

Relación entre recarga al acuífero freático y otros términos del balance hídrico en Azul, centro de la Provincia de Buenos Aires

Marcelo Varni¹, Sofía Zeme^{1,2}, Pablo Weinzettel^{1,2} y Sebastián Dietrich^{1,3}

¹ Instituto de Hidrología de Llanuras "Eduardo Usunoff", CC 44, Campus Universitario Azul, (7300) Azul, Argentina

² Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC), La Plata, Argentina

³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), CABA, Argentina

Mail de contacto: marcelovarni@gmail.com

RESUMEN

El método de fluctuación del nivel freático se basa en aceptar que el ascenso de nivel es debido a la llegada del agua de recarga al acuífero freático. Para aplicar el método, es necesario estimar el valor del almacenamiento específico (S_y) en la zona de fluctuación de niveles. En este trabajo se utiliza un método gráfico para su estimación. Se obtiene un $S_y = 0,09$, lo cual es coherente con resultados obtenidos mediante otras metodologías. Se obtuvieron las recargas anuales para 22 años de registro de nivel freático. También se obtuvo la distribución de las recargas medias mensuales. También se exploraron relaciones entre distintos componentes del ciclo hidrológico en la cuenca del arroyo del Azul. Se hallaron buenas relaciones entre precipitación y recarga, descensos totales y profundidad media del nivel y caudal básico y profundidad media del nivel. También se ajustó una ecuación que relaciona la recarga con la precipitación y el nivel freático medio anuales.

Palabras clave: recarga, almacenamiento específico, precipitación, caudal básico, nivel freático

ABSTRACT

The water table fluctuation method it is based on accepting that the water table rises are due to recharge water reaching the water table. To apply the method, the specific yield (S_y) estimation in the fluctuation zone of groundwater levels is necessary. In this paper, a graphical method for the S_y estimation is used and a $S_y = 0.09$ is obtained, which is consistent with other determinations. The annual groundwater recharge of 22 years with groundwater level data was obtained. Also, the mean monthly recharge distribution was obtained. Also, relationships between different components of the hydrological cycle in the Azul Creek watershed were also explored. Good relations between precipitation and groundwater recharge, total annual decline groundwater level and average groundwater level, and base flow and average depth of the level were found. An equation that relates the recharge to precipitation and annual average groundwater level was also adjusted.

Keywords: groundwater recharge, specific yield, precipitation, base flow, phreatic level.

1 INTRODUCCIÓN

En este trabajo se realizan estimaciones de la recarga en la zona central al acuífero freático del arroyo del Azul y se analizan relaciones entre las aguas superficiales y subterráneas. Ambos aspectos son de gran importancia para el manejo de los recursos hídricos de la región. La recarga se ha estimado por medio del método de fluctuación del nivel freático (FNF) en el Campus Universitario Azul, en el centro de la Provincia de Buenos Aires (Figura 1). El método de FNF (Healy y Cook, 2002) es aplicable a acuíferos freáticos. El método es simple y fácil de aplicar (Delin et al., 2007) y está basado en aceptar que los ascensos del nivel freático se deben a la recarga que llega al nivel freático. La ecuación que se aplica es

$$R = \Delta S_{GW} = S_y \frac{dh}{dt} = S_y \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (1)$$

donde R es la recarga, h el nivel freático y t el tiempo. Para aplicar el método, se necesita estimar el valor del almacenamiento específico (S_y) a la profundidad de fluctuación del nivel freático. S_y se define como (Healy, 2010)

$$S_y = \phi - S_r \quad (2)$$

donde ϕ es la porosidad y S_r la retención específica. Para la determinación de S_y se usan métodos de laboratorio, ensayos de bombeo, balances de agua y el análisis de la respuesta del nivel freático a la recarga. Los métodos de laboratorio generalmente determinan S_y por medio de la medición de la porosidad y la retención específica para aplicar la Ecuación (2). Los ensayos de bombeo proveen mediciones de S_y integradas sobre áreas relativamente importantes, dependiendo de la distancia entre el pozo de bombeo y el de observación.

El método de balance de agua (Walton, 1970) propone un balance de agua a nivel de cuenca preferiblemente en invierno, cuando la evapotranspiración es mínima y el suelo está cerca de la saturación. En ese caso, se resuelve el balance teniendo en cuenta la variación de agua subterránea almacenada entre el inicio y el fin del balance y, considerando la variación del nivel freático, puede estimarse S_y . Este método puede involucrar grandes errores, ya que la variación de agua subterránea almacenada debe estimarse de la diferencia de otros términos del balance que constituyen volúmenes de agua mucho mayores. Sin embargo, permite obtener un valor medio para grandes áreas.

El método de balance de agua (Walton, 1970) propone efectuar los cálculos a nivel cuenca preferiblemente en invierno, cuando la evapotranspiración es mínima y el suelo está cerca del estado de saturación. En ese caso, se resuelve el balance teniendo en cuenta la variación de agua subterránea almacenada entre el inicio y el fin del análisis y, considerando la variación del nivel freático, puede estimarse S_y . Este método puede involucrar grandes errores, ya que la variación de agua subterránea almacenada debe estimarse de la diferencia de otros términos del balance que constituyen volúmenes de agua mucho mayores. Sin embargo, permite obtener un valor medio para grandes áreas.

El método de FNF se aplica aquí a 22 años (1992-2013) de datos diarios de nivel freático en el centro de la provincia de Buenos Aires. Como el método tiene una buena discriminación temporal, se obtienen recargas mensuales y anuales. Luego, se analizan las relaciones de estas recargas con otras variables intervinientes en el ciclo hidrológico, tales como precipitación y flujo base.

La perforación analizada se ubica en un área llana, donde los suelos son Paleudoles petrocálcicos (Soil Survey Division Staff, 1993). La precipitación media es de 908 mm (1901-2009). La precipitación media mensual máxima se da en Marzo con 137 mm, mientras que la mínima ocurre en Junio con 43 mm. La temperatura media anual es de 14,5°C.

La Fig. 1 muestra esquemáticamente el área de aporte a la ciudad de Azul: las áreas de afloramiento rocoso al sur y la profundización del basamento hacia el norte, terminando en una sección transversal aproximadamente en correspondencia con la equipotencial de 125 msnm. Las

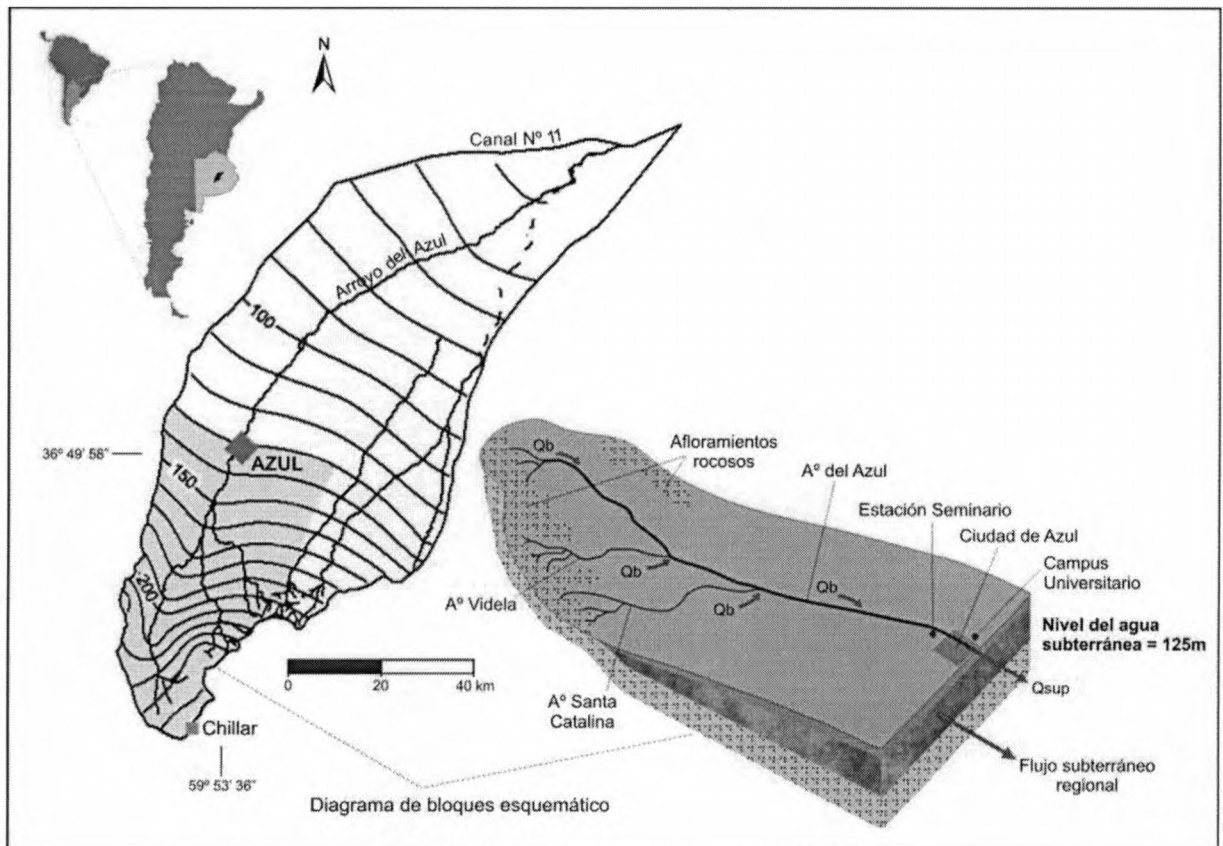


Figura 1 - Ubicación de la cuenca y bloque esquemático donde se ubican el Campus Universitario y la Estación Seminario.

flechas representan el agua drenada por el arroyo del Azul (Q_{sup}) y por el acuífero (flujo subterráneo regional). La recarga al acuífero freático que se produce en toda el área de la figura contribuye al caudal fluvial a través del caudal base (Q_b) (flujo subterráneo somero), al flujo subterráneo regional (flujo subterráneo profundo), a las pérdidas por evapotranspiración directa desde el nivel freático y extracciones por bombeo. El Q_{sup} incluye las contribuciones del flujo superficial puro más el Q_b . El diagrama en bloque muestra también aproximadamente la relación entre el piso del acuífero y la profundidad del nivel freático (120 m y 5 m, respectivamente). En estas condiciones, las variaciones del nivel freático afectan principalmente a la contribución de caudal base, mientras que el flujo subterráneo regional permanece aproximadamente constante.

La perforación en la que se analiza la variación del nivel freático es somera (7,7 m de profundidad) y está ubicada en el Campus Universitario Azul, donde no se produce bombeo de agua, no hay industrias cercanas y el uso de la tierra en los alrededores consiste en pasturas naturales. La ciudad de Azul se ubica preponderantemente en la margen derecha del arroyo, mientras que el Campus está a unos 1000 m del arroyo sobre su margen izquierda. Por lo anterior, puede asumirse que el pozo estudiado no está influenciado por extracciones o descargas de origen humano.

2 METODOLOGÍA

Los niveles analizados abarcan 22 años de registros diarios en el pozo mencionado en el apartado anterior. Las mediciones se han llevado a cabo de lunes a viernes a la misma hora, aproximadamente. Sin embargo, de estarse desarrollando un evento de recarga (niveles en ascenso), los niveles también se medían los fines de semana. Para mencionada tarea se utilizó una sonda hidrométrica y, durante el período de análisis, el nivel freático fluctuó entre 0,63 y 6,25 m de profundidad.

El método de FNF se basa en asumir que el ascenso del nivel freático debido a precipitaciones previas se debe a la llegada del agua de recarga al acuífero freático. Un análisis cuidadoso de los

registros permite detectar las variaciones en el nivel freático debidas a actividades antropogénicas (Healy and Cook, 2002).

El principal desafío del método es la estimación de S_y del acuífero a la profundidad en que fluctúa el nivel freático. En este caso, se propone un método gráfico. El método consiste en un gráfico en el que se vuelcan las precipitaciones en el eje de abscisas y en ordenadas los ascensos de nivel freático que generaron dichas precipitaciones. Si se traza una recta por el origen que pase justamente por encima del punto con mayor valor de la relación $\Delta h/P$, la inversa su pendiente constituye un valor máximo de S_y . Creemos que este método es especialmente indicado en este caso debido al extenso período de registro de eventos de recarga (22 años). El método equivale a calcular las relaciones precipitación-ascenso de todos los eventos medidos y seleccionar el menor valor. Sin embargo, el método gráfico tiene la ventaja de poder visualizar claramente si hay varios puntos cerca de la recta trazada, si la recta se traza sobre un único punto muy alejado de los demás y sería aconsejable una revisión cuidadosa, etc.

Los valores de recarga anual se relacionan con la precipitación anual y la profundidad media anual del nivel freático a través de correlaciones simples y múltiples. Pueden encontrarse ejemplos de similares relaciones en Sophocleous (1992) (recarga con: precipitación anual, precipitación de primavera, profundidad del nivel freático, humedad en el perfil de suelo, número de días de lluvia en primavera y anual), Taylor and Howard (1995) (recarga-precipitación) y Sami and Hughes (1996) (recarga-precipitación), entre otros.

Los descensos totales anuales de nivel freático se relacionan con el nivel freático medio anual. También se estudian relaciones entre recarga y otras variables del balance de agua de la cuenca. Como antecedente, puede mencionarse que Nichols and Verry (1981) analizaron las relaciones entre recarga, precipitación y caudal fluvial.

En el trabajo se analiza la relación entre la recarga y el caudal base en la estación de aforos en el arroyo del Azul más cercana. El flujo base a veces se usa como una aproximación de la recarga cuando el flujo subterráneo regional, la evapotranspiración por la vegetación de ribera y otras pérdidas de agua subterránea son mínimas (Healy, 2010). En la cuenca del arroyo del Azul el flujo subterráneo regional no es despreciable y, por lo tanto, el flujo base no puede igualarse a la recarga. Por lo tanto, nuestro interés fue explorar otras relaciones entre ambos. El flujo base se obtuvo de hidrogramas medidos en la estación Seminario (Fig. 1) y se obtuvo por medio de la utilización de un filtro digital recursivo (Rodríguez et al., 2000).

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Estimación del almacenamiento específico

La Fig. 2 muestra las relaciones entre precipitaciones y ascensos de nivel freático considerando 162 eventos individuales de recarga. La recta obtenida corresponde a un $S_y=0,09$. Este valor debe considerarse un máximo porque si todos los eventos registrados (puntos en el gráfico) han tenido al inicio de la lluvia contenidos de humedad menores a capacidad de campo en el perfil no saturado este valor debería ser menor.

Guarracino et al. (2011) obtienen el mismo valor de S_y como resultado de la aplicación de un nuevo método basado en la correlación entre mediciones de satélite del experimento GRACE y variaciones del nivel freático.

Weinzettel et al. (2005) obtienen un valor de 0,07 en el Campus Universitario Azul, considerando la respuesta de los niveles freáticos a eventos de precipitación.

Finalmente, estos valores están en el rango de S_y para sedimentos limosos (ver Tabla 3.5 en Fetter (2001) y Tabla 6.2 en Healy (2011)).

3.2 Recarga anual

La recarga anual puede estimarse considerando los ascensos freáticos individuales acumulados a lo largo de cada año, y considerando un $S_y=0,09$. En la Fig. 3 se obtiene la relación entre recarga y precipitación anuales, con un $r^2 = 0,73$ y una medida de eficiencia del índice de Nash-Suttcliffe (Nash and Suttcliffe, 1970) $NSEM = 0,74$. La intersección de la recta ajustada con

el eje de abscisas indica la precipitación máxima para la cual no se produciría recarga, que es en este caso de 494 mm. Este valor es sólo indicativo de una tendencia general ya que la recarga depende fuertemente de la distribución de las precipitaciones en el tiempo, pero constituye un valor de referencia para el área.

La precipitación media anual para el lapso analizado fue de 1035 mm (CV=0,31), mientras que la recarga media anual se estimó en 202 mm (CV=0,70), es decir, un 19,5 % de la precipitación. La mayor recarga anual ocurrió en 2002 con 539 mm, lo cual constituye un 33% de la precipitación anual, aunque la recarga porcentualmente más alta ocurrió en 1992, con 37% de P (R=386 mm y P= 1054 mm). La recarga mínima, tanto en milimetraje como en porcentaje, ocurrió en 2008 con 23 mm (4% P). Este año se recuerda como extremadamente seco para la región (Tabla 1).

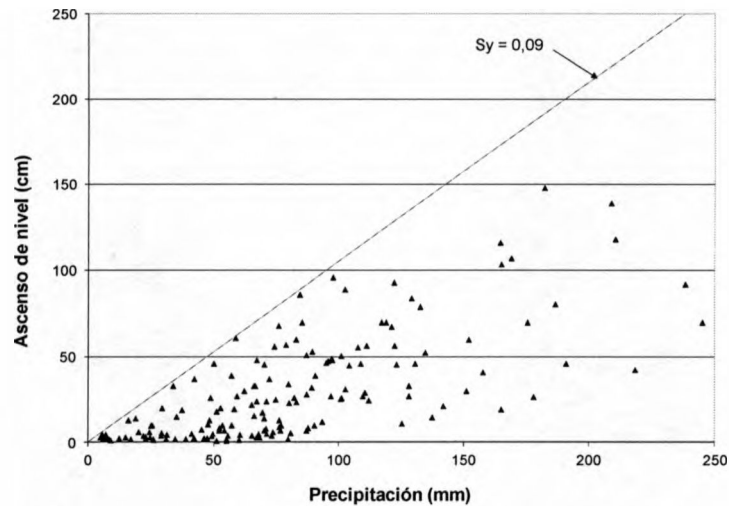


Figura 2 - Gráfico para la determinación de S_y .

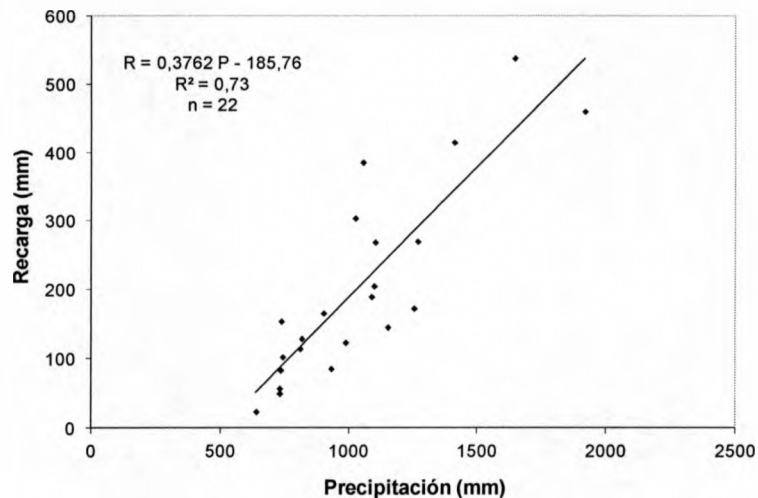


Figura 3 - Relación entre recarga y precipitación anuales.

3.3 Recarga mensual

En la Fig.4 se muestra la distribución de las recargas medias mensuales para el período de estudio. En el gráfico de la izquierda se ven estas recargas en mm, mientras que en el de la derecha se dan como porcentaje de la precipitación media mensual. En el primero de ellos se puede advertir una distribución bimodal con picos en otoño y primavera. En el segundo, la distribución cambia significativamente, con algunos aspectos dignos de comentarse: el mes de marzo es el de mayor recarga en milimetraje, pero no alcanza a llegar a un 24% de la lluvia media mensual. Por otro lado, en agosto se da la segunda recarga mensual en mm y pasa a ser la primera como porcentaje de P (49% de P). La diferencia entre ambos casos se da porque en agosto, aunque un ordenamiento mensual según sus precipitaciones la sitúa como el octavo mes,

estas lluvias encuentran a las zona no saturada con altos contenidos de humedad a la salida del invierno mientras que, en marzo las recargas se producen a expensas de grandes precipitaciones que encuentran el perfil no saturado con alto déficit de humedad y, por lo tanto, se utiliza una importante fracción de la lluvia para reponerla.

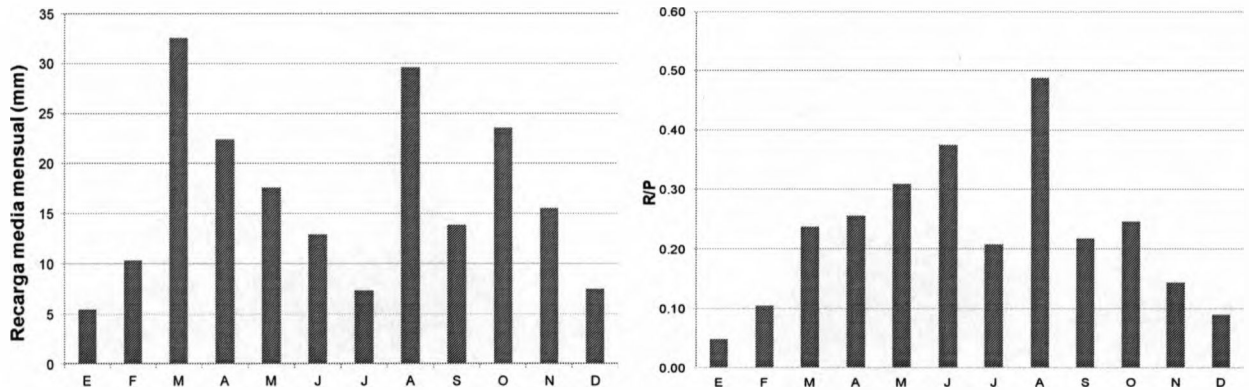


Figura 4 - Izquierda: recargas medias mensuales (mm). Derecha: recargas medias mensuales (%P).

Tabla 1 - Año, profundidad media del nivel freático (m), variación de nivel anual (m), ascenso anual (m), descenso anual (m) y recarga (%P).

Año	Prof.Med.(m)	Δh (m)	Asc.(m)	Desc.(m)	R (%P)
1992	1,89	0,175	4,290	4,115	37,0
1993	2,42	-0,23	3,375	3,605	29,7
1994	3,60	-0,585	1,430	2,015	15,8
1995	3,66	-0,79	1,710	2,500	20,9
1996	4,19	0,35	1,615	1,265	12,6
1997	3,67	0,552	2,987	2,435	24,4
1998	2,67	-0,342	2,109	2,451	17,5
1999	3,60	-0,34	1,919	2,259	13,8
2000	3,30	0,86	3,000	2,140	21,3
2001	2,56	0,93	5,125	4,195	24,0
2002	1,92	-0,06	5,990	6,050	32,7
2003	2,97	-0,84	2,280	3,120	18,7
2004	3,83	-1,04	1,270	2,310	14,1
2005	4,82	-1,07	0,550	1,620	6,8
2006	5,09	0,17	1,370	1,200	12,5
2007	4,73	0,39	1,840	1,450	18,4
2008	5,38	-1,13	0,260	1,390	3,7
2009	6,02	0,29	0,950	0,660	9,2
2010	5,67	0,02	0,950	0,905	11,3
2011	5,44	0,09	1,135	1,045	13,8
2012	4,28	3,35	4,622	1,272	29,5
2013	3,04	-1,90	0,630	2,530	8,0
Media	3,94	-0,052	2,250	2,300	17,9
Des. Est.	1,16	1,037	1,570	1,290	8,7
C.V.	0,29	-19,834	0,700	0,560	0,47

La variación interanual de las recargas mensuales es muy importante, mucho más que la de las precipitaciones, ya que para todos los meses el CV excede del 100%, y para los meses de

diciembre, enero y febrero se alcanzan 235, 231 y 178%, respectivamente.

3.4 Descensos anuales en el nivel freático

El acuífero freático está descargando agua permanentemente en una o más áreas deprimidas (cursos de agua, humedales, lagos, mar) a mayor o menor diferencia de elevación y distancia de la perforación analizada, al mismo tiempo que ocurren ascensos de nivel por eventos de recarga en lapsos más o menos extensos. Además, si el nivel freático está cercano a la superficie del terreno puede haber evaporación directa del agua subterránea a través de la alimentación de la franja capilar. Los cambios anuales del nivel freático pueden calcularse como la diferencia entre la profundidad del nivel al comienzo del año y la profundidad del nivel freático al inicio del año siguiente. Esto ha sido incluido en la Tabla 1; un Δh positivo indica ascenso.

La Fig. 5 muestra la relación entre los descensos anuales y la profundidad media anual del nivel freático. Se advierte con claridad que los descensos anuales son inversamente proporcionales a la profundidad del nivel freático, como era de esperarse si se piensa que la relación entre niveles de descarga y distancia a la descarga varía menos que el nivel en el punto analizado, ajustándose una relación con un buen r^2 (0,87) y un NSEM = 0,87.

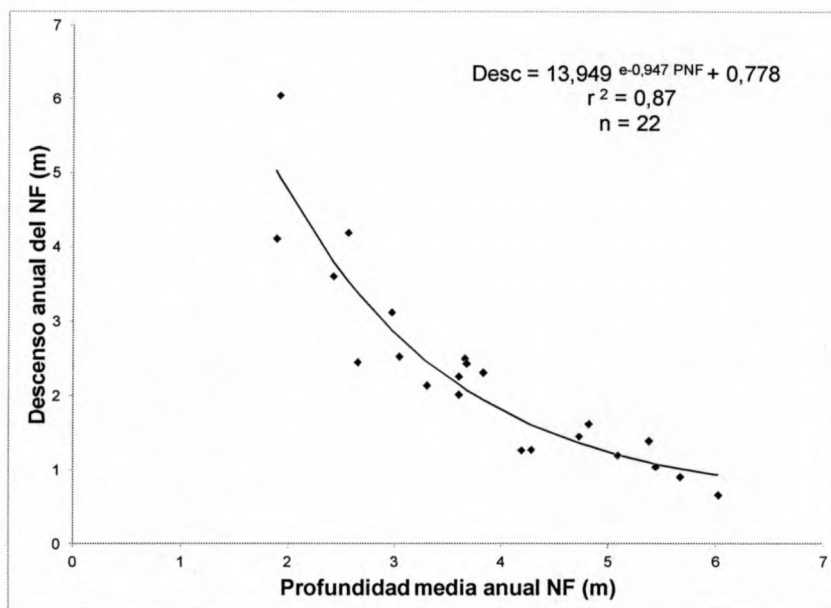


Figura 5 - Relación entre los descensos anuales del NF (m) y su profundidad media anual (m).

3.5 Caudal base

Se ha determinado el caudal base para 16 años en la estación Seminario (Fig. 1), cercana al pozo analizado. En primer lugar, se analizó la dependencia del caudal base con el nivel freático. En la Fig. 6 se muestra la relación obtenida, donde se observa un caudal base que disminuye a medida que desciende el NF. Se obtuvo un ajuste exponencial negativo con un aceptable $r^2 = 0,73$ y un NSEM = 0,72.

3.6 Relaciones de la recarga y caudal base

La recarga depende de la precipitación (Fig. 3) y es razonable pensar que niveles freáticos más altos favorecerán los eventos de recarga. Por lo tanto, se planteó una correlación múltiple con esas dos variables con $n = 22$. La ecuación obtenida es

$$R = 0,306P + 36,350NF - 4807,849 \quad (3)$$

con $r^2 = 0,81$ y NSEM = 0,81, donde NF es el nivel freático medio (msnm) y R y P ya han sido definidas antes y están dadas en mm, todos valores anuales.

Finalmente, exploramos la relación entre el caudal base en una sección cercana del arroyo del

Azul con la precipitación y el nivel freático medio anual. Se cuenta con 16 años con datos de caudal base para la Estación Seminario (Fig. 1). Se obtuvo una ecuación lineal con $r^2 = 0,67$ y $NSEM = 0,63$

$$Qb = 0,001P + 0,668NF - 85,289 \quad (4)$$

con Qb en m^3/s , P en mm y NF en m .

Si tanto la recarga como el caudal base pueden ser aproximados en función de la precipitación y los niveles freáticos medios anuales, cabe esperar que pueda encontrarse una buena relación entre los dos primeros. En la Fig. 7 puede verse la relación lineal ajustada entre ambos, con un $r^2 = 0,64$ y un $NSEM = 0,64$. Esta relación lineal entre recarga y caudal base indica que, a mayor recarga se produce un mayor nivel freático, lo cual se traduce en mayores caudales básicos.

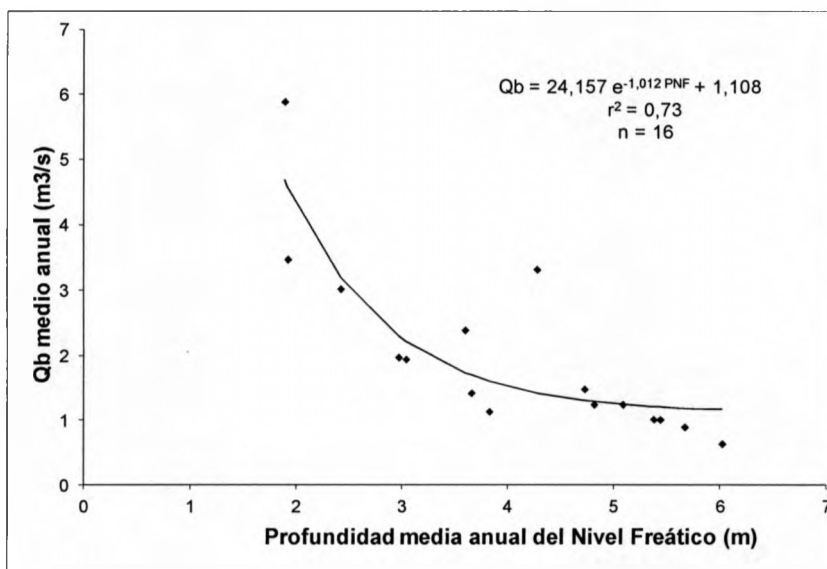


Figura 6 - Caudal base medio anual (m^3/s) en función de la profundidad media anual del NF (m).

4 CONCLUSIONES

El método de fluctuación del nivel freático se ha mostrado efectivo para estimar la recarga al acuífero freático con niveles someros en una llanura subhúmeda. Las estimaciones son consistentes con aquellas publicadas en la literatura. El método se ha mostrado como muy apropiado para describir las variaciones temporales de la recarga.

Se estimó un almacenamiento específico de 0,09 en la zona de fluctuación del nivel freático analizando todos los eventos de recarga producidos en 22 años de registro en un pozo somero ubicado en el Campus Universitario Azul.

La recarga media anual para el periodo de análisis fue de 202,5 mm (17,9 %P), el año con mayor recarga fue 2002 con 539 mm, es decir un 19,5 % de la precipitación anual, aunque la recarga porcentualmente más alta ocurrió en 1992, con 37 % de P (R = 386 mm y P = 1054 mm). La recarga mínima, tanto en milimetraje como en porcentaje, ocurrió en 2008 con 23 mm (4 % de la precipitación).

Se halló una buena relación ($r^2 = 0,87$) entre los descensos anuales del nivel freático y el nivel medio anual en la que se ajustó una ecuación exponencial negativa. Estos descensos se dan porque el acuífero descarga a los cursos de agua y cuerpos de agua permanentes o transitorios, y también debido al efecto de la evapotranspiración cuando el nivel freático se halla cercano al terreno.

Se encontró una ecuación que relaciona la recarga anual con la precipitación y los niveles freáticos medios anuales, con un coeficiente de correlación de 0,81. También se halló una relación entre el caudal medio base anual con la precipitación y el nivel freático medio con un aceptable $r^2 = 0,67$. Finalmente, se ajustó una relación lineal entre caudal base y nivel medio freático ($r^2 = 0,64$).

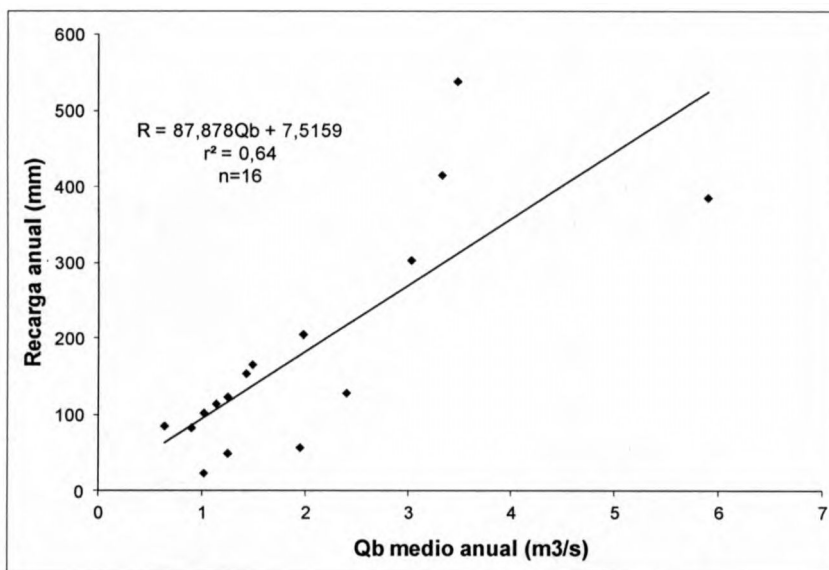


Figura 7 - Recarga anual (mm) en función del caudal base medio anual (m³/s).

REFERENCIAS

- Crosbie, R.S., Binning, P. and Kalma, J.D., 2005. A time series approach to inferring groundwater recharge using the water table fluctuation method. *Water Resources Research* 41(1):1-9.
- Delin, G.N., Healy, R.W., Lorenz, D.L. and Nimmo, J.R., 2007. Comparison of local- to regional-scale estimates of ground-water recharge in Minnesota, USA. *Journal of Hydrology*, 334(1-2):231-249.
- Fetter, C.W., 2001. *Applied hydrogeology*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Guarracino, L., Tocho, C., y Varni, M., 2011. Estimación del rendimiento específico a partir de datos gravimétricos satelitales. En: Fernández, J.M. & Sánchez Martín, N. (Eds.). *Estudios en la Zona no Saturada del Suelo*, 10:327-330.
- Healy, R.W. and Cook, P.G., 2002. Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, 10: 91-109.
- Healy, R.W., 2010. *Estimating groundwater recharge*. Cambridge University Press.
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part 1 – A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10:282-290.
- Nichols, D.S. and Verry, E.S., 2001. Stream flow and groundwater recharge from small forested watersheds in north central Minnesota. *Journal of Hydrology*, 245:89-103.
- Risser, D.W., Gburek, W.J., and Folmar, G.J., 2005. *Comparison of methods for estimating ground-water recharge and base flow at a small watershed underlain by fractured bedrock in the Eastern United States*. United States Geological Survey Scientific Investigation Report 2005-5038.
- Rodríguez, L.B., Vionnet, C.A., Parkin, G. and Younger, P.L., 2000. Aplicación de un método automático para la separación de las componentes del hidrograma. *XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Córdoba, Argentina.
- Sami, K. and Hughes, D.A., 1996. A comparison of recharge estimates to a fractured sedimentary aquifer in South Africa from a chloride mass balance and integrated surface-subsurface model. *Journal of Hydrology*, 179:111-136.
- Sophocleous, M., 1992. Groundwater recharge estimation and regionalization: the Great Bend Prairie of central Kansas and its recharge statistics. *Journal of Hydrology*, 137:113-140.
- Taylor, R.G. and Howard, K.W.F., 1995. Groundwater recharge in the Victoria Nile basin of east Africa: support for the soil moisture balance approach using stable isotope tracers and flow modeling. *Journal of Hydrology*, 180:31-53.
- Walton, W.C., 1970. *Groundwater resource evaluation*. McGraw Hill.
- Weinzettel, P., Usunoff, E. and Vives, L., 2005. *Groundwater recharge estimations from studies of the unsaturated zone*. In: *Groundwater and human development*. (Ed. by Bocanegra, E., Hernandez, M. & Usunoff, E.). Leiden, The Netherlands: Balkema Publishers.