

La recarga a través de cordones medanosos en zonas semiáridas. Estudio de caso: Médanos, Prov. de Buenos Aires, Argentina

J.C. Carrica*

Departamento de Geología, INGEOSUR, Universidad Nacional del Sur, San Juan 670 (8000) Bahía Blanca, Argentina

C. Lexow

PAID CIC – Departamento de Geología, Universidad Nacional del Sur

A.G. Bonorino

Departamento de Geología Universidad, Nacional del Sur

* Email de correspondencia: jcarrica@uns.edu.ar

RESUMEN: En la Argentina más del 70% de la superficie posee climas áridos y semiáridos, donde conocer el recurso hídrico subterráneo resulta vital. En estas zonas, la presencia de cordones medanosos favorece a la recarga por agua de lluvia. Los procesos y mecanismos de la recarga en éstos ambientes son conocidos pero la obtención de un valor confiable de la misma presenta aún grandes dificultades dada la variabilidad espacial y temporal con que ocurre. En este trabajo se cuantifica la recarga en un área medanosa con diferentes métodos: simulación del flujo de agua (HYDRUS 2D/3D), balance hidrológico del suelo (Balshort) y balance del ión cloruro entre el agua de lluvia y de la capa freática. Los resultados se comparan con otros obtenidos en ambientes similares de la Argentina. Se concluye que es necesario implementar varias metodologías de estimación de la recarga a los efectos de acotar la incertidumbre de los resultados.

Palabras clave: Recarga, médanos, balance hidrológico

ABSTRACT: In more than 70% of Argentina arid and semiarid climates occurs, where the knowledge of groundwater resources is very important. In these areas, the presence of dune systems allows preferential rainwater recharge. Recharge processes in these environments are well known but due to spatial and temporal occurrence is difficult to quantify. Different methods as a software package to simulating water flow (HYDRUS 2D/3D), soil water balance (Balshort) and chloride ion balance between rainwater and groundwater are used to estimate the dune system recharge. The results are compared with other similar areas in Argentina. We conclude that it is necessary to carry out several methodologies for estimating recharge to limit the uncertainty of the results.

Keywords: Recharge, dunes, water balance

1 INTRODUCCIÓN

Más del 70% de la superficie de la Argentina posee climas áridos y semiáridos para la que el conocimiento cuali-cuantitativo del recurso hídrico subterráneo resulta de vital importancia dado que, usualmente, es el único recurso hídrico disponible. Dentro de estas zonas, la presencia de cordones medanosos resulta de particular importancia e interés, puesto que naturalmente favorecen la recarga (R) por agua de lluvia convirtiéndose en indicadores y, frecuentemente, en portadores de acuíferos freáticos con agua dulce. Si

bien los procesos y mecanismos de la recarga son relativamente bien conocidos, la obtención de una estimación fiable de la misma presenta aún grandes dificultades dada la variabilidad espacial y temporal con que ocurre.

Los métodos comúnmente utilizados en la Argentina para estimar la recarga en estas zonas son los balances hidrológicos, el análisis de las fluctuaciones de los niveles freáticos, métodos empíricos y trazadores hidroquímicos naturales (balance del ión cloruro). Cada uno de ellos presenta ventajas y desventajas las que dependerán no solo del método propiamente dicho sino del modo de aplicación. Por ello, resulta muy importante contar con un acabado conocimiento del mo-

delo conceptual de funcionamiento del sistema hidrológico del área de estudio, especialmente sobre los procesos y mecanismos de la recarga, y también la posibilidad de aplicar varios métodos de cálculo, si es posible independientes entre sí, para comparar resultados y minimizar errores.

Carrica (2009) cita experiencias propias y de otros autores (Burgos et al., 1983; Bonorino y Torrente 1992; Giai, 1997; Schulz et al., 1998) que han cuantificado la recarga en zonas medanosas en climas semi-áridos de la Argentina mediante distintos métodos, obteniendo una gama de valores desde 10% hasta casi 55% de la precipitación anual, éstos últimos en climas de transición del SO de la Provincia de Buenos Aires. Las diferencias ocurren no sólo por el método empleado sino en la cantidad y calidad de los registros hidrológicos utilizados, el conocimiento de las características hidrológicas del suelo, el grado de cobertura vegetal, etc.

2 OBJETIVO Y MÉTODO

En este trabajo se cuantifica la recarga en un área medanosa mediante el uso de distintos métodos y se comparan sus resultados. El objetivo es planificar una explotación racional del recurso hídrico subterráneo para abastecer de agua potable a la localidad de Médanos, Provincia de Buenos Aires, Argentina. En principio se aplicó un método de cálculo numérico empleando el programa HYDRUS 2D/3D (Simunek et al., 2006) para calcular el balance hidrológico en la zona no saturada (ZNS). Con el mismo se intentaron alcanzar conclusiones para ser referenciadas con experiencias similares como las de Abbs y Littleboy (1998), Jiménez et al. (2007), Ajdary (2008), Kandelous y Simunek (2010) y Lu et al. (2011), entre otras. Los resultados se compararon con los obtenidos mediante el uso de los métodos más usuales de balance hidrológico diario del suelo, Balshort V.3. (modificado de Carrica, 1993) y el balance del ión cloruro entre la concentración en el agua de lluvia y en la capa freática.

3 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área del estudio comprende unos 30 Km² al NNE de la localidad de Médanos, Prov. de Buenos Aires con centro aproximado en 62° 41' LO y 38° 47' LS. Posee una altura media 30 m.s.n.m con una suave pendiente de 0,2 % hacia el NE. Morfológicamente constituye un "área con remociones eólicas de arenas" (González Uriarte, 1984) donde el paisaje general está caracterizado por la presencia de arenas eólicas que

determinan un relieve medanoso pronunciado. En ciertos sectores se presenta una cobertura vegetal natural de asociaciones psamófilas que los fijan. Hacia el sur y oeste estas geoformas medanosas son reemplazadas por un área arenosa llana. Los suelos tienen una textura arenosa franca y se clasifican como una asociación de Ustipsament típico con Torripsament ústico, desarrollados en las planicies, y Cuarzipsament típico, en sectores medanosos (INTA, 1989). Son además friables, con escasa diferenciación de horizontes y, sin su cobertura vegetal, son susceptibles de erosión eólica.

El clima de la zona es templado y seco, con una temperatura media anual es de 14,2 °C, y extremos medios en enero y julio de 22,5 °C y 7 °C respectivamente (Bonorino, 1979). La estación más seca corresponde al invierno en tanto que primavera y otoño son las estaciones lluviosas. Los registros pluviométricos utilizados en este trabajo corresponden al período 1973-2005 donde se contabilizó una media de 550 mm, siendo los extremos de la serie el año más seco 1995 con 353 mm y el más lluvioso 1976 con 997 mm (FUNS, 2011). La evapotranspiración potencial (ETP) (Tabla 1) se calculó en base a registros de evaporación (Ev) en tanque tipo A (período 1946-1965) (Edison Consult, 1967) de la Estación Argerich, cercana al área de estudio, aplicando los coeficientes reductores (*f*) de Penman. Esta aproximación resulta válida pues no existen variaciones notables en los registros térmicos medios de la región en el último siglo (FUNS, 2011).

Tabla 1. Valores de ETP medios mensuales (en mm)

E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
161	119	86	51	25	16	19	31	50	77	124	149

Desde el punto de vista hidrogeológico es de interés la Formación Médanos (Holoceno) que cubre total o parcialmente a los sedimentos predominantemente limosos de la Formación Chasicó (Plioceno inferior) (Bonorino, 1979). La primera está compuesta por arenas medias-finas eólicas en forma de mantos o médanos que generan una rápida infiltración del agua de lluvia, e incorporación a la zona saturada. Bonorino (1979) indica espesores del acuífero libre alojado en la base de la Formación Médanos entre 0,5 y 13 m, con un valor medio de 3 m y profundidades del nivel freático entre 2,5 y 11 m, dependiendo de la posición topográfica del punto censado. El acuífero libre está conectado hidráulicamente con niveles inferiores de la Formación Chasicó compuesta predominantemente por limos con intercalaciones de arenas y arcillas y algunos niveles de yeso que presentan características acuitardas-acuícludas con aguas salinizadas naturalmente. Los estudios geofísicos realizados reciente-

mente (FUNS, 2011) detectaron un notable incremento de la salinidad a una profundidad de entre 14 y 29 metros, marcando el límite inferior de lo que se interpreta como el piso de una lente de agua de baja salinidad. Estas lentes de agua dulce descansan sobre una masa de agua más salobre y extensa, contenidas ambas en el mismo acuífero, dando lugar a una estratificación hidroquímica.

El escurrimiento subterráneo regional es de SO a NE, al igual que la inclinación general del terreno, pero dentro de la zona medanosa la morfología de la capa freática es de tipo radial, con flujos locales superpuestos al regional, divergentes desde las partes medanosas más altas hacia las zonas de descarga de intramedanos, donde a veces aflora. La hidrodinámica del sector se caracteriza por una rápida e importante tasa de recarga pero también una relativa rapidez de flujo hacia las zonas de descarga locales, dando lugar a lentes de agua dulce de espesor y extensión variable. Las aguas de la capa freática son del tipo bicarbonatadas sódicas y se ubican en la zona central de la franja medanosa (salinidad entre 350 mg/l a 480 mg/l) incrementándose hacia los bordes de la misma (hasta 1.900 mg/l). No obstante, este concepto puede modificarse según la profundidad de extracción del agua y el régimen de explotación de la perforación.

4 METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE LA RECARGA

La obtención de un valor confiable del volumen de agua que recibe anualmente el sistema acuífero es de vital importancia para establecer la cantidad de agua que puede extraerse del mismo, sin alterar sus reservas y calidad química. Esta premisa permite elaborar un programa de aprovechamiento sostenible del recurso hídrico subterráneo.

4.1 Modelo de simulación HYDRUS 2D/3D

Mediante la aplicación del código HYDRUS 2D/3D (Simunek et al., 2006) se simuló el balance de agua en la ZNS. El modelo de elementos finitos resuelve numéricamente, en dos dimensiones, las ecuaciones de Richards para el flujo de agua en el medio no saturado - saturado y las ecuaciones de Fick (advección - dispersión) para el transporte de calor y solutos. La ecuación de flujo incluye un término sumidero que hace referencia a la extracción de agua por parte de las raíces de las plantas. Para la aplicación del método de elementos finitos para resolver las ecuaciones de flujo y transporte se emplea el método Galerkin a partir de

las condiciones iniciales y de contorno definidas por el usuario.

La ZNS fue considerada texturalmente homogénea y los parámetros hidráulicos (humedad residual θ_r , humedad en saturación θ_s , α y n parámetros empíricos condicionantes de la forma de la curva de retención y K_s permeabilidad saturada) calculados por medio de la función de pedotransferencia *Rosetta* suministrada por el mismo programa que arrojó las siguientes valoraciones (Tabla 2):

Tabla 2. Parámetros hidráulicos

Capa	θ_r	θ_s	α (cm^{-1})	n	K_s (cm/d)
1	0,022	0,44	0,064	1,40	344

La representación del medio físico resultó en un dominio geométrico rectangular de 300 cm de ancho por 300 cm de altura conformado de una malla de elementos finitos de 220 nodos y 394 elementos triangulares. Se asumen, en el mismo, propiedades físicas y químicas uniformes.

El tiempo total de simulación fue de 12.053 días cuya discretización consistió en: paso de tiempo inicial de 0,0001 (día), paso mínimo $1e^{-005}$ (día) y máximo 5 (día). En $t = 0$ el perfil se fijó con una tensión matricial de -200 cm equivalentes a 522 mm de agua almacenada.

El límite superior del modelo, superficie del suelo, se consideró dependiente de las condiciones atmosféricas: las precipitaciones medidas y la evapotranspiración real (ETR) calculada por el programa en función de la ETP. Se estableció la existencia de vegetación herbácea con una profundidad máxima de raíz de 30 cm y para el cálculo de la extracción de agua, término sumidero, se aplicó el modelo de Feddes et al. (1978, en Simunek et al., 2006) que es una de las opciones del programa. Los límites laterales son nodos con ausencia de flujo, mientras que la superficie inferior ($z = 0$) se estableció como un límite de drenaje libre. En función de estudios previos (Lexow, 2010) y dado que el programa HYDRUS 2D/3D no considera la interceptación vegetal, se ajustó un porcentaje de cobertura vegetal del 50%, de manera tal que los resultados de ETR calculados sean compatibles con la ETR más la interceptación vegetal considerada en el Balshort V.3.

En la figura 1 se presenta los resultados acumulados del balance de acuerdo a la salida del programa (entradas negativas y salidas positivas).

Los resultados del balance hidrológico correspondiente al período (Enero 1973 - Diciembre 2005) en valores anualizados promedio son: $P = 551$ mm; $ETR = 376$ mm; $R = 185$ mm (33,3 % de la lluvia); Almacenamiento final de agua en el perfil = 512 mm; Variación de la reserva = - 10 mm.

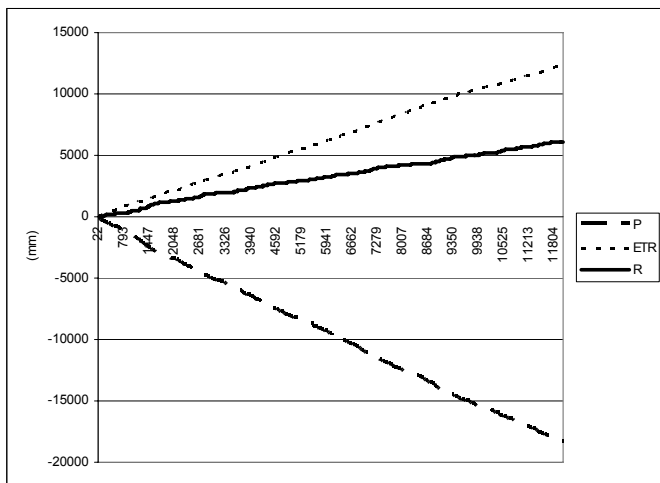


Figura 1. Precipitación (P), evapotranspiración real (ETR) y recarga (R) en valores acumulados (HYDDRUS 2D/3D)

4.2 Balance hidrológico diario

El balance hidrológico, tanto a nivel regional o de cuenca como del suelo, sigue siendo el método más difundido y utilizado para el cálculo de recarga. Sin embargo, hay que tener en cuenta que los balances atmosféricos modulares anuales o mensuales en estas zonas no tienen ningún sentido real ya que resultan siempre deficitarios y no existiría posibilidades de recarga directa. Por ello es que autores como Lerner (1990), Hendrickx and Walker (1997), Simmers (1997), Scanlon et al. (2002), entre otros, coinciden en señalar que el balance hidrológico del suelo en zonas áridas y semiáridas solo puede emplearse si se realiza a paso diario, puesto que, cuando la precipitación diaria supera el valor de ETR diaria, da lugar a un exceso de agua factible de constituirse en recarga. Además, en estas zonas las lluvias, si bien ocasionales, suelen ser de corta duración e intensas, lo cual favorece la situación antes mencionada.

En este sentido se aplicó el programa de balance hidrológico diario del suelo Balshort (Carrica, 1993; Carrica, 2009) que utiliza datos de P diarios y calcula la ETR diaria en función de la ETP diaria, la humedad del suelo y la textura del suelo. Dispone de tres funciones básicas que relacionan la ETR/ETP con la humedad antecedente y la textura de los suelos, resaltando la importancia de la retención de agua en función de ésta. La última versión del programa (Balshort V.3) también estima la interceptación vegetal (I_v) basándose en el método de Horton para cuatro cultivos básicos y limita el valor de I_v a 5 mm diarios, sobre la base del concepto de que la misma alcanza un valor final independiente de la cantidad de P. El programa ha brindado buenos ajustes con otros métodos (fluctuaciones del nivel freático y balance del ión Cl) en

zonas semiáridas como el sur de la Provincia de Buenos Aires (Carrica, 2009).

En el presente trabajo se utilizó P diaria (1973-2005) y la ETP calculada para la estación Argerich (cfr. Ítem 3). También se consideró un suelo de textura arenosa con una capacidad de retención de hasta 24 mm, en base a una profundidad radicular media de 30 cm y a una retención específica de la arena de 8% (Geological Survey Water-Supply Paper 1839 D, 1967; Sánchez et al., 1998) y con una cobertura vegetal: pastos, con capacidad de $I_v \leq 5$ mm diarios.

Los resultados del balance hidrológico diario y seriado del suelo en valores anualizados promedio es: P = 551 mm; Interceptación vegetal: 38,2 mm; ETR = 318,2 mm; R = 194,7 mm (35,3 % de la lluvia); Variación de la reserva ~ 0 .

Los años con los valores de R extremos de la serie resultaron ser en 1976 con P = 966 mm y un valor de R = 476 mm (49% de P) y en 1981 con P = 399 mm y R = 58 mm (14,5% de la P).

4.3 Balance del ión cloruro

El método, basado en el transporte de masa y energía, es alternativo a los hidrodinámicos y en gran medida independiente de ellos, ya que considera las propiedades asociadas al agua pero no mide el agua propiamente dicha, por lo que resultan de interés para contrastar resultados. Los cloruros (Cl^-) presentes en el agua de lluvia sufren una concentración por ETR de tal modo que el agua de recarga presenta un factor de enriquecimiento en Cl^- (FEC) tal que $FEC = [Cl^-]_p / [Cl^-]_r$ ⁽¹⁾. En el caso de Médanos, donde no existe escurrimiento superficial, el balance de masas se simplifica y la recarga media anual en mm es: $R = P \times FEC$ ⁽²⁾, en donde P es la precipitación media anual.

Se tomó la concentración promedio del ión cloruro (0,676 meq/l) del agua de lluvia en la Laguna Chasicó (Bonorino, 1989) ubicada a 30 kilómetros al NO del área de estudio, para todas las tormentas del corto período 01/01/1988 al 15/03/1989, y la concentración promedio de cloruros en el agua subterránea de nueve pozos en el área medanosa (2 meq/l de Cl^-) y, para comparar, la de un pozo inactivo ubicado en el centro de la cadena medanosa ($rCl = 1,24$ meq/l). Aplicando las ecuaciones ⁽¹⁾ y ⁽²⁾ para una P = 551 mm anual, se obtiene R = 186 mm (33,8% de P), mientras que para el pozo con menor concentración de Cl^- , R = 301 mm (54,5% la P).

4.4 Conclusiones

Los valores de recarga medios anuales calculados con los diferentes métodos resultan análogos, entre 185 y 195 mm anuales (entre el 33 y 35 % de la precipita-

ción media anual). Los balances hidrológicos diarios observan importantes variaciones anuales con valores mínimos de 58 mm a máximos de 476 mm dependiendo de la pluviometría anual. El método del balance del ión cloruro denota variaciones espaciales de importancia máximas de recarga de hasta el 54% de la precipitación del periodo considerado en los pozos del centro de la cadena medanosa hasta valores de 20% de la precipitación (120 mg/l de Cl) en la llanura arenosa circundante.

Si bien las cadenas de médanos constituyen por excelencia un medio muy permeable que favorece a la recarga por agua de lluvia, debe tenerse muy en cuenta las características hidrogeológicas, las dimensiones y funcionamiento hidrodinámico del potencial acuífero subyacente. En el caso de Médanos, si bien los valores de recarga son importantes, el acuífero freático con aguas dulces es de espesor relativamente reducido (entre 5 y 15 m) que pasa en rápida transición lateral y en profundidad a una zona de mezcla (interfase) con aguas salinas más profundas y de recorrido más extenso.

5 REFERENCIAS

Abbs, K. and Littleboy, M., 1998. Recharge estimation for the Liverpool Plains. *Australian Journal of Soil Research*, 36(2): 335-357.

Ajdary, K., 2008. Application of HYDRUS-2D for Simulation of Water Distribution in Different Types of Soils. *International Meeting on Soil Fertility Land Management and Agroclimatology*, Turkey, 253-261.

Bonorino, A. G., 1979. Estudio hidrogeológico para la provisión de agua subterránea en la zona de Médanos, Partido de Villarino, provincia de Buenos Aires. VI Congreso Geológico Argentino, Actas: 449-465. Buenos Aires.

Bonorino, A. G. y Torrente, R., 1992. Balance iónico aplicado al cálculo de la infiltración eficaz en áreas de relieve medanoso. III Jornadas Geol. Bonaerenses. Actas: 189-194

Burgos, J., Troha, A., y Forte Lay, J., 1983. Capacidad de agua y verificación de modelos de estimación de valores mínimos de almacenaje en algunos suelos áridos y semiáridos. IDIA (INTA). Argentina. Suplemento (36):87-95.

Carrica J., 1993. Balshort: Un programa de balance hidrológico diario del suelo aplicado a la región sudoccidental pampeana. XII Congreso Geológico Argentino y II Congreso de Exploración de Hidrocarburos. Actas Tomo VI:243-248.

Carrica J., 2009. Cálculo de la recarga en zonas áridas y semiáridas. En Recarga de Acuíferos. Aspectos generales y particularidades en regiones áridas. Jorge Carrica, Mario Hernández y Eduardo Mariño (Eds). 2009. AIH-Fac. Exactas y Naturales UNLPam. ISBN 978-987-1082-39-1: 71-80. Santa Rosa.

Edison Consult, 1967. Estudio técnico económico y social Valle Bonaerense Río Colorado. Primera fase. Tomo I. Meteorología, climatología y Agrometeorología.

Fundación de la Universidad Nacional del Sur (FUNS), 2011. Estudio hidrogeológico en Médanos, Prov. De Buenos Aires. Informe inédito. 29 pp y anexos.

Geological Survey Water-Supply Paper 1839 D. 1967. Summary of hydrologic and physical properties of rock and soil materials, as analyzed by the Hydrologic Laboratory of the U.S. Geological Survey.

Giai, S., 1997. Rasgos hidrogeológicos de El Meauro, Provincia de La Pampa, con especial referencia a su freaticimetría. I Congreso Nacional de Hidrogeología. Bahía Blanca (Argentina). Actas: 105-116.

González Uriarte, M., 1984. Características geomorfológicas de la porción continental que rodea la Bahía Blanca, provincia de Buenos Aires. IX Congreso Geológico Argentino, S.C. de Bariloche, 1984. Actas III: 556-576.

Hendrickx J. and G. Walker, 1997. Recharge from precipitation. IAH Simmers, I. (Ed.), 1997. Recharge of phreatic aquifers in (semi-) arid areas. IAH N° 19:19-98. Balkema. Rotterdam-Brookfield.

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), 1989. Mapas de Suelos de la Provincia de Buenos Aires. Publicación del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, 527 pp., Buenos Aires.

Jiménez, J., Skaggs, T.H., van Genuchten, M. Th. y Candela, L., 2007. Estimación de la recarga por retorno de riego a partir de datos experimentales. Análisis de campo, laboratorio y modelación. *Estudios en la Zona No Saturada*. J.V. Giráldez Cervera y F.J. Jiménez Hornero (Ed.), VIII: 101-105.

Kandelous, M.M. y Simunek, J., 2010. Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS-2D. *Agricultural Water Management*, 97: 1070-1076.

Lexow, C., 2010. Distribución del agua en un suelo Hapludol: manejo del código Hydrus 2D/3D en la modelación del flujo no saturado. *Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en zonas de llanuras* (Eds. M. Varni, I. Extraigas, L. Vives) Instituto de Hidrología de Llanuras Dr. E. Usunoff (1): 279-286. ISBN 978-987-543-392-2.

Lerner, D.N; Issar, A. and Simmers I. 1990. Groundwater recharge. A guide to understanding and estimating natural recharge. International Contribution to Hydrogeology, Verlag Heinz Heise. Vol. 8: 345 pp.

Lu, X., Jin, M., van Genuchten, M. Th. and Wang, B., 2011. Groundwater recharge at five representative sites in the Hebei Plain, China. *Groundwater*, 49(2): 286-294.

Sánchez, R., N. Pezzola y J. Cepeda, 1998. Caracterización edafoclimática del área de influencia del INTA E.E.A. Hilario Ascasubi, Partidos de Villarino y Patagones, provincia de Buenos Aires. Boletín de divulgación N° 18. INTA Hilario Ascasubi. 72 pp. (Inédito).

Scalon, B. R, Healy, R., and Cook, W.P.G., 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal* Vol 10:18-39. Springer

Schulz, C., Dornes, P., Vives, L. y Bonorino, A.G. 1998. Caracterización hidrogeológica del acuífero detrítico del Valle Argentino, La Pampa, Argentina, con especial énfasis en el estudio de la recarga. IV Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea. ALHSUD. Actas 3:1457-1467. Montevideo. Uruguay

Simmers, I. (Ed.), 1997. Recharge of phreatic aquifers in (semi-) arid areas. IAH N° 19. Balkema. Rotterdam-Brookfield. 277 pp.

Simunek, J., Sejna, M. and van Genuchten, M. Th., 2006. The HYDRUS (2D/3D) software package for simulating the two- and three-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably saturated media. Version 1.0. PC Progress, Prague, Czech Republic.