

Hidrogeología urbana: una nueva rama de la ciencia hidrogeológica

E. Custodio

Departamento de Ingeniería del Terreno, E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Cataluña, C/ Gran Capitán, s/n.
Ed. D2. 08034 Barcelona (España).
E-mail: emilio.custodio@upc.es

RESUMEN

La explotación del agua subterránea en las ciudades y su entorno sigue normalmente una evolución que pasa del uso intensivo, al abandono progresivo con anegamientos, y finalmente al aprovechamiento sustentable. En la mayoría de las situaciones reales de las grandes urbes se está aún en la primera fase, con muchos casos en que ya se ha entrado en la segunda, pero empieza a haber ejemplos de la tercera. El conjunto presenta peculiaridades propias que hace que se haya formado un cuerpo científico y aplicado en el campo hidrogeológico, que es la hidrogeología urbana. Tiene peculiaridades propias, tanto por la evolución, como por las características de la recarga y de la superficie por la que ésta se produce, por el ambiente fisicoquímico subterráneo y por la presencia de contaminantes muy específicos. Se presenta una breve nota acerca de la situación actual.

Palabras clave: abastecimiento, aguas subterráneas, áreas urbanas, ciudades, hidrogeología

Urban hydrogeology: a new branch of hydrogeological science

ABSTRACT

Groundwater development in urban areas and their surroundings normally follows an evolution that progresses from intensive use, to progressive abandoning with water logging problems, and ending with a sustainable exploitation. Most real situations in large urban areas correspond to the first phase although in many cases the second phase is already established, but there are currently examples of the final phase. The full set contains enough specific characteristics to form a scientific and applied body of knowledge inside the hydrogeological field, thus constituting the urban hydrogeology. This has its own circumstances, considering the behaviour and evolution, as well as the recharge characteristics and the land surface through which it is produced, the underground physico-chemical environment and the existence of very specific contaminants. A brief note on the current situation is presented here.

Key words: groundwater, hydrogeology, towns, urban areas, water supply

Introducción

La hidrogeología urbana trata del conocimiento del flujo del agua subterránea y de la recarga, uso y calidad del agua, gestión y repercusiones en el ámbito de la ingeniería geológica en relación con los acuíferos bajo áreas urbanizadas y en sus alrededores.

En esas áreas los acuíferos someros son, por un lado, importantes elementos para el abastecimiento urbano. Por otro lado, su existencia supone posibles interacciones con edificios e instalaciones, los cuales a su vez pueden afectar al nivel freático. Pero también los acuíferos más profundos bajo el área urbana tienen interés por su importante papel geotécnico y

como fuente de agua urbana, tanto en el pasado, como actualmente y en el futuro.

La hidrogeología urbana considera también los acuíferos de los alrededores (peri-urbanos) que se usan para abastecer a la población y a sus satélites urbanos, industriales, comerciales, de riegos intensivos, de recreo, parques, etc. Todos esos acuíferos son con frecuencia objeto de explotación intensiva (Llamas y Custodio, 2003) en condiciones de recarga que han sido drásticamente modificadas y de modo que se favorece la penetración de contaminantes artificiales a causa de las actividades urbanas y peri-urbanas (Howard y Gelo, 2003; Lawrence y Cheney, 1996).

Aspectos básicos

Los principios básicos de la hidrogeología urbana son los mismos que rigen la hidrogeología general (Custodio y Llamas, 1983). Se aplican principios de flujo del agua subterránea, recarga y transporte de masa. Los aspectos específicos que la hacen singular hacen referencia a la drástica modificación de la superficie del terreno con respecto a las condiciones naturales, la existencia de muy numerosos puntos en los que se producen fugas de agua al terreno, la introducción de contaminantes en relación con las actividades urbanas, y el importante efecto sobre el intercambio de gases del terreno con la atmósfera, lo que supone una restricción de la difusión de O₂ y un cambio de la presión parcial de CO₂. Las reacciones bioquímicas en el suelo y en los cuerpos de agua subterránea pueden ser importantes, pero sus características, especificidad, velocidad y efectos son aún poco conocidos en diversos aspectos.

El estado actual hidrogeológico de una cierta área urbana es en gran manera el resultado acumulado de las actividades que se han realizado en el pasado en el mismo. Esto fue ampliamente debatido en el Simposio y Taller organizado por la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH) sobre este tema, en Nottingham, Reino Unido, en 1997, cuyos resultados se han reunido en dos volúmenes (Chilton, 1997, 1999). Ha sido considerado de nuevo en una reunión organizada por el Grupo Español de la AIH en Barcelona (AIH-GE, 2004). No es raro que sea uno de los aspectos que se tratan específicamente en numerosas reuniones científicas y técnicas hidrogeológicas actuales, o bien que son objeto de capítulos o secciones especiales en libros.

Efectos de la explotación

En general, el área urbana de una población y muchas de las áreas peri-urbanas fueron en primer lugar objeto de una explotación intensiva del agua subterránea. El resultado fue un acusado descenso de los niveles piezométricos y del nivel freático, que persistieron al menos algunos años. Los resultados más llamativos se pueden resumir en (Custodio, 1997; García-Fresca y Sharp, 2004; Howard y Gelo, 2003):

a) descenso del nivel freático. Es la primera manifestación, que en buena parte se hace presente por la pérdida de caudal de las captaciones y el aumento del coste de obtención del agua, lo que es grave en áreas pobres, como en Dhaka (Morris *et al.*, 2003). Cuando se está en esta situación, se favorece la

excavación de estructuras subterráneas (estacionamientos de vehículos, sótanos, túneles de ferrocarriles urbanos e interurbanos, pasos bajos para la circulación rodada...) sin necesidad de drenaje ni de protecciones impermeables en el momento en que se realizaron dichas obras.

- b) posterior ascenso del nivel freático cuando decrece la explotación de agua subterránea por deterioro general de las condiciones (ver más adelante). Se pueden crear serios problemas a las estructuras enterradas o excavadas, las cuales pueden quedar inundadas temporal o permanentemente. La corrección de estos resultados es con frecuencia difícil y costosa, o no es recomendable si el drenaje y extracción puede originar inestabilidad del suelo, y sifonamiento y arrastre de arenas. Este es el caso de ciudades como Barcelona, Mar del Plata, ciertas áreas de New York, etc. (Chilton, 1999).
- c) subsidencia del terreno cuando se trata de sedimentos recientes, a causa de la disminución de la presión intersticial (Poland y Davis, 1969), o bien colapsos locales si hay cavidades kársticas o sifonamiento y arrastre de arenas. Esto es manifiesto y una seria preocupación en Ciudad de México, en Bangkok, en Tokio, etc. Pequeñas subsidencias pueden llegar a crear problemas diferenciales en las edificaciones, como sucedió en Murcia durante y después de un año seco en el que los acuíferos someros en el área urbana fueron explotados temporalmente (Aragón-Rueda, 2004), o está sucediendo en el entorno de áreas urbanas del Valle Central de México, en California y alrededor de Tucson (Arizona), también en Bogotá (Lobo-Guerrero, 2003), donde se desnivelan carreteras y se rompen conducciones a lo largo de ciertos trazados. En áreas costeras y zonas muy llanas aumenta el riesgo de inundaciones. Son ejemplos clásicos Venecia, Bangkok y Tokio.
- d) abandono de pozos y otras obras de captación de agua subterránea, tales como galerías drenantes. Una causa común para estos abandonos y reducción de extracciones es la progresiva mala calidad del agua, y la presencia frecuente de componentes de interés sanitario que se usan como indicadores de contaminación, tales como ciertos microorganismos, amonio y nitritos, y también un alto contenido en nitratos, y un aumento de la dureza y de la salinidad del agua (véase Apodaca *et al.*, 2002; Custodio, 1991; Custodio y Galofré, 1987; Caballero *et al.*, 1986; Rivett *et al.*, 1990; Shahin 1990). En áreas costeras la intrusión de agua marina y/o la formación de conos salinos ascensionales.

les son otros problemas adicionales (Custodio y Bruggeman, 1987) que implican no sólo una seria pérdida de la calidad, sino también una mayor corrosión en instalaciones urbanas y domésticas, y a sótanos y estructuras enterradas metálicas o realizadas con cementos no resistentes a la corrosión y al exceso de sulfatos. Mar del Plata es un buen ejemplo, que no es único pues se repite en La Plata y Buenos Aires, en Argentina; en esta última ciudad la reversión a zonas encharcadizas y su extensión crea muy serios problemas sanitarios en sus áreas periféricas (Bucich y Nagi, 2003). También se puede producir abandono de pozos cuando se produce el desplazamiento de áreas industriales o de riego intensivo que usan agua subterránea a causa del fuerte incremento de los precios del suelo y la presión por construir viviendas con un entorno más urbano y agradable. El área del Besós en Barcelona es un buen ejemplo (Custodio y Bayó, 1986; Vázquez-Suñé, 2003; Ondiviela *et al.*, 2004).

- e) deterioro de la calidad del agua subterránea; tal como se ha dicho anteriormente, es una de las principales causas de abandono de explotaciones de agua subterránea. Entre los posibles contaminantes hay que considerar los productos petrolíferos fugados de tanques de almacenamiento de gasolineras y domicilios, el lavado de las superficies de las calles, y otros vertidos accidentales e irregulares. Los contaminantes inmiscibles se desplazan lentamente, ya que se produce una retención capilar, pero una fracción de los mismos es soluble, aunque varía mucho de un producto a otro; también otros aditivos y la incorporación de residuos del desgaste de motores y mecanismos, tales como algunos metales pesados, son contaminantes potenciales que preocupan. La presencia de disolventes orgánicos (tri-, tetra-, per-cloroetileno) y el resultado del amplio uso de detergentes y sustancias similares, y de componentes de B y EDTA se convierte en serios problemas, a veces persistentes. También ciertos productos farmacéuticos de uso común (sulfonamidas, analgésicos, antiinflamatorios, antihipertensivos, antidepressivos, medicamentos para diabéticos, modificadores sanguíneos, antiepilépticos...) y sus productos de degradación se puede encontrar en aguas subterráneas bajo obras urbanas cuando las condiciones fisicoquímicas no son favorables a su degradación (Drewes *et al.*, 2003; Bolton *et al.*, 1993; Krause y Schöler, 2000). De su comportamiento, persistencia y efectos aún se sabe poco. Aunque se han lanzado ciertas alarmas basadas en estu-

dios con aguas fluviales contaminadas y aguas residuales sobre ciertas especies animales inferiores sensibles, el problema parece ser controlable, pero falta investigación y acumulación de experiencia (Tsuchihashi *et al.*, 2002).

Evaluación

El ambiente subterráneo es complejo, sometido a entradas y salidas variables y cambiantes, según una disposición tridimensional, con diversos cuerpos de agua de diferente calidad que se mueven, se mezclan en sus bordes, se dispersan y se difunden. En general no es posible una descripción general para aclarar el comportamiento, y hay que llegar a estudios de detalle, como sucede en casos de contaminación puntual de relevancia práctica o legal especial, en los que se instala una densa red de observación, control y muestreo. Pero incluso en estos casos el modelo conceptual utilizable es necesariamente simplificado con respecto a la realidad, y por ello el buen sentido común, la experiencia y los estudios de sensibilidad juegan un papel clave.

La cuantificación de la recarga es uno de los aspectos difíciles (Yang *et al.*, 1999; Lerner, 2002). Está afectada por el grado de ocupación del territorio por instalaciones urbanas, tales como casas, edificios, calles, superficies pavimentadas, carreteras y áreas de suelo compactado, la distribución espacial y temporalmente cambiante de fugas de la red de distribución de agua, y la influencia del vertido de agua residual y de la red de alcantarillado (Lerner, 1986). El papel de los sistemas de saneamiento como fuentes de recarga de las aguas subterráneas es poco conocido en la práctica, y varía con el sistema operativo en una ciudad determinada, con la frecuencia y duración de períodos de funcionamiento en carga, del estado de conservación, de la posición relativa de las conucciones locales respecto al nivel freático, etc.

Aprovechamiento

Una vez que las primeras etapas de desarrollo han pasado y se produce un abandono generalizado de los pozos de captación, el agua subterránea bajo el área urbana es con frecuencia olvidada y despreciada, excepto en lo que se refiere a los problemas creados por la subida del nivel freático y las actividades que hay que emprender para controlarlo y luchar para corregir sus efectos. Pero los acuíferos están aún allí y a menudo representan un gran almacenamiento

de agua. Tal como se encuentra el agua en general resultan no potable, pero aún pueden ser agua dulce, de baja mineralización e incluso de mejor calidad de lo que generalmente se cree a causa de la actividad química y biológica en el terreno, y de procesos de mezcla. Incluso los acuíferos costeros salinizados pueden acabar siendo lavados por agua dulce, como en el caso del delta del Besós, Barcelona (Ondiviela *et al.*, 2004).

Estas aguas subterráneas que, como se ha dicho, se consideran una costosa molestia y la causa de serios problemas a las estructuras subterráneas y sistemas de transporte, se pueden recuperar, al menos en parte, para usos urbanos tales como riego de jardines y vegetación urbana, refrigeración de edificios, agua secundaria para servicios e incluso agua potable si se la somete a un tratamiento cuidadoso (Arandes, 2004). Este tratamiento cuidadoso, además de cloración, ajuste de pH y corrección de dureza, puede incluir ozonización, tratamiento con radiación ultravioleta, micro- y nano-filtración, electrodiálisis, y ósmosis inversa. Esto permite recuperar parte del coste causado por el ascenso del nivel freático y complementa la disponibilidad de recursos de agua dulce en grandes áreas urbanas, donde aquella es cada vez más escasa. Esto añade un gran volumen de almacenamiento que ayuda en la regulación de las fluctuaciones de las demandas de agua.

Un área interesante que está en desarrollo es la combinación de acuíferos urbanos con la reutilización de agua usada tratada. Hay ya experiencia, aunque limitada, y se abre un amplio campo de investigación y desarrollo tecnológico, que probablemente requiera de tratamientos avanzados del agua residual, tales como ultrafiltración y ósmosis inversa, y la consideración específica de micro y nano-componentes que pueden afectar a la salud, y de la supervivencia y transporte de microorganismos, bacterias y virus.

Importancia práctica

Está clara la tendencia mundial a que la población rural disminuya notablemente, con un crecimiento rápido de las áreas urbanas y una espectacular concentración humana en megaciudades. Esta ha sido y es la experiencia de los países industrializados, y será el futuro en los países que aún son muy rurales, en muchos de los cuales es ya preocupante el desarrollo continuado, desordenado y falto de servicios de las grandes urbes.

Es en esas ciudades y grandes urbes donde la hidrogeología urbana tiene un especial relieve, no

sólo ante los problemas de abastecimiento de agua potable, ya de por sí complejos, graves y difíciles, sino por los problemas asociados de contaminación persistente de suelos, subsidencia y colapso del terreno, interacción con edificaciones, obras viales y dispositivos urbanos varios, y no en pocas ocasiones inestabilización de laderas y encharcamientos persistentes.

La relación de urbes con problemas conocidos es muy larga. Baste citar São Paulo, Buenos Aires, La Plata, Mar del Plata, Bogotá, Ciudad de México y otras ciudades del área central de ese país, New York, Londres, Barcelona, Madrid, Sevilla, Milán, Venecia, El Cairo, Dhaka, Bangkok, Tokio, entre muchas otras. Las circunstancias y situaciones son muy diversas, cada una peculiar del lugar, pero abordables con los principios generales de las ciencias y técnicas hidrogeológicas, y con la experiencia acumulada de investigaciones, estudios y actuaciones en otros lugares.

Uno de los papeles de los hidrogeólogos urbanos es transmitir a los gestores, autoridades y público en general a través de los medios de difusión, que hay capacidad de conocimiento para abordar los problemas que surgen a consecuencia de lo hecho en el pasado y de lo que se hace en el presente en los acuíferos, y que se puede diseñar una explotación sustentable de agua. También es importante mostrar como esos acuíferos urbanos y periurbanos, gestionados racionalmente en un marco legislativo territorial adecuado, se convierten en reservorios de agua de gran relevancia en situaciones en la que los depósitos de regulación y emergencia son difíciles de ubicar y caros de construir. En esta línea la recarga artificial de esos acuíferos es una actividad tecnológica que puede ser muy efectiva y de la que ya se va teniendo una razonable experiencia general (Custodio, 1986), y en particular para almacenamiento (Gerges *et al.*, 2002), y que viene siendo utilizada ya desde hace tiempo en algunos lugares como Amsterdam (Duijnvenbooden y Olsthoorn, 2002; Olsthoorn, 2002) y Barcelona (Miralles y Cantó, 1984; Custodio *et al.*, 1982) y se está potenciando en Madrid (Iglesias, 2001; López-Camacho e Iglesias, 2000). Numerosos y tradicionales ejemplos corresponden a California (Custodio, 1986). En otros casos, la recarga y almacenamiento subterráneo es consecuencia del gran caudal de agua vertido por una gran área urbana del interior. Uno de los casos mayores es el de aguas abajo de Ciudad de México (Foster y Chilton, 2004), en el área que recibe las aguas residuales, en su mayor parte no tratadas.

En el momento presente el notable desarrollo de técnicas de membranas para el tratamiento de la cali-

dad y para la reducción de salinidad está abriendo interesantes nuevas posibilidades a costes compatibles con el que pueden soportar áreas urbanas con cierto desarrollo. Es un área de intensa investigación, donde aún son posibles progresos notorios.

También la hidrogeología urbana puede jugar un papel importante en cuanto al abastecimiento de agua de las ciudades cuando lleguen a desarrollarse sistemas separativos de calidad para permitir una reutilización más directa y generalizada, creando así recursos propios y aliviando la enorme presión depredatoria de las grandes urbes sobre el territorio que las rodea, con grandes obras que son costosas, muy polémicas, políticamente difíciles y que pueden hipotecar el futuro desarrollo.

Conclusiones

La hidrogeología urbana, como rama especializada de las ciencias y técnicas hidrogeológicas y de hidrología subterránea, es capaz de explicar y conocer el comportamiento de los acuíferos en las peculiares situaciones de las áreas urbanas y en su diversidad de circunstancias, y las interrelaciones entre las aguas subterráneas y el conjunto de edificaciones, espacios, vías de comunicación, dispositivos y servicios que conforman el área urbana.

Tras la fase de desarrollo intensivo de los acuíferos, y la posterior de reducción de la explotación con problemas de calidad y anegaciones, y en ocasiones de seria subsidencia, es posible alcanzar una fase de utilización sustentable. Eso supone que en ese tiempo la sociedad ha desarrollado normas de gestión y actuación apropiadas, basadas en la asunción de que los acuíferos pueden y han de jugar un papel de recurso natural de agua y de espacio de almacenamiento. Eso supone coordinar numerosas iniciativas, unidades administrativas y centros de decisión, pero este es un reto alcanzable si hay reconocimiento ciudadano y voluntad política para ello.

Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado durante la estancia del autor en el Instituto Geológico y Minero de España, organismo al cual se agradece su apoyo.

Referencias

AIH-GE. 2004. *El agua y la ciudad sostenible: hidrogeología urbana*. Asoc. Inter. Hidrogeólogos-Grupo Español.

- Instituto Geológico y Minero de España, Madrid. Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas, 11: 1-341.
- Apodaca, L.E., Bails, J.B. y Smith, C.M. 2002. Water quality in shallow alluvial aquifers, Upper Colorado River Basin, Colorado, 1997. *Jour. Am. Water Res. Assoc.* 38 (1): 133-149.
- Aragón Rueda, R. 2004. Efectos geotécnicos del aprovechamiento de acuíferos en infraestructuras urbanas: el caso de la ciudad de Murcia. *El Agua y la Ciudad Sostenible: Hidrogeología Urbana*. AIH-GE. IGME, Madrid, Serie H y AS. 11: 93-109.
- Arandes, R. 2004. El plan para la reutilización de las aguas del subsuelo de Barcelona por los servicios municipales: un tema para la reflexión y una apuesta por la sostenibilidad. *El Agua y la Ciudad Sostenible: Hidrogeología Urbana*. AIH-GE. IGME, Madrid. Serie H y AG, 11: 45-60.
- Bolton, Jr. H., Workman, J.W. y Girvin, D.C. 1993. Biodegradation of synthetic chelates in subsurface sediments from the southeast coastal plane. *J. Environ. Qual.*, 22: 125-132.
- Bucich, N.G. y Nagy, M.I. 2003. Affectation of urban structures by variation of phreatic level (natural and anthropic), Buenos Aires, Argentina. *RMZ-Materials and Geoenvironment*. Bled-Ljubljana. 50 (1): 79-82.
- Cavallaro, A., Corradi, C., di Felice, G. y Grassi, P. 1986. Underground water pollution in Milan and the Province by industrial chlorinated organic compounds. *Effects of Land Use on Fresh Waters*. Ellis Horwood, Chichester: 68-84.
- Chilton, J. (Ed.). 1997. *Groundwater in the urban environment, vol. 1: Problems, processes and management*. Balkema, Rotterdam: 1-682.
- Chilton, J. (Ed.). 1999. *Groundwater in the urban environment, vol. 2: Selected city profiles*. Balkema, Rotterdam: 1-356.
- Custodio, E. 1986. *Recarga artificial de acuíferos: avances y realizaciones*. Bol. Servicio Geológico del MOPU, Madrid, 46: 1-176.
- Custodio, E. 1992. Progresiva degradación de la cantidad y calidad de los recursos de agua en el sistema acuífero del Bajo Llobregat. *Anais 7º Congresso Brasileiro de Águas Subterráneas*. Belo Horizonte. Assoc. Brasileira de Aguas Subterráneas: 18-48.
- Custodio, E. 1997. Groundwater quality and quality changes related to land and water management around urban areas: blessings and misfortunes. *Groundwater in the Urban Environment, vol. 1: Problems, Processes and Management* (ed. J. Chilton). Balkema, Rotterdam: 11-22.
- Custodio, E. y Bayó, A. 1986. Interactions between land-use and aquifer behaviour in the surroundings of Barcelona (Spain). *Integrated Land Use Planning and Groundwater Protection Management in Rural Areas*. Intern. Assoc. Hydrogeol., Karlovy Vary: 90-97.
- Custodio, E. y Bruggeman, G.A. 1987. *Groundwater problems in coastal areas*. UNESCO, Studies and Reports in Hydrology, 45. París: 1-576.
- Custodio, E. y Galofré, A. 1987. Fast release of salinity after a flood in the Llobregat Valley (Catalonia, Spain).

- Vulnerability of Soil and Groundwater to Polutants*. TNO-NIPHEH, The Hague: 563-573.
- Custodio, E., Isamat, F.J. y Miralles, J.M. 1982. Twenty-five years of groundwater recharge in Barcelona (Spain). *Artificial Groundwater Recharge*, DKWK Bull., Dortmund, 11 (1): 171-192.
- Custodio, E. y Llamas, M.R. 1983. *Hidrología Subterránea*. Ediciones Omega, Barcelona, 2 vols.: 1-2350.
- Drewes, J.E., Heberer, Th., Rauch, T. y Reddersen, K. 2003. Fate of pharmaceuticals during groundwater recharge. *Ground Water Monitoring and Remediation*, 23 (3): 64-72.
- Duijvenbooden, S.W. van y Olsthoorn, T.N. 2002. A pilot study of deep-well recharge by Amsterdam Water Supply. *Management of Aquifer Recharge for Sustainability* (P. Dillon, Ed.). Balkema, Lisse: 447-451.
- Foster, S.S.D. y Chilton, P.J. 2004. Downstream of downtown: urban wastewater as groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 12: 115-120.
- García-Fresca, B. y Sharp, J.M. 2004. Consideraciones hidrogeológicas del desarrollo urbano. *El Agua y la Ciudad Sostenible: Hidrogeología Urbana*. AIH-GE. IGME, Madrid. Serie H y AS, 11: 221-233.
- Gerges, N.Z., Howles, S.R., Dennis, J., Dillon, P.J. y Barry, K.E. 2002. Town water supply purification using aquifer storage and recovery in a saline aquifer. *Management of aquifer recharge for sustainability* (P. Dillon, Ed.). Balkema, Lisse: 459-464.
- Hernández-García, M.E. 1998. *Impacto de la ciudad de Madrid sobre la calidad de las aguas subterráneas del acuífero detrítico terciario*. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid, Madrid. 1-553 + anejos.
- Howard, K.W.F. y Gelo, K.K. 2003. Intensive groundwater use in urban areas: the case of megacities. *Intensive Use of Groundwater* (Ed. Llamas y Custodio). Balkema, Lisse: 35-58.
- Iglesias, J.A., Sánchez, E., López-Camacho, B., Muñoz, A., Cabrera, E. y Pérez Martínez, J.M. 2001. El uso conjunto en el abastecimiento de agua a Madrid: recarga artificial. *Hidropres*, Madrid, 31: 20-30.
- Krause, S. y Schöler, H.F. 2000. The behaviour of N-(phenylsulfonyl)-glycine and phenacetin in a municipal sewage treatment plant: a case study. *Chemosphere*, 40: 375-381.
- Lawrence, A.R. y Cheney, C. 1996. Urban groundwater. *Urban Geoscience* (Ed. McCall, de Moulder, Merker). Balkema, Rotterdam: 61-80.
- Lerner, D.N. 1986. Leaking pipes recharge groundwater. *Ground Water*. 24: 654-662.
- Lerner, D.N. 2002. Identifying and quantifying urban recharge: a review. *Hydrogeology Journal*, 10 (1): 143-152.
- Lobo-Guerrero, A. 2003. Effects of aquifer overexploitation on the surface infrastructure in the Bogotá Sabana (Colombia). *RMZ-Materials and Geoenvironment*. Bled-Ljubjana, 50 (1): 193-196.
- López-Camacho, B. y Iglesias, J.A. 2000. Las aguas subterráneas en los abastecimientos: un decenio de experiencias del Canal de Isabel II. *Revista de Obras Públicas*, Madrid, 3403: 41-56.
- Llamas, M.R. y Custodio, E. 2003. *Intensive use of groundwater: challenges and opportunities*. Balkema, Lisse: 1-471.
- Miralles, J.M. y Cantó, J. 1984. Realimentación artificial de los acuíferos subterráneos de los deltas de los ríos Llobregat y Besós. *Tecnología del Agua*. Barcelona, 14: 46-56.
- Morris, B.L., Seddique, A.A. y Ahmed, K.M. 2003. Response of the Dupi Tila aquifer to intensive pumping in Dhaka, Bangladesh. *Hydrogeology Journal*, 11: 496-503.
- Olsthoorn, T.N. y Mosch, M.J.M. 2002. Fifty years artificial recharge in the Amsterdam dune area. *Management of Aquifer Recharge for Sustainability*. (P. Dillon, Ed.). Balkema, Lisse: 29-33.
- Ondiviela, M., Vázquez-Suñé, E. y Carrera, J. 2004. Evaluación de los efectos del cese de la extracción de agua subterránea en una zona urbana: caso de Sant Adrià de Besós (Barcelona). *El Agua y la Ciudad Sostenible: Hidrogeología Urbana*. AIH-GE. IGME, Madrid, Serie H y AS, 11: 159-168.
- Poland, J.F. y Davis, G.H. 1969. Land subsidence due to the withdrawal of fluids. *Reviews in Engineering Geology. Geological Society of America*, 11: 187-230.
- Rivett, M.O., Lerner, D.N., Lloyd, J.W. y Clark, L. 1990. Organic contamination of the Birmingham aquifer, UK. *Journal of Hydrology*, 113: 307-323.
- Shahin, M. 1990. Impacts of urbanization of the Greater Cairo area on the groundwater in the underlying aquifer. *Intern. Assoc. Hydrol. Sci. Publ.* 198: 243-249.
- Tsuschihashi, R., Asano, T.I. y Sakaji, R.H. 2002. Health aspects of groundwater recharge with reclaimed water. *Management of Aquifer Recharge for Sustainability*. (P. Dillon, Ed.). Balkema, Lisse: 11-20.
- Vázquez-Suñé, E. 2003. *Urban groundwater: Barcelona case study*. Doctoral thesis, Technical University of Catalonia, Barcelona.
- Yang, Y., Lerner, D.N., Barret, M.H. y Tellam, J.H. 1999. Quantification of groundwater recharge in the city of Nottingham, UK. *Environmental Geology*, 38 (3): 183-198.

Recibido: junio 2004

Aceptado: agosto 2004