Irrig. and Drain. Paper No. 24, Roma.
- DOORENBOS, J. y KASSAM, A.H., 1979. Yield response to water. FAO Irrig. and Drain. Paper No. 33, Roma.
- EMBLETON, T.W. and JONES, W.W., 1978. Nitrogen fertilizer management programs, nitrate-pollution potential, and orange productivity. In *"Nitrogen in the environment"*. Vol. 1, D.R. Nielsen and J.G. MacDonald (eds.), Academic Press, pp. 275-295.
- EMBLETON, T.W., PALLARES, C.D., JONES, W.W., SUMMERS, L.L. and MATSUMURA, M., 1980. Nitrogen fertilizer management of vigorous lemons and nitrate-pollution potential of groundwater. California Water Resour. Center, University of California, Contribution No.182.
- JURY, W.A., GARDNER, W.R. and GARDNER, W.H., 1991 (5th edn.). Soil physics. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- LIDON, A.L., RAMOS, C. y RODRIGO, A., 1993a. La lixiviación de nitrato en huertos de cítricos. *Actas de Horticultura (SECH)* nº 9, pp.280-284.
- LIDON, A.L., RAMOS, C. y RODRIGO, A., 1993b. Estima del drenaje en huertos de cítricos mediante balance de cloruro. XI Jornadas Técnicas sobre Riego. Valladolid. Junio 1993, pp.147-153.
- LUND, L.J., RYDEN, J.C., MILLER, R.J., LAAG, A.E. y BENDIXEN, W.E., 1978. Nitrogen balances for the Santa Maria Valley. En: *"Proc. Natl. Conf. on Management of Nitrogen in Irrigated Agriculture"* P.F. Pratt (ed.), Dept. Soil and Environ. Sci., Univ. of California, Riverside, pp. 395-413.
- MATTHIAS, A.D., HASSAN, H.M., YU-OI-HU, WATSON, J.E. y WARRICK, A.W., 1986. Evapotranspiration estimates derived from subsoil salinity data. *J. Hidrology* 85, 209-223.
- NIELSEN, D.R., WIERENGA, P.J., y BIGGAR, J.W., 1983. Spatial soil variability and mass transfers from agricultural soils. En: *"Chemical Mobility and Reactivity in Soil Systems"*, D.W. Nelson, D.E. Elrich, y K.K. Tanji (eds.), pp. 65-78. Special Publication No. 42. Am. Soc. Agronomy, Madison, WI.
- PRATT, P.F. (Ed.) 1979. Nitrate in effluents from irrigated lands. Final Report to the National Science Foundation, University of California.
- PRATT, P.F., LUND, L.J. y RIBLE, J.M., 1978. An approach to measuring leaching of nitrate from freely drained irrigated fields. En: *"Nitrogen in the environment"* Vol. 1, D.R. Nielsen y J.G. McDonald (eds.), pp. 223-256, Academic Press.
- RAMOS, C., 1988. The use of chloride balance method for estimating nitrate leaching. In: *"Nitrogen efficiency in agricultural soils"*. D. S.Jenkinson and K.A. Smith (Eds.), Elsevier Appl. Sci., pp. 256-268.
- RHOADES, J.D., 1980. Determining leaching fraction from field measurements of soil electrical conductivity. *Agr. Water Manage.* 3, 205-215.
- SCHALSCHA, E.B., VERGARA, I., SCHIRADO, T. y MORALES, M., 1979. Nitrate movement in a Chilean agricultural area irrigated with untreated sewage water. *J. Environ. Qual.* 8, 27-30.
- WAGENET, R.J., 1985. Measurement and interpretation of spatially variable leaching processes. En: *"Soil spatial variability"* D.R. Nielsen y J. Bouma (eds.), Pudoc, Wageningen, pp. 209-230.