

## ¿CUÁNTA AGUA PUEDE SER BOMBEADA DE UN ACUÍFERO SIN QUE ÉSTE DEJE DE SER SOSTENIBLE?

Víctor M. Ponce<sup>1</sup>, Janaína A. Silva<sup>1</sup> y Jorge Prieto Villarroya<sup>2</sup>

<sup>1</sup> San Diego State University, Estados Unidos de America.

<sup>2</sup> Universidad Nacional de Santiago del Estero, Argentina.

E-mail: poncevm@gmail.com, janainaehd@gmail.com, jorgeprietovillarroya@yahoo.com.ar

### Introducción

La pregunta de cuánta agua puede ser bombeada de un acuífero sin que éste deje de ser sostenible no tiene una respuesta clara. En principio, la decisión parece estar relacionada con hidrogeología. Un examen cuidadoso, sin embargo, revela una serie de otras preocupaciones, entre las cuales algunos de las más importantes son: ¿Cómo afecta esta decisión a la vegetación superficial? ¿Cómo afecta la relación entre el agua superficial y el agua subterránea? ¿Cómo afecta los derechos de agua establecidos? ¿Cómo afecta el hundimiento del terreno y la intrusión de agua salina en las zonas costeras?

En las últimas dos décadas, se ha demostrado ampliamente que la sostenibilidad de un acuífero tiene poco que ver con sus propiedades hidrogeológicas (Alley et al., 1999). La atención se centra ahora en la preservación de los ecosistemas y los derechos de agua establecidos. Este cambio de paradigma se debe al hecho de que las aguas subterráneas no son un volumen a extraer, sino más bien un flujo a reconocer.

### Flujo de aguas subterráneas explicado

El flujo de agua subterránea es extremadamente complejo, variando en el espacio (en tres dimensiones) y el tiempo (a través de varias escalas). En este artículo nos enfocamos principalmente en acuíferos no confinados, predominantemente aluviales de tamaño local o regional, como una primera aproximación al análisis.

Toda el agua subterránea está en constante movimiento desde una zona de mayor potencial a una zona de menor potencial, siendo el océano más cercano el destino final de toda el agua subterránea. Sin embargo, dependiendo de la geomorfología del terreno, el agua subterránea podría eventualmente exfiltrar a los humedales y cuerpos de agua permanentes, o aparecer como el flujo base de los ríos.

Un volumen de control definido arbitrariamente tendrá: (1) flujo de entrada (recarga), (2) flujo de salida (descarga) y (3) volumen almacenado de agua subterránea (agua que llena el suelo o los huecos entre rocas). El bombeo constituye una demanda externa, y su descarga se origina en cualquiera o en todos los tres componentes antes mencionados. Bajo esta óptica, tres escenarios son posibles (Figura 1):

1. Un sistema prístino, en su condición natural, en equilibrio dinámico, en ausencia de bombeo;
2. Un sistema desarrollado, donde la cantidad de bombeo es igual al aumento en la recarga (recarga capturada) más la disminución en la descarga (descarga capturada).
3. Un sistema agotado, o abatido, donde una fracción adicional de la descarga bombeada se está extrayendo realmente del volumen almacenado. En este caso, se produce el agotamiento del acuífero, con el tamaño del cono de depresión aumentando progresivamente en el tiempo.

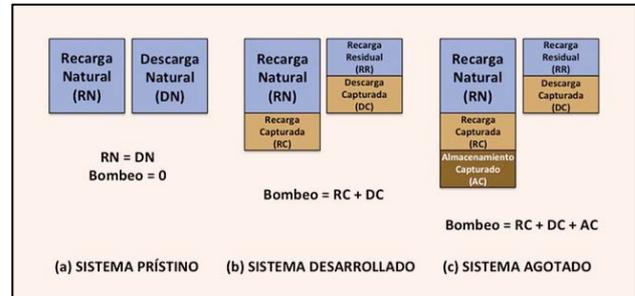


Figura 1.- Sistemas de agua subterránea prístinos, desarrollados y agotados.

En un sistema típico de aguas subterráneas, la recarga consiste en todo el flujo que ingrese al volumen de control. Esto comprende:

1. La recarga casi horizontal natural, de equilibrio o prístina, que ingresa a lo largo del límite aguas arriba en ausencia de bombeo;
2. La recarga casi horizontal capturada, impermanente o inducida, que ingresa a través del límite aguas arriba en presencia de bombeo;
3. La descarga casi horizontal capturada, es decir, la que se convierte en recarga como resultado directo del bombeo; y
4. La recarga vertical, definida como la fracción de precipitación que alcanza el límite superior del volumen de control (es decir, el nivel freático) dentro del marco temporal de análisis.

La descarga del volumen de control consiste en:

1. La descarga casi horizontal natural, en ausencia de bombeo; o la descarga casi horizontal residual, en presencia de bombeo, que sale a lo largo del límite aguas abajo (Fig. 2); y
2. La percolación profunda, es decir, la fracción de precipitación que deja el volumen de control como una descarga vertical neta (flujo positivo) en su parte inferior, uniéndose a aguas subterráneas más profundas.

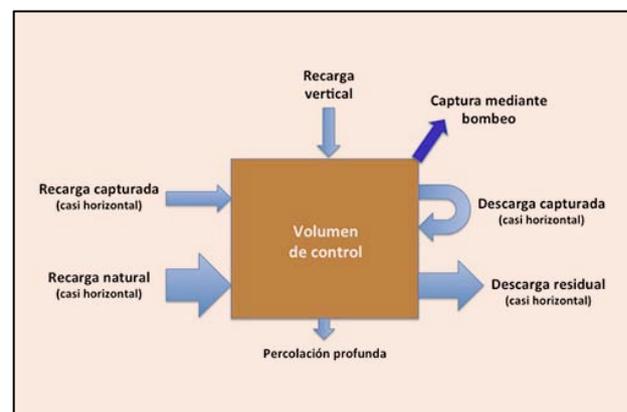


Figura 2.- Entradas y salidas en el volumen de control de un acuífero.

## Uso sostenible de aguas subterráneas

El tema central de la sostenibilidad es determinar cuánta agua se puede extraer de un acuífero sin que éste deje de ser sostenible (Alley et al., 1999). En el caso típico, la reposición del acuífero es lenta, demorando décadas, si no cientos o miles de años. Por lo tanto, se deduce que el bombeo excesivo de aguas subterráneas puede conducir al agotamiento y la consecuente falta de sostenibilidad. Un acuífero agotado o abatido es aquél que no puede recuperarse lo suficientemente rápido como para seguir siendo útil; por lo tanto, es insostenible.

¿Cuánta debe ser la descarga residual cuando se evalúa el rendimiento sostenible? En los casos en los que la descarga capturada debe minimizarse debido a la existencia de derechos de terceros aguas abajo (manantiales, humedales y/o flujo de base), se deduce que muy poco o nada de la recarga casi horizontal podría capturarse sin comprometer los derechos de terceros. Bajo condiciones de no equilibrio, el bombeo del 100% de la recarga natural teóricamente podría resultar en la captura de hasta el 50% de la descarga natural (Fig. 2). En el límite asintótico, es decir, en condiciones de quasi equilibrio, casi cualquier cantidad de captura provendría de la descarga y podría comprometer derechos adquiridos aguas abajo.

Esta imagen un poco sombría mejora cuando se reconoce que la descarga vertical, es decir, la fracción de precipitación local que logra alcanzar el nivel freático, no se incluye específicamente en la determinación de la recarga (casi horizontal). Por lo tanto, una resolución del conflicto de derechos entre las aguas superficiales y subterráneas podría ser la captura de una fracción o la totalidad de la recarga vertical. Este cambio de captura casi horizontal a vertical se basa en el hecho de que la recarga casi horizontal es de alcance regional o mayor, mientras que la recarga vertical es esencialmente local. Bajo esta óptica espacial, toda recarga vertical podría estar sujeta a captura. Además, al basar la determinación del rendimiento sostenible únicamente en la recarga vertical probablemente disminuya el argumento de que la captura mediante bombeo podría afectar negativamente a los ecosistemas y aguas superficiales vecinas.

## El equilibrio hidrológico cibernético

Con el fin de cuantificar adecuadamente la recarga vertical y, por lo tanto, poder manejar el rendimiento sostenible del agua subterránea, recurrimos al equilibrio o balance hidrológico cibernético, el cual es más adecuado para la hidrología de rendimiento que el balance convencional (L'vovich, 1979; Ponce, 2018).

En el enfoque cibernético del equilibrio hidrológico, la precipitación anual se separa en dos componentes:

$$P = S + W \quad [1]$$

en donde S = escurrimiento superficial, es decir, la fracción de escurrimiento que se origina en la superficie terrestre, y W = humedecimiento de la cuenca, o simplemente, humedecimiento, la fracción de precipitación que no contribuye a la escorrentía superficial.

A su vez, la humectación se divide en dos componentes:

$$W = U + V \quad [2]$$

en donde U = caudal base, es decir, la fracción de humectación que se filtra como el flujo de corrientes y ríos en seco, y V = vaporización, es decir, la fracción de humectación regresa a la atmósfera como vapor de agua.

Escorrentía (es decir, escorrentía total) es la suma de la escorrentía superficial y el caudal base:

$$R = S + U \quad [3]$$

Combinando las Ecs. 1 a 3:

$$P = R + V \quad [4]$$

Las Ecuaciones 1 a 4 constituyen un conjunto de ecuaciones de balance hídrico. Se puede definir el coeficiente de recarga del agua subterránea:

$$K_g = \frac{U}{P} \quad [5]$$

## Estudio de caso

La metodología descrita en este artículo es aplicada a los datos de la cuenca del río Sarada, aguas arriba de Anakapalli, en Andhra Pradesh, India. La cuenca está situada entre los Ghats orientales y la costa oriental de la India, y presenta un clima subhúmedo, con un área de drenaje de 1.980 km<sup>2</sup>.

Se analizan once (11) años de datos de precipitación-escorrentía. Los datos de precipitación consisten en hietogramas de lluvia diaria y los datos de escorrentía consisten en el hidrograma medido en la boca, o salida, de la cuenca. Los hietogramas anuales se usan para calcular la precipitación anual P (mm). Cada hidrograma anual se integra para obtener la escorrentía R (mm). La escorrentía superficial S (mm) se obtiene por separación del hidrograma utilizando principios establecidos.

## Resumen y conclusiones

Los conceptos de rendimiento seguro y rendimiento sostenible del agua subterránea se analizan y comparan en el contexto de un equilibrio o balance hidrológico. Todos los flujos de recarga y descarga son debidamente contabilizados. Como el agua subterránea es un flujo, no un volumen, el aprovechar la recarga natural casi horizontal puede comprometer los derechos de otros usuarios en las cercanías, incluidos los ecosistemas naturales, humedales, cuerpos de agua, y el flujo base de los ríos. Aquí argumentamos que la recarga vertical, es decir, la recarga que se origina en la precipitación local, es la única recarga que puede ser aprovechada libremente en la captura de aguas subterráneas si se quiere evitar comprometer los derechos de terceros.

## Referencias

- Alley, W. M., T. E. Reilly, y O. E. Franke (1999). Sustainability of groundwater resources. *U.S. Geological Survey Circular 1186*, Denver, Colorado, 79 p.
- L'vovich, M. I. (1979). World water resources and their future. Translation from Russian by Raymond L. Nace, *American Geophysical Union*.
- Ponce, V. M. (2007). Sustainable yield of groundwater. *Online article*.
- Ponce, V. M. (2018). Why is the cybernetic hydrologic balance better suited for yield hydrology than the conventional approach? *Online article*.