

ESTIMACIÓN DE LA RECARGA EN UN ÁREA DE LLANURA MEDIANTE EL MUESTREO DEL IÓN CLORURO CON CÁPSULAS DE SUCCIÓN

P. Weinzettel y E. Usunoff

Instituto de Hidrología de Llanuras, (UNCPBA, CIC) Rep. de Italia 780, 7300 – Azul, Bs. As., Argentina; paw@faa.unicen.edu.ar

RESUMEN. Se ha calculado la recarga al acuífero mediante un balance de masa del ion cloruro. El método ha sido aplicado en una parcela experimental en la cuenca del arroyo Azul (Provincia de Buenos Aires, Argentina). El sector de estudio está dominado por suelos del Gran Grupo Argiudol, con la presencia de costras calcáreas denominadas “tosca”.

La parcela fue instrumentada convenientemente para la obtención de muestras de agua tanto de la zona no saturada como del agua de lluvia, esta última con la inclusión de la deposición seca. También se contó con registros de tensiometría y de humedad volumétrica. Los tensiómetros permitieron conocer la posición del plano de flujo cero en cada momento del muestreo del agua de la zona no saturada.

El muestreo se realizó mediante cápsulas de succión (cerámica porosa), ubicadas a 30, 60, 90 y 150 cm de profundidad. También se obtuvieron muestras del acuífero y del agua de lluvia.

Los muestreos se realizaron cada una o dos semanas aproximadamente, durante dos años. No siempre pudo obtenerse agua, ya que hubo períodos donde los potenciales matriciales generados en el suelo durante épocas de alta evapotranspiración no permitieron la extracción de agua por las cápsulas.

La recarga se calculó para cada fecha de muestreo de las cápsulas de succión, teniendo en cuenta el valor medio de la precipitación del período y la concentración de cloruro del agua de lluvia. De esta forma se calculó la recarga en 26 oportunidades. El valor promedio de la recarga obtenida fue del 23% de la precipitación (232 mm.a^{-1}). Vale consignar que se observaron variaciones importantes entre los cálculos de la recarga para cada fecha.

Posteriormente se calculó la recarga teniendo en cuenta los valores de concentración de cloruro del acuífero observándose una recarga superior a la calculada con valores de la zona no saturada, diferencia que es adjudicada a las vías preferenciales de flujo presentes.

ABSTRACT. Recharge to the aquifer through chloride ion mass balance has been assessed at an experimental plot in the Azul River Basin (Buenos Aires Province, Argentina),

where the local soils are of the Argiudoll type with some carbonate content in the form of discontinuous caliche layers.

On-site available data were water samples from the unsaturated zone (suction cups at 30, 60, 90, and 150 cm deep), the rainfall (including dry fall out), and the aquifer, as well as tension, and soil moisture readings.

Sampling frequency was weekly (or every two weeks) during two years. High soil-water potentials during periods of intense evapotranspiration did not allow sampling of the unsaturated zone water. Tensiometers were used to check the location of the zero-flow plane when sampling the water contained in the unsaturated zone.

The recharge was estimated taking into account the average rainfall for a given period, as well as the chloride content of water in the unsaturated zone and the aquifer. The mean recharge obtained represented 23% of the rainfall (232 mm y^{-1}), although the recharge for individual episodes varied greatly.

Such a mean recharge is larger than previous estimates from unsaturated zone studies, a difference that was attributed to the presence of preferential flow paths.

1. Introducción

El método de balance del ion cloruro como ha sido desarrollado por Eriksson y Khunakasem (1969) compara la depositación total de cloruro en la superficie con la concentración en el agua del suelo por debajo de la zona activa de las raíces o con la concentración en el agua del acuífero.

Es un método muy difundido para el cálculo de la recarga debido a que las determinaciones son rápidas y de bajo coste y está extensamente documentado en varias revisiones (Allison et al. 1994, Scanlon et al. 2002). Si bien el método es más atractivo para zonas áridas y semi-áridas con alta evaporación donde se lo ha aplicado mayoritariamente (Edmunds et al. 1988, Wood et al. 1997), también ha sido utilizado en zonas húmedas (Bromley et al. 1997; Rosen et al. 1999, Lo Russo et al. 2003).

Una de las principales ventajas del método es que los resultados derivan en parte de datos de series de tiempo largas comparado con las mediciones directas de flujo en la zona no saturada donde generalmente los resultados son obtenidos sobre una base de tiempo anual (Edmunds et al. 1988).

El cloruro es utilizado para la estimación de la recarga debido a la característica de ser conservativo y por su abundancia relativa en la precipitación. Custodio (1997) indica que el ion cloruro es el que mejor cumple con la condición de ion conservativo por las siguientes condiciones: es muy soluble, no interacciona con el medio, y el terreno carece de cantidades significativas del mismo. Por otra parte, su determinación analítica no tiene complicaciones.

Este ion se presenta en la superficie del suelo tanto por la lluvia como por la depositación seca que sobre él se produce. La mayoría de las plantas no toman cantidades suficientes de cloruro del agua del suelo, por lo que se concentra por la evapotranspiración en la zona de las raíces. En el caso más simple de flujo tipo pistón en la zona no saturada, la concentración de cloruro en el suelo debería incrementarse a través de la zona de las raíces hasta un valor constante (Allison et al. 1994).

El flujo volumétrico de agua debajo de la zona de las raíces (q_w) puede ser estimado por el grado de enriquecimiento de cloruro del agua en los poros en relación a la concentración del cloruro en el agua de la precipitación y de la depositación seca de acuerdo a la ecuación de balance de masa del ión cloruro (BMC), (Scanlon et al. 1999, 2000):

$$q_w = \frac{J_{Cl}}{C_{Cl\ zns}} = \frac{P C_{CIP}}{C_{Cl\ zns}} \quad (1)$$

donde J_{Cl} es el flujo de la masa de cloruro o la depositación de cloruro en superficie ($M L^{-2} T^{-1}$), $C_{Cl\ zns}$ es la concentración de cloruro en el agua de los poros ($M L^{-3}$), P es la precipitación y C_{CIP} es la concentración de cloruro en la precipitación incluyendo la depositación seca ($L T^{-1}$). Esta ecuación ignora la dispersión hidrodinámica y asume que el cloruro se mueve por flujo pistón en una sola dimensión, siendo la entrada de cloruro constante desde la superficie en el período considerado. También se han utilizado algunas ecuaciones que tienen en cuenta el flujo preferencial. Así, Sharma y Hughes (1985) introducen un modelo bimodal que incluye la componente de flujo preferencial, y algo similar presentan Wood et al. (1997).

En ocasiones la concentración de cloruro en el perfil unidimensional presenta variaciones en la concentración produciendo en la curva de concentración-profundidad abultamientos o picos. Esto ha sido atribuido a flujo preferencial (Peck et al. 1981). Cook et al. (1989) lo explican como una lenta difusión de cloruro de la zona debajo de las raíces hacia el acuífero. En el caso de grandes espesores de la zona no saturada, los picos en la concentración de cloruro se relacionan con cambios en la recarga debido a variaciones paleoclimáticas (Scanlon et al. 1997, Edmunds y Tyler, 2000).

2. Sector de estudio

El método ha sido aplicado en el área de estudio ubicada en el sector medio de la cuenca del arroyo Azul, provincia de Buenos Aires, Argentina (Fig. 1). La cuenca presenta serranías bajas en el sector sur, que pasan a suaves lomadas en el sector central hasta la ciudad de Azul. Este sector presenta suelos Argiudoles de alta producción agrícola ganadera. Hacia el norte de la ciudad de Azul, en cambio, la cuenca presenta pendientes superficiales muy bajas y dominan los suelos natracuoles y natracualfes con un rendimiento productivo muy inferior, utilizados básicamente para la cría de ganado. El área de la cuenca es de aproximadamente 6.000 km². La precipitación media en la zona es de 900 mm por año, la temperatura media anual es de 14 °C con una media máxima de 21.5 °C en enero y una media mínima de 7.2 °C en julio.

En la zona de estudio se han instrumentado tres parcelas experimentales sobre suelos Argiudoles típicos para el estudio de las propiedades hidráulicas del suelo y la zona no saturada, y la evaluación de la recarga al acuífero freático (Weinzettel y Usunoff, 1999). El perfil del suelo presenta en casi todos los casos, una costra calcárea denominada localmente "tosca". La tosca se encuentra a manera de planchas o niveles discontinuos, tanto lateralmente como en profundidad. Los niveles oscilan en unos 10 cm o más de espesor y suelen presentar alta dureza.

En este trabajo se presentan los resultados de la recarga obtenida mediante la instrumentación de la parcela 1, ubicada en cercanías de la ciudad de Azul (Fig. 1). En este sector la tosca se presenta en forma variable entre 100 centímetros y 130 centímetros de profundidad por lo que el suelo, según la última clasificación de Soil Taxonomy, sería Paleudol petrocálico.

El perfil de suelo en forma resumida presenta estructura granular hasta los 18 cm, seguido de una estructura de columnas gruesas. El horizonte C comienza a los 66 cm. La parte superficial del suelo posee abundantes raíces y signos de intensa actividad biológica. La textura es franca arcillosa, pasando a arcillosa en el horizonte Bt, mientras que el horizonte C y la zona no saturada tienen una textura franco limosa.

En lo que respecta al espesor de la zona no saturada en el sector de estudio, el acuífero fluctuó durante el período de mediciones entre las profundidades de 2 y 3 metros, ubicándose en una oportunidad a 1.5 metros de profundidad.

3. Metodología

Para aplicar el método de balance de masa del ion cloruro, se colocó en la parcela un muestreador de agua de lluvia al nivel del suelo, con el cual se obtuvieron muestras luego de cada evento pluviométrico.

El agua muestreada permitió determinar la masa de cloruro entrante al suelo, es decir el aporte de cloruro por el agua de lluvia y por la depositación seca. La precisión en la estimación de la recarga con el método de balance de ion cloruro está directamente relacionada con la incertidumbre

en la determinación de la deposición atmosférica (Gehrels, 1999). Este ión es incorporado a las masas de aire a partir del mar. Por esto, las mayores influencias a la deposición atmosférica son la distancia al mar, la velocidad y dirección del viento y la rugosidad del terreno (Eriksson, 1960). Blackburn y McLeod (1983) sugieren que aproximadamente el 50% del cloruro depositado en superficie a distancias de 700 km de la costa tiene origen oceánico. La deposición total en superficie puede ser dividida en deposición seca y deposición húmeda. La deposición húmeda se produce a través de la precipitación debido al cloruro atmosférico disuelto en las nubes. La deposición seca se produce por procesos de deposición directa de gases y partículas de la atmósfera sobre el suelo, los vegetales u otra superficie sin la interferencia de la precipitación. La deposición que es medida en un pluviómetro es llamada en la literatura anglosajona "bulk deposition" e incluye la deposición húmeda y parte de la deposición seca. En este estudio se asume que se realizó el muestreo de la deposición total de cloruro, ya que el dispositivo de muestreo utilizado permite que la lluvia colecte la deposición atmosférica producida sobre una superficie ligeramente cóncava ubicada a nivel del suelo.

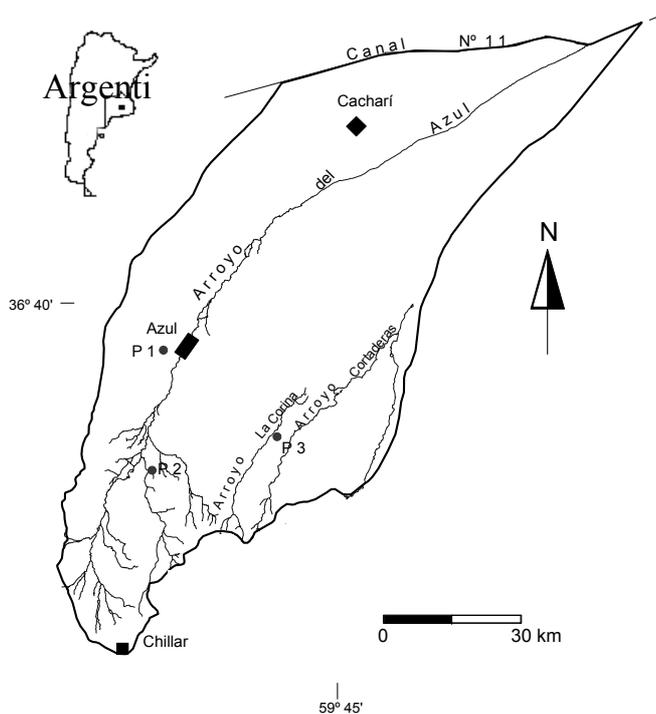


Fig. 1. Ubicación del sitio de muestreo (P1) en la cuenca del arroyo Azul.

La deposición de cloruro es altamente variable en escala de tiempos cortos por lo que el monitoreo debe realizarse por periodos largos (Phillips, 1994). Por este motivo las muestras utilizadas para la obtención de la deposición seca fueron obtenidas durante tres años en la parcela 1 (Tabla 1).

Tabla 1. Concentraciones de cloruro de la lluvia con depositación seca CC_{lp} y precipitación anual media para el período considerado.

	Parcela 1
n	86
Período	02-1998 / 12-1999
C _{Clp} (mg.l ⁻¹)	5.59
Precipitación (media)	997.75
Deposición total (kg.ha ⁻¹ .a ⁻¹)	55.7

n es el número de muestras.

El muestreo se realizó con cápsulas instaladas a 30, 60, 90 y 150 centímetros de profundidad. El período de muestreo abarca desde febrero de 1998 hasta noviembre de 1999. La recolección de las muestras se realizó produciendo una succión inicial de 80 Kpa en cada cápsula, que descendió generalmente a unos 50 Kpa durante un lapso que varió en promedio de una a dos semanas. La variación de la succión pudo ser observada durante el período de muestreo porque en cada dispositivo se contó en todo momento con un manómetro de vacío. Para estas tensiones, según la teoría de la capilaridad, se puede llegar a muestrear agua de poros de hasta 5 μm. La metodología utilizada permitió el muestreo de agua intersticial en un radio de algunos centímetros alrededor de cada cápsula cerámica para el período de tiempo mencionado. Morrison y Lowery (1990) demuestran que se produce un decrecimiento del potencial matricial con el tiempo a distancias cada vez mayores alrededor de la cápsula, con lo cual en los primeros momentos se origina la succión del agua de los poros más grandes adyacentes a la cápsula, luego la succión de los macroporos y microporos cercanos al muestreador y finalmente los poros grandes que se encuentren a mayor distancia. La velocidad con que se acumula la solución del suelo en el tomamuestra depende de la humedad y del tipo de suelo así como del valor de succión inicial aplicado (Wilson, 1995).

Los volúmenes obtenidos variaron según las condiciones de tensión del suelo, ya que en algunas ocasiones se llegó a obtener más de 100 ml de agua y en otras solamente 2 ml. En varias oportunidades la cápsula tuvo entrada de aire, con lo cual no mantuvo la succión y no se pudo colectar agua. En general el volumen de las muestras obtenidas superó los 20 ml.

Para la determinación de la concentración de cloruro se utilizó un electrodo específico. Cuando la muestra fue muy escasa y se necesitó realizar una importante dilución para su análisis, se procedió al descarte de la misma.

Se realizaron en la Parcela 1, 40 campañas de muestreo de las cápsulas en los años 1998 y 1999.

4. Perfiles de cloruro para el cálculo de la recarga

La concentración de soluto en el suelo o en el sector superior de la zona no saturada varía estacionalmente o anualmente dependiendo de las variaciones del flujo de humedad debido a la lluvia y a la evapotranspiración. Un complejo movimiento de solutos tanto hacia arriba como hacia abajo puede tener lugar en respuesta al movimiento del agua, el cual en realidad depende del gradiente de

potencial prevaeciente (Edmunds et al. 1988). Para una mejor apreciación del problema se recurre a la definición de plano de flujo cero (pfc), el cual existe cuando efectivamente se separa la humedad y los solutos que se mueven hacia arriba (evapotranspiración) de los que se mueven hacia abajo por drenaje (Wellings y Bell, 1980). Por este motivo se consideraron para el cálculo de la concentración de cloruro en la zona no saturada a los muestreos realizados con las cápsulas de succión en momentos donde el pfc pudo ser determinado mediante los potenciales hidráulicos totales del suelo. De esta manera se evitaron para el cálculo los muestreos del sector de mayor actividad de las raíces, donde el flujo prevaeciente fue ascendente debido a la evapotranspiración. Se desestimaron los valores de la cápsula de 150 cm cuando ocasionalmente fue inundada por el ascenso del nivel acuífero. Teniendo en cuenta esto, se promediaron para una misma fecha de muestreo los valores obtenidos de las cápsulas que se encontraron por debajo del pfc, considerando una concentración estable. En general se tuvieron en cuenta los valores de 60, 90 y 150 cm de profundidad para lo cual se asumió un estado estacionario.

Para el cálculo de la recarga se determinó para cada perfil (muestreo) un valor promedio de cloruro y luego se le aplicó la Ecuación 1 a cada uno de los perfiles obteniendo una serie de valores de recarga para cada fecha. Finalmente, los valores de recarga calculados a partir de cada muestreo fueron promediados para la obtención de un valor final.

Este método se diferencia de otros tales como el de Edmunds et al. (1988) y Sharma (1988), en los cuales se utilizan perfiles repetidos que luego son espacialmente promediados, pero medidos una sola vez temporalmente (Lo Russo et al. 2003). Por esto es importante al aplicarlo evaluar la variabilidad estacional de la concentración de cloruro.

En este primer cálculo no se tuvo en cuenta la concentración de cloruro del acuífero, la que sí se utilizó en un cálculo posterior para observar las diferencias en el valor de recarga y la posible influencia de distintos factores de tipo areal como ser el uso del suelo.

Los muestreos realizados durante los años 1998 y 1999 fueron los utilizados para los cálculos de la recarga. En la Tabla 2 se consignan los valores obtenidos en cada perfil de muestreo y la relación entre el cloruro de la precipitación (C_{Cl_p}) obtenido en la Tabla 1 y el cloruro de la zona no saturada ($C_{Cl_{zns}}$). Multiplicando dicha relación por la lluvia media de todo el período considerado, se obtuvieron distintos valores de recarga en mm que finalmente fueron promediados para obtener un valor final.

La recarga obtenida fue del 23% de las precipitaciones o sea que se recargaron 232 mm.a⁻¹ al acuífero. No obstante el desvío típico (65.28 mm.a⁻¹) ha sido importante por las variaciones de la concentración de cloruro producidas en los muestreos de la zona no saturada, que se debe a la captación de agua más o menos móvil según el momento del muestreo por las cápsulas de succión. Es así que los valores de recarga varían entre un valor mínimo de 131.44 mm.a⁻¹ (13.1%) a un máximo de 387.32 mm.a⁻¹

Tabla 2. Balance de masa de cloruro con datos de la Parcela 1.

Fecha	$C_{Cl_{zns}}$ (mg.l ⁻¹)	$C_{Cl_p}/C_{Cl_{zns}}$	Recarga (mm.a ⁻¹)
02-02-98	17.20	0.33	324.27
10-02-98	29.07	0.19	191.88
27-02-98	19.60	0.29	284.56
07-03-98	42.43	0.13	131.44
13-03-98	36.45	0.15	153.02
22-04-98	25.34	0.22	220.10
24-04-98	32.90	0.17	169.53
04-05-98	17.92	0.31	311.24
13-05-98	33.25	0.17	167.74
21-05-98	32.85	0.17	169.78
01-06-98	23.22	0.24	240.20
11-06-98	27.05	0.21	206.19
22-06-98	25.50	0.22	218.72
01-07-98	20.88	0.27	267.18
17-07-98	34.15	0.16	163.32
07-08-98	21.30	0.26	261.85
29-08-98	24.50	0.23	227.65
10-09-98	14.40	0.39	387.32
29-04-99	18.10	0.31	308.14
07-05-99	33.15	0.17	168.25
22-05-99	20.55	0.27	271.41
28-05-99	26.90	0.21	207.34
04-06-99	19.20	0.29	290.49
16-06-99	27.95	0.20	199.55
16-09-99	17.55	0.32	317.80
16-11-99	31.80	0.18	175.39
MEDIA	25.89	0.23	232.09
DS	7.15	0.07	65.28

DS es el desvío típico.

Esta variabilidad en las determinaciones de la recarga en base al muestreo con cápsulas de succión indican que el método debe ser utilizado con precaución. También demuestra que el método más común de muestreo de cloruro mediante barrenado, generalmente realizado en un determinado momento, puede inducir a errores en la determinación de la recarga. Lo ideal para el método del barreno según lo visto con el muestreo mediante cápsulas, es la obtención de muestras del cloruro de la zona no saturada durante un tiempo prolongado para poder observar la variabilidad que se produce en los valores de recarga determinados por el método

En la Fig. 2 se observan los valores medios obtenidos de la concentración de cloruro en la zona no saturada incluyendo también el valor medio del acuífero.

Variaciones en la recarga anual en la cuenca y especialmente en esta zona han sido observadas mediante otras metodologías para el cálculo de la recarga (Weinzettel et al. 2005).

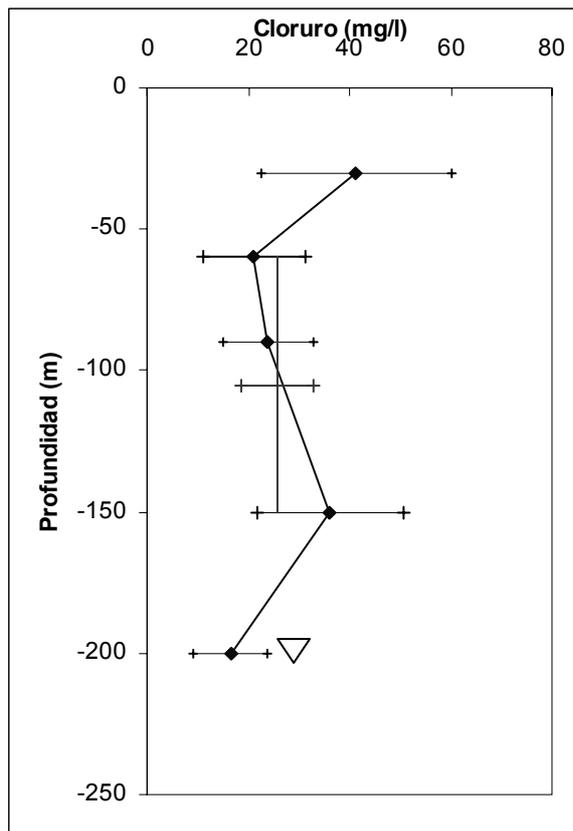


Fig. 2. Perfil de concentración de cloruro en la Parcela 1. Las líneas entre cruces indican el desvío, la línea sólida entre 60 y 150 cm indica el valor medio de la concentración de cloruro en la zona no saturada y su desvío. Se incluyen los valores del acuífero.

Por otra parte, se realizaron los cálculos para la obtención de la recarga aplicando el método a las concentraciones de cloruro del acuífero (Tabla 3), que fue comparada luego con el valor medio de la recarga obtenida a partir de las concentraciones del ión en la zona no saturada.

Tabla 3. Balance de masa de ión cloruro con datos del acuífero (C_{Clac}).

n	C_{Clac} ($mg.l^{-1}$)	DS	CV	C_{Clp}/C_{Clac}	P (mm)	R ($mm.a^{-1}$)
21	16.57	7.39	0.45	0.34	997.75	336.61

n es el número de muestras, DS es el desvío típico, CV es el coeficiente de variación, C_{Clp} es la concentración de cloruro de la precipitación, P es la precipitación y R la recarga.

Los valores obtenidos indican una recarga mucho mayor utilizando los datos del acuífero (34%), cuando el método utilizando datos de la zona no saturada indica una recarga del 23%. Este exceso se debe a que las muestras obtenidas del acuífero presentan una baja concentración del ión con respecto al medio no saturado, con lo cual la aplicación de la Ecuación 1 hace que la recarga se eleve en un 11%. La diferencia entre el valor de recarga calculado con la concentración del ión en la zona no saturada y en el acuífero da una idea del volumen de agua de bajo contenido de cloruro que se infiltra por vías preferenciales de flujo.

El importante flujo por vías preferenciales en el sector estudiado se explica especialmente por la escasa profundidad del nivel freático en la zona así como por el tipo de suelo presente.

5. Conclusiones

Mediante la aplicación del método de balance de ión cloruro a datos de la zona no saturada se ha obtenido valores para la recarga en el sector de estudio del 23%. Se ha observado, según la metodología empleada calculando la recarga para diferentes momentos, que es importante la variabilidad de los valores de recarga obtenidos. Esto se debe especialmente a que según el momento de muestreo y a las lluvias antecedentes las cápsulas captan agua más o menos móvil. Esto se ve luego reflejado en los valores de recarga calculados en cada momento. El valor promedio de todos los perfiles obtenidos refleja mejor el valor de recarga medio para la zona. Queda demostrado que si se realiza el muestreo con barreno, éste debe repetirse en varias oportunidades ya que si se obtiene un solo valor este corresponderá a un momento determinado y puede estar alejado de un valor real de la recarga del sector de estudio.

En este caso los valores de recarga obtenidos utilizando la concentración de cloruro del acuífero ha mostrado mayor recarga producto del pasaje de agua por vías preferenciales con menor contenido del ión. La comparación de los valores obtenidos según se utilicen datos de la zona no saturada, donde la recarga promedio es del 23%, o datos del acuífero donde la recarga es del 34%, permite tener noción de la importancia de las vías preferenciales de flujo en la zona estudiada.

Referencias

- Allison, G. 1988. A review of some of the physical, chemical and isotopic techniques available for estimating groundwater recharge. En: Simmers, I., Estimation of natural groundwater recharge. NATO ASI, Ser. C, 222:49-72
- Allison, G., Gee, G. y Tyler, S. 1994. Vadose-zone techniques for estimating groundwater recharge in arid and semiarid regions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:6-14.
- Bromley, J., Edmunds W., Fellman, E., Brower, J. Gaze, S, Sudlow, J. y Taupin, J. 1997. Estimation of rainfall inputs and direct recharge to the deep unsaturated zone of southern Niger using the chloride profile method. *J. Hydrol.*, 188:139-154.
- Custodio, E., 1997. Evaluación de la recarga por la lluvia mediante métodos ambientales químicos, isotópicos y térmicos. En: La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica. Custodio, E., Llamas, M. y Samper, J. (ed). Palmas de Gran Canaria. AIH Grupo Español, pp 83 – 109.
- Cook, P., Walker, G. y Jolly, I. 1989. Spatial variability of groundwater recharge in a semiarid region. *J. Hydrol.*, 111:195-289.
- Edmunds, W. y Tyler, S. 2000. Unsaturated zones as archives of past climates toward a new proxy for continental regions. *Hydrogeol. J.*, 10:216-228.
- Edmunds, W., Darling, W. y Kinniburgh, D. 1988. Solute profile techniques for recharge estimation in semi-arid and arid terrain. En: Lerner, D., Issar, A., y Simmers, I. Groundwater recharge. Internat. Assoc. of Hydrogeologists. Heise, pp. 139-157.
- Eriksson, E. y Khunakasem, V. 1969. Chloride concentration in groundwater, recharge rate and rate of deposition of chloride in the Israel Coastal Plain. *J. Hydrol.*, 7:178-197.

- Lo Russo, S., Zavattaro, L., Acutis, M. Y Zuppi, G. 2003. Chloride profile technique to estimate water movement through unsaturated zone in a cropped area in subumid climate (Po Valley- NW Italy). *J. Hydrol.*, 270:65-74.
- Morrison, R. y Lowery, B. 1990. Sampling radius of a porous cup sampler: experimental results. *Ground water*, 28:262-267.
- Peck, A., Johnston, C. y Williamson, D. 1981. Analysis of solute distributions in deeply weathered soils. *Agric. Water Manage.*, 4:83-102.
- Rosen, M., Bright, J., Carran, P., Steward, M. y Reeves, R. 1999. Estimating rainfall recharge and soil water residence times in Pukekohe, New Zealand, by combining geophysical, chemical, and isotopic methods. *Ground Water*, 37:836-844.
- Scanlon, B. 2000. Uncertainties in estimating water fluxes and residence times using environmental tracers in an arid unsaturated zone. *Water Resour. Res.*, 36:395-409.
- Scanlon, B., Healey, R. y Cook, P. 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeol. J.*, 10 :18-39
- Scanlon, B., Langford R. y Goldsmith, R. 1999. Relationship between geomorphic settings and unsaturated flow in an arid setting. *Water Resour. Res.*, 35:983-999
- Scanlon, B., Tyler, S. y Wierenga, P. 1997. Hydrologic issues in arid, unsaturated systems and implications for contaminant transport. *Rev. Geophys.*, 35:461-490.
- Sharma M., and Craig A. 1989. Comparative recharge rates beneath banksias woodland and two pine plantations on the Gnangara mound, western Australia. En: Sharma M. (ed). *Groundwater Recharge*. Balkema, Rotterdam. 185-196 pp.
- Sharma, M. 1988. Recharge estimation from the depth distribution of environmental chloride in the unsaturated zone: western australian examples. En: Simmers, I (ed). *Estimation of natural groundwater recharge*. Reidel, Dordrecht, 159-173 pp.
- Sharma, M., y Hughes, M. 1985. Groundwater recharge estimation using chloride, deuterium and oxygen-18 profiles in the deep coastal sands of Western Australia. *J. Hydrol.*, 81:93-109.
- Weinzettel, P., Usunoff, E. y Vives, L. 2005. Groundwater recharge estimations from studies of the unsaturated zone. En Bocanegra, E., Hernández, M. y Usunoff, E., (ed). *Groundwater and Human Development*. Balkema. Great Britain.. Cap. 5, pp 133-143.
- Weinzettel, P. y Usunoff, E., 1999. Hidrodinámica de la zona no saturada en suelos argiudoles de la cuenca del arroyo del Azul. En Tineo, A. (ed). *Hidrología Subterránea. Serie de Correlación Geológica*, 13:297-305.
- Wilson, N. 1995. *Soil water and groundwater sampling*. Lewis Publishers. Boca Ratón. 188 p.
- Wood, W., Rainwater, K. y Thompson, D. 1997. Quantifying macropore recharge: examples from a semi-arid area. *Ground Water*, 35:1097-1105.