

IMPACTO DE LA URBANIZACIÓN EN UN ACUÍFERO DEL PIEDEMONTE ANDINO SOBRE LOS FLUJOS BASES DE UNA CUENCA PERI-URBANA

P. Sanzana^{1,2,3}, J. Gironás^{1,2,4}, I. Braud³, N. Hitschfeld⁵, X. Vargas⁵,
S. Vicuña^{1,6} y J-F. Muñoz¹

¹DIHA-UC, ²CEDEUS, ³IRSTEA, ⁴CIGIDEN, ⁵DCC- UCH, ⁶Centro Cambio Global-UC
E-mail: psanzana@uc.cl, jgironas@uc.cl, isabelle.braud@irstea.fr, nancy@dcc.uchile.cl, xvargas@ing.uchile.cl, svicuna@uc.cl, jfmunoz@uc.cl

Introducción

Actualmente más de la mitad de la población mundial habita en zonas urbanas, y se espera que dentro de 30 años más aumente a 66% (UN, 2014). En el caso de Latinoamérica y Chile la relación es más dramática, ya que en el mismo horizonte de tiempo se espera que la población concentrada en ciudades aumente a un 84% y 93% (UN, 2014), respectivamente.

El impacto del desarrollo urbano en niveles de agua subterránea no es un problema fácil de comprender. El efecto de la urbanización no siempre es claro y depende de múltiples factores tales como la geología y las técnicas de manejo de aguas lluvias. Acuíferos con napas someras pueden tener una respuesta inesperada, y están influenciadas fuertemente por la tasa de extracción local de aguas subterráneas (Barron et al., 2013). Mucho estudios han reportado incremento en la recarga de aguas subterráneas debido a la urbanización, especialmente en zonas con clima semiárido (García-Fresca y Sharp, 2005; Sharp, 2010).

La modelación hidrogeológica de zonas urbanas es un desafío debido a la cantidad de incertezas relacionadas con recargas puntuales y difusas (García-Fresca y Sharp, 2005). Sin embargo, existen amplias posibilidades para aplicar modelos numéricos que permitan abordar esta problemática.

El principal objetivo de este estudio es cuantificar el impacto del desarrollo urbano en el ciclo hidrológico completo, no tan solo centrado en el efecto de caudales altos, sino también en la cuantificación del efecto del flujo base en cauces urbanos. El caso de estudio corresponde a un acuífero de cabecera ubicado en el Mapocho Alto (Santiago, Chile) con una alta demanda de consumo urbano ($\uparrow 650$ l/h/d). Este acuífero se denomina acuífero La Dehesa, y es parte de la cuenca Estero Las Hualtatas.

Zona de estudio

La zona del piedemonte andino de la ciudad de Santiago (Chile) (Fig.1.a, b) se desarrolla entre los 800 y 1.000 msnm en poco más de 7.600 ha al interior de la cuenca del Río Maipo (Fig.1.c).

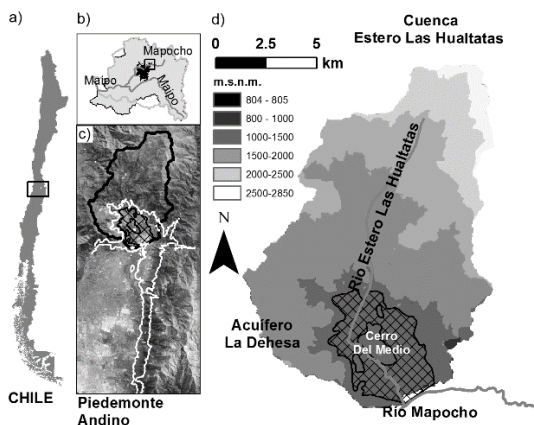


Figura 1.- Piedemonte andino (a,b), Cuenca Mapocho (b) and Estero Las Hualtatas (c,d). Bandas de elevación y acuífero La Dehesa (d).

La interacción entre la cordillera y la llanura aluvial ocurre a través de un conjunto de cauces fluviales y conos sedimentarios que dan origen al piedemonte andino (Romero y Vásquez 2005; Hernández et al., 2016). La cuenca tiene como punto de desembocadura la junta del Estero las Hualtatas con el Río Mapocho y drena un área de 136 km² con variaciones de alturas que van desde 785 hasta los 2.882 msnm aproximadamente.

El acuífero de La Dehesa se ubica en la zona baja de la Cuenca Estero Las Hualtatas (Fig.1.d) y se desarrolla en la depresión de un valle rodeado por montañas de alta pendiente. El acuífero (Fig.2) se encuentra limitado por afloramientos del basamento rocoso en la zona norte, este y oeste, mientras que en el sur, en la desembocadura del Estero Las Hualtatas con el río Mapocho, se une con el acuífero del Mapocho Alto (Fig.1.d, elaborada a partir de Muñoz et al (2003) y PRC-Lo Barnechea (lobarnechea.cl/plan_regulador)).

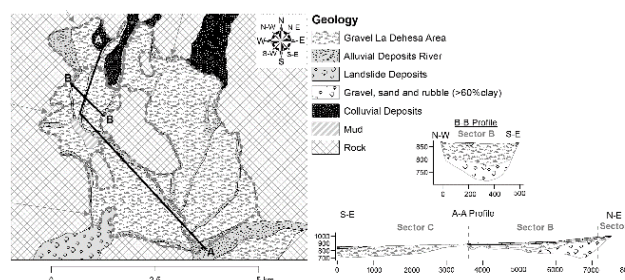


Figura 2.- Acuífero La Dehesa.

Modelo WEAP-MODFLOW integrado

Los modelos utilizados fueron WEAP (weap21.org) y MODFLOW (water.usgs.gov), modelos numéricos ampliamente utilizados para estudios de flujos superficiales y subterráneos. Ambos modelos se acoplaron gracias a una interface interna de WEAP que permite el intercambio de flujos en cada paso de tiempo. En la Figura 3.a se muestra la separación de bandas de elevación usadas en WEAP, mientras que en la Figura 3.b se muestran las condiciones de borde para el modelo MODFLOW, que considera contornos impermeables, ríos, pozos, y drenes.

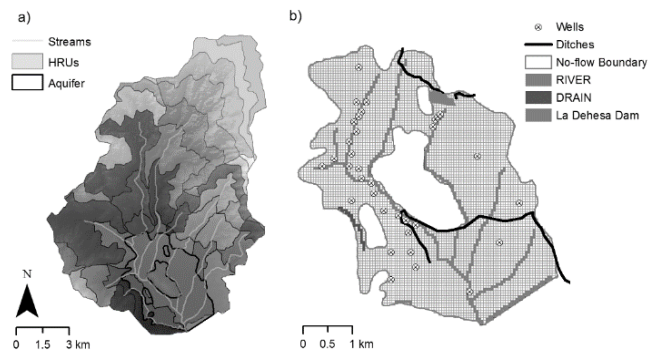


Figura 3.- HRUs del modelo superficial y condiciones de borde del modelo subterráneo.

El modelo fue aplicado en el periodo de tiempo entre 1990-2016 debido a la confiabilidad y disponibilidad de información de niveles y extracción de aguas subterráneas. Lamentablemente no existe una estación fluviométrica de control en la salida de la cuenca, por lo que solo fue posible comparar los resultados obtenidos con la serie de caudales simulados por otros proyectos desarrollados en la zona de estudio (CCG-UC, 2016) y la producción específica registrada por cuencas vecinas.

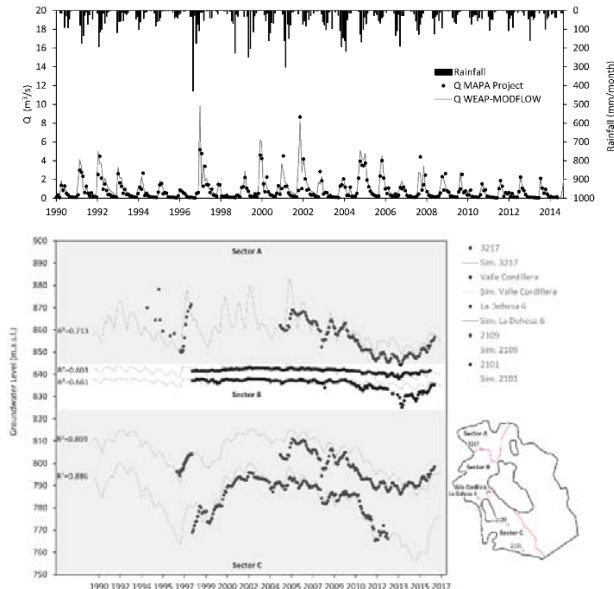


Figura 4.- Series simuladas y observadas de caudal y niveles subterráneo.

En general, el modelo es capaz de representar tendencias de disminución y recuperación coherente con los niveles observados en pozos de monitoreo: sequía del periodo 1995-1997 y sequía del periodo 2010-2015. Los coeficientes de ajuste presentan valores satisfactorios ($R^2 > 0.603$). Además, el comportamiento de los diferentes sectores queda bien representado. El Sector A corresponde a una zona altamente influenciada por el ingreso de la recarga lateral (especialmente el ingreso de la recarga lateral proveniente del Estero Las Hualtatas), por lo que presenta variaciones interanuales directamente relacionadas con la hidrología de las cuencas de alta montaña. El Sector B, que corresponde al sector Los Trapenses, presenta un comportamiento amortiguado debido a la alta capacidad de almacenamiento en la zona. El Sector C, aguas abajo del sector con alta capacidad de almacenamiento, recibe los rebases del Sector B, la recarga lateral y gran parte de la recarga por infiltración asociada al riego urbano.

Evaluación de diferentes escenarios

Para cuantificar los efectos del crecimiento urbano y las tasas de riego urbano, se consideraron dos escenarios para la evaluación en un horizonte de período de 20 años. En ambos escenarios se realizaron los siguientes supuestos: el uso de la tierra ocupada por el área urbana varía entre 84% (situación actual) a 95% (situación estimada a futuro), el consumo de agua aumenta en un factor de $1,6 \times$ (demanda actual), las forzantes climáticas corresponden a repetir las series de precipitación y temperatura en los últimos veinte años. Los escenarios quedan definidos como:

Escenario I: Escenario con crecimiento de la demanda y tecnologías de riego ineficiente (actual).

Escenario II: Escenario con riego sustentable (técnicas altamente eficientes y uso de vegetación nativa) considerando un riego del 10% de las tasas de riego actuales (técnicas sustentables).

En la Tabla 1 se muestran los resultados asociados al flujo medio y flujo base del estero al evaluar los dos escenarios descritos anteriormente.

Tabla 1.- Variación de caudal en la salida del Estero Las Hualtatas.

P _{Exc.}	Q _{Scenario I}	Q _{Scenario II}
Q _{50%}	0.408	0.389
Q _{95%}	0.043	0.022

Comentarios y conclusiones

En el presente trabajo se construyó un modelo hidrogeológico acoplado superficial/subterráneo de la cuenca peri-urbana del Estero Las Hualtatas y el Acuífero La Dehesa con una alta demanda de consumo urbano ($\uparrow 650$ l/h/d). La serie de caudales del modelo se comparó con caudales superficiales medios que estimada por CCG-UC (2016). La comparación de los caudales medios mensuales resultó satisfactoria ($R^2 = 0.760$) con una leve diferencia en los caudales bajos asociados a los flujos base del Estero Las Hualtatas. Por último, el modelo también se validó con registros mensuales de niveles freáticos observados en la zona, dando cuenta de un buen comportamiento del modelo respecto a los niveles observados (con un R^2 entre 0.603 y 0.883).

La dinámica entre los flujos superficiales y las recargas por riego dan cuenta de una interacción directa entre los distintos componentes del balance hídrico y el comportamiento de riego adoptado en la zona de estudio. Se observa que el caudal medio (Q_{50%}) disminuye desde 408 l/s a 389 l/s, mientras que los caudales bajos (Q_{95%}) disminuyen desde 43 l/s a 22 l/s al suponer aumento del 90% en la eficiencia del riego. En cuanto a los niveles subterráneos se observa que para la situación de aumento futuro del consumo urbano, sin introducir tecnologías de riego, el nivel freático de la napa se mantiene en promedio estable al compararlo con el nivel actual.

Agradecimientos

Proyecto MAPA (IDRC 107081-001), ECOS-CONICYT C14U02 y fondos proporcionados por IRSTEALYON, así como la participación por CEDEUS (FONDAP 15110020).

Referencias

- Barron, O.V., Barr, A.D. y Donn, M.J., (2013). Effect of urbanisation on the water balance of a catchment with shallow groundwater. *Journal of Hydrology*, 485(Supplement C): 162-176.
- CCG-UC. (2016). Maipo Adaptation Plan (MAPA). Project developed by Pontifical Catholic University of Chile (PUC) with funding from Canadian's IDRC (N° IDRC 107081-001).
- García-Fresca, B., y Sharp, J.M., (2005). Hydrogeologic consideration of urban development: Urban-induced recharge, in Ehler, J., Haneberg, W.C., and Larson, R.A., eds., *Humans as Geologic Agents: Boulder, Colorado*, geological Society of America Reviews in Engineering Geology, v. XVI, p. 123-136.
- Hernández, J.H., Acuña, M.P., y Magni, C.R., (2016). El piedemonte de Santiago y sus servicios ecosistémicos. Editorial Maval SPA. ISBN 978-956-362-452-6, pp 96.
- Muñoz, J.F., Fernández, B. y Escarriaza, C., (2003). Evaluation of groundwater availability and sustainable extraction rate for the Upper Santiago Valley Aquifer, Chile. *Hydrogeology Journal*, 11(6), 687-700.
- Sharp, J.M., (2010). The impacts of urbanization on groundwater systems and recharge. *Aqua Mundi*, 1, 51-56.
- Romero, H., y Vásquez, A., (2005). Evaluación ambiental del proceso de urbanización de las cuencas del piedemonte andino de Santiago de Chile [Environmental Evaluation of the urban growth in the Andean piedmont catchments of Santiago de Chile]. *EURE*, 31(94), 97-117.
- United Nations, (2014). World urbanization prospects: The 2014 revision, highlights. Department of Economic and Social Affairs, in Population Division, United Nations.