

# Gestión Sustentable del Agua Subterránea

## Conceptos y Herramientas

Serie de Notas Informativas Nota 2

### Caracterización de Sistemas de Agua Subterránea

#### conceptos clave e ideas erróneas frecuentes

2002-2005

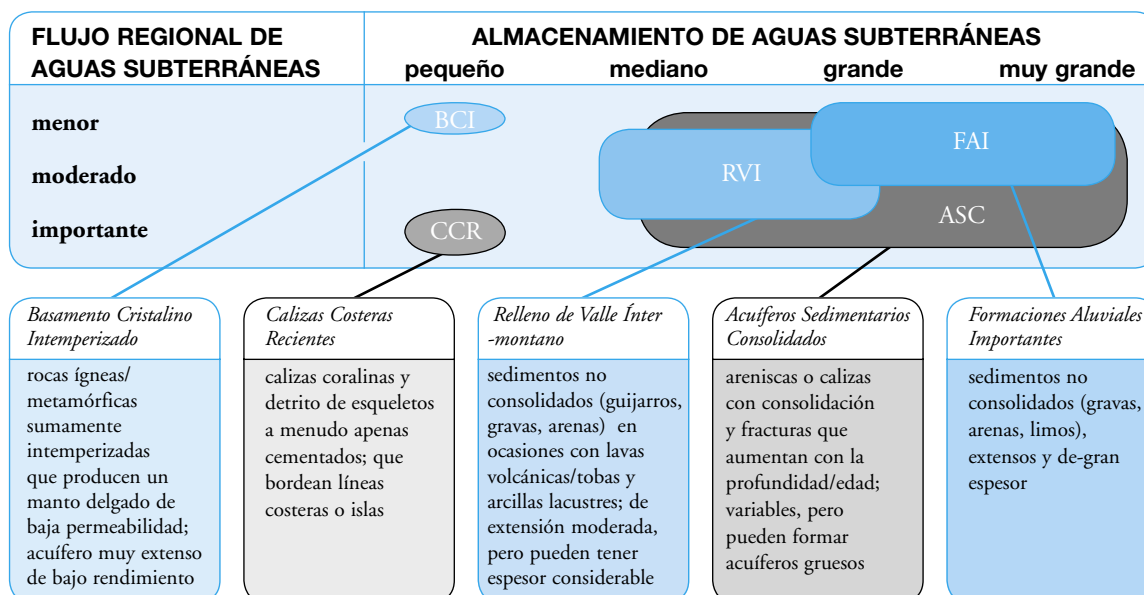
**Autores** (Grupo Base del GW•MATE)

Stephen Foster<sup>1</sup> Albert Tuinhof<sup>2</sup> Karin Kemper Héctor Garduño Marcella Nanni  
(<sup>1</sup>autor líder <sup>2</sup>autor de apoyo principal)

#### ¿En qué varía un acuífero de otro?

- Un acuífero es una formación geológica capaz de suministrar agua subterránea útil a pozos y manantiales. Todos los acuíferos tienen dos características fundamentales: capacidad de almacenar agua subterránea y capacidad de permitir el flujo del agua subterránea. Pero el grado en que se presentan estas propiedades varía mucho de una formación geológica a otra (Figura 1) y su magnitud puede variar con la estructura geológica, de unos cuantos km<sup>2</sup> a muchos miles de km<sup>2</sup>.
- Los elementos más importantes de la diversidad hidrogeológica (Figura 1) son:
  - gran variación de la capacidad de almacenamiento de la unidad acuífera (almacenaje), entre sedimentos granulares no consolidados y rocas fracturadas muy consolidadas
  - gran variación del espesor saturado del acuífero entre diferentes tipos de depósitos, lo que da como resultado un amplio rango de potencial de flujo de agua subterránea (transmisibilidad).

Figura 1: Resumen de propiedades clave de los tipos de acuíferos más comunes



### ¿Cómo fluye el agua subterránea?

- El vasto almacenamiento de muchos sistemas de agua subterránea (mucho mayor que el de los embalses más grandes hechos por el hombre) es su característica más distintiva. Como consecuencia, la mayor parte del agua subterránea está en movimiento lento continuo (Figura 2) desde áreas de recarga natural (producto de la precipitación que excede los requerimientos de las plantas) hacia las áreas de descarga de los acuíferos (como manantiales e infiltración hacia cursos de agua, humedales y zonas costeras).

**MITO**

'el agua subterránea normalmente fluye en ríos subterráneos'

**REALIDAD**

esto es excepcional, restringido a ciertas calizas y otras rocas con cavernas de disolución, y el flujo por lo general se da en una miríada de poros o fracturas interconectadas

- El almacenamiento de un acuífero transforma regímenes de recarga natural muy variables en regímenes de descarga natural más estables. También da como resultado tiempos de residencia de agua subterránea que por lo general se calculan en décadas o siglos (Figura 2) y en ocasiones incluso en milenios, con grandes volúmenes de la llamada 'agua subterránea fósil' (reliquia de episodios pasados de clima diferente) que aún permanecen almacenados.
- En sitios en los que los acuíferos se encuentran bajo estratos mucho menos permeables, las capas suprayacentes de estos últimos confinan (en diverso grado) las aguas subterráneas de los acuíferos. Esto da como resultado cierto grado de aislamiento de la superficie del terreno inmediatamente suprayacente, pero no del sistema de agua subterránea en general. El abatimiento del manto freático inducido por el bombeo de la sección confinada de un acuífero a menudo se propaga rápidamente a la sección no confinada. En diversos escenarios hidrogeológicos, se pueden superponer capas de acuíferos no profundos no confinados y profundos confinados (Figura 2) con infiltraciones hacia abajo y hacia arriba entre capas, según las condiciones locales.

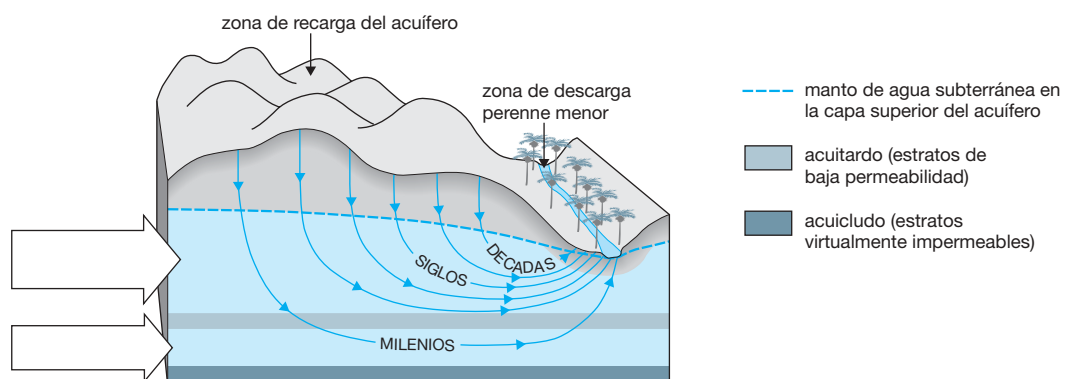
**MITO**

'se pueden explotar nuevos recursos de agua subterránea al perforar pozos más profundos'

**REALIDAD**

se pueden encontrar formaciones de agua dulce más profundas, pero la extracción de este recurso frecuentemente da como resultado una infiltración inducida de los acuíferos suprayacentes y no la intercepción de un flujo importante de agua subterránea profundo e independiente

**Figura 2: Régimen de flujo subterráneo y tiempos de residencia típicos de acuíferos importantes en condiciones climáticas semiáridas**

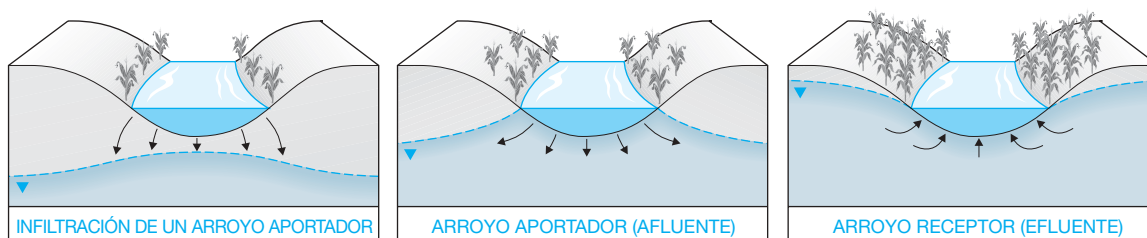


### ¿Cuál es la relación entre agua subterránea y agua superficial?

- Diagnosticar la relación entre el agua superficial con un acuífero subyacente es un componente importante de la caracterización de sistemas de agua subterránea. Es importante distinguir entre:
  - arroyos y ríos de los que depende un acuífero como fuentes significativas de su recarga total
  - ríos que a su vez dependen significativamente de la descarga de un acuífero para mantener su flujo en estiaje

Las relaciones más comunes se presentan en la Figura 3, aunque se debe resaltar que en algunos casos los ríos pueden fluctuar, según la estación, entre dos de las condiciones descritas.

**Figura 3: Espectro de posibles relaciones entre cursos de agua superficiales y sistemas subyacentes de agua subterránea**



### ¿Por qué es importante estimar la reposición de un acuífero?

- El conocimiento de las tasas contemporáneas de recarga de los acuíferos es fundamental para la sustentabilidad del aprovechamiento de los recursos de agua subterránea. Además, es esencial para la gestión integrada de los recursos hídricos comprender los mecanismos de recarga de los acuíferos y su interacción con el uso del suelo.
  - No obstante, la cuantificación de la recarga natural está sujeta a dificultades metodológicas, deficiencias de datos e incertidumbres resultantes significativas debido a:
    - la gran variabilidad espacial y temporal de los eventos de precipitación y escurrimiento
    - la importante variación horizontal de los perfiles del suelo y de las condiciones hidrogeológicas.
- Sin embargo, para efectos prácticos, es suficiente hacer estimaciones y afinarlas posteriormente por medio del monitoreo y el análisis de la respuesta de los acuíferos a la extracción a mediano plazo.

#### MITO

'las tasas promedio de recarga de los acuíferos son constantes'

#### REALIDAD

*este paradigma aceptado comúnmente puede ser falso y llevar a una seria 'doble contabilización de recursos' en las regiones más áridas – las tasas de recarga varían con la derivación o el control del caudal del río, modificaciones a la irrigación con agua superficial, cambios en la vegetación natural o tipo de cultivos en las zonas de recarga, reducción de las fugas de redes urbanas de abastecimiento de agua y de la filtración de aguas residuales in-situ, descenso del manto freático, etc.*

- Se pueden hacer las siguientes observaciones genéricas sobre los procesos de recarga de los acuíferos:
  - las áreas con aridez creciente tienen una tasa más baja y menos frecuente de flujo descendente hacia el manto freático y, por lo general, la recarga por precipitación directa se vuelve progresivamente menos importante que la recarga indirecta por escurrimiento superficial y la recarga artificial incidental que proviene de la actividad humana
  - las estimaciones del componente directo de recarga por precipitación casi siempre resultan más confiables que las del componente indirecto de recarga por escurrimiento.

### ¿Cómo se puede definir el ‘rendimiento seguro’ de un acuífero?

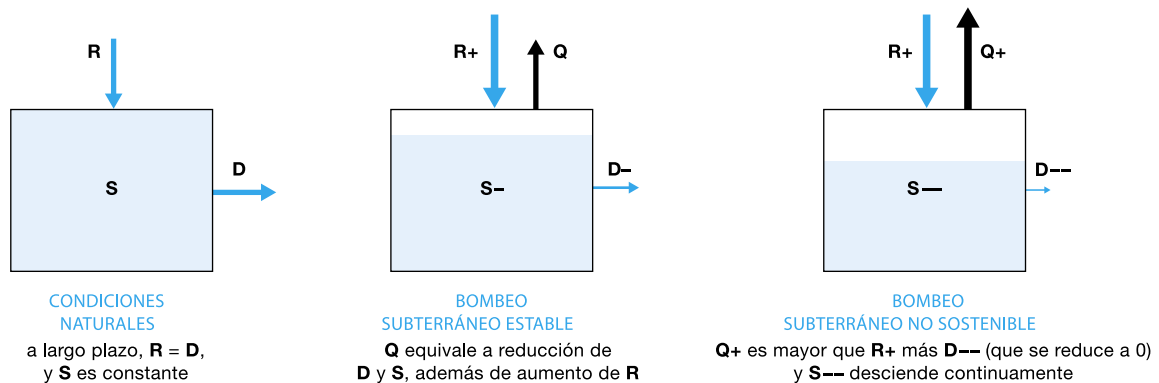
- Todo el flujo de agua subterránea tiene que descargar en alguna parte, y la extracción reducirá estas descargas, pero la fuente del agua subterránea que se bombea puede ser compleja (Figura 4). El llamado ‘rendimiento seguro’ está claramente acotado por la tasa promedio de recarga actual a largo plazo de los acuíferos, aunque también debe considerarse:
  - juicios de valor sobre la importancia de mantener (por lo menos una proporción de) algunas de las descargas naturales del sistema acuífero
  - el uso consuntivo y la exportación a otras cuencas, a diferencia de usos locales no consuntivos que generan un efluente a nivel local.

**MITO** → ‘la tasa promedio de recarga de un acuífero puede tomarse como su rendimiento seguro’

**REALIDAD** → esta ‘fantasía algo persistente’ no considera la necesidad de mantener la descarga o el nivel de agua de los acuíferos en beneficio de otros usuarios de agua, ecosistemas acuáticos/terrestres y/o la prevención de intrusión salina costera, y la expresión ‘rendimiento seguro’ a menudo se interpreta demasiado simplistamente

- Sin embargo, se necesita definir las tasas máximas tolerables de extracción, por lo que la evaluación de recursos debe distinguir entre:
  - descarga a sistemas de agua dulce requerida para sustentar el suministro de agua o los ecosistemas fluviales aguas abajo
  - descarga por medio de vegetación natural, que incluye la que sustenta humedales de agua dulce y lagunas de agua salobre con valor ecológico y/o económico
  - descarga a zonas salinas, que incluyen aguas costeras, lagos salados y suelos endurecidos a causa de evaporación directa
 y tener en cuenta aquellas partes de estas descargas que es necesario conservar.

**Figura 4: Efectos conceptuales de la extracción en el balance de los recursos de agua subterránea**



### ¿Cuándo se puede decir que un acuífero está ‘sobreexplotado’?

- El término ‘sobreexplotación de acuíferos’ es una expresión emotiva que no representa una definición científica rigurosa, pero también es un término que los gerentes de recursos hídricos deben seguir usando, pues es ampliamente conocido a nivel público y político. Algunos consideran que un acuífero está sobreexplotado cuando sus niveles de agua subterránea muestran pruebas de descenso ‘continuo a largo plazo’

**MITO**

**'los niveles descendentes de agua subterránea siempre implican sobreexplotación de un acuífero'**

**REALIDAD**

*toda explotación de agua subterránea implica abatimiento de los niveles, y este proceso puede tener una demora de muchos años antes de que se establezca un equilibrio en acuíferos grandes de baja transmisibilidad/almacenaje—lo cual en algunos casos podría malinterpretarse como niveles de agua subterránea en continuo descenso*

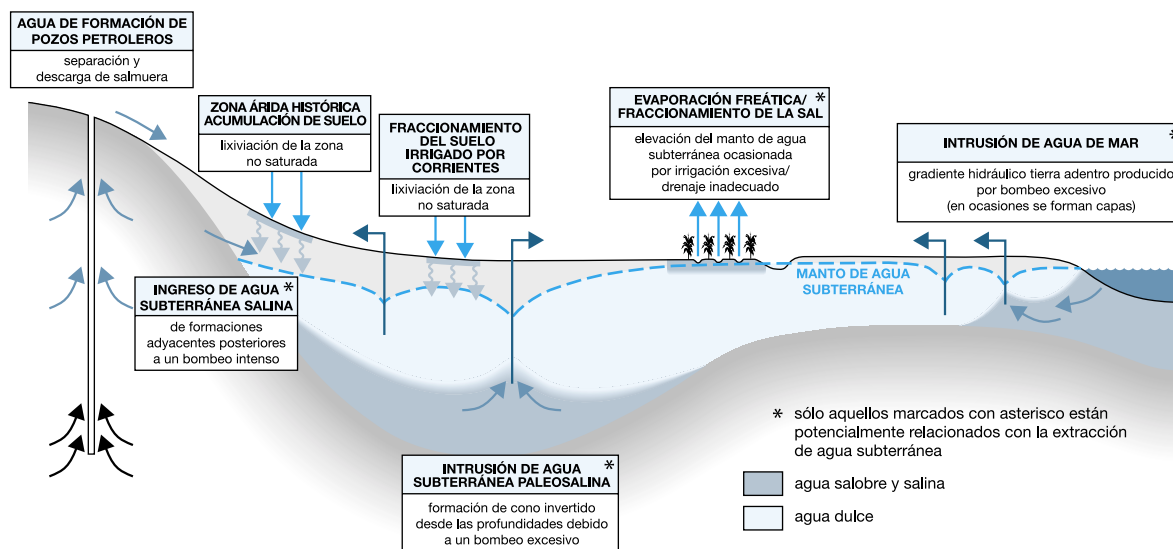
- Otra interpretación de la sobreexplotación es que la tasa media de recarga de agua subterránea a largo plazo es menor que la extracción. Incluso esta definición puede no resultar viable porque:
  - existe el problema de especificar en qué periodo y en qué área se debe evaluar el equilibrio de agua subterránea, sobre todo en climas más áridos donde ocurren episodios importantes de recarga una vez en décadas y en los que los efectos del bombeo también pueden estar distribuidos de manera muy irregular
  - hay incertidumbre sobre los mecanismos y las tasas de recarga de los acuíferos, como resultado de la complejidad hidrogeológica y datos de campo inadecuados
  - pueden presentarse variaciones temporales importantes en los componentes de recarga de los acuíferos, como las asociadas con mantos freáticos descendentes, tendencias climáticas a largo plazo y actividades humanas.
- En la práctica, cuando se habla de sobreexplotación de un acuífero, invariablemente nos preocupan mucho más las consecuencias de la extracción intensa de agua subterránea (Figura 4) que el valor de la extracción. Por ende, una definición económica sea quizá la más apropiada: existe sobreexplotación cuando el **'costo general de los impactos negativos de la explotación de agua subterránea rebasan los beneficios netos del uso del agua subterránea'**, pero por supuesto puede resultar igualmente difícil predecir y calcular el costo de dichos impactos.
- Es importante resaltar que, en este contexto, algunas de estas consecuencias pueden surgir mucho antes de que la tasa de extracción de agua subterránea exceda la recarga media a largo plazo. Por lo tanto, variará la manera en la que se interprete una situación específica, de acuerdo con el tipo de sistema acuífero de que se trate—es decir, con el volumen de almacenamiento explotable y la susceptibilidad a efectos secundarios irreversibles durante la extracción excesiva a corto plazo.
- Entre los impactos potenciales más críticos de la explotación intensa de acuíferos (Figura 5) se encuentra la salinización del agua subterránea, puesto que cancelará la posibilidad de seguirlos usando para suministro de agua potable y riego agrícola. Sin embargo, es importante diagnosticar la causa de la salinización del agua subterránea, ya que puede ser ocasionada por varios mecanismos (Figura 6), de los cuales sólo algunos están relacionados con el bombeo de los acuíferos.

**Figura 5: Consecuencias de la extracción excesiva de agua subterránea**

INTERFERENCIA REVERSIBLE	DEGRADACIÓN IRREVERSIBLE	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• cargas de bombeo/aumento de costos</li> <li>• reducción del rendimiento del pozo</li> <li>• reducción del flujo de los manantiales y del flujo de base</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• estrés en la vegetación freatofita (tanto natural como agrícola)</li> <li>• compactación de los acuíferos y reducción de la transmisibilidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• intrusión de agua salina</li> <li>• entrada de agua contaminada (de un acuífero colgado o de un río)</li> <li>• asentamiento de suelo e impactos relacionados (compactación de los acuíferos)</li> </ul>



**Figura 6: Posibles orígenes de la salinidad del agua subterránea y mecanismos de salinización de los acuíferos**



- Estrictamente, el agua subterránea nunca es un recurso no renovable, pero tampoco es completamente renovable dentro de un período de explotación dado. Por lo tanto, existen algunas circunstancias en las que la explotación de recursos no renovables de agua subterránea (minado de las reservas de agua subterránea) puede considerarse (o ha ocurrido inesperadamente) y requiere de una evaluación sistemática.

### Lecturas Adicionales

Bredehoeft, J. D. 1997 *Safe Yield and the Water Budget Myth*. Ground Water 35: 929.

Custodio, E. 2000 *The Complex Concept of Overexploited Aquifers* Papeles Proyecto Aguas Subterráneas Serie A: 2 Fundación Marcelino Botín: Santander, Spain.

Foster, S., Chilton, J., Moench, M., Cardy, F. and Schiffler, M. 2000 *Groundwater in Rural Development: Facing the Challenges of Supply and Resource Sustainability*. World Bank Technical Paper 463: Washington D.C., USA.

Foster, S., Lawrence, A. and Morris, B. 1998 *Groundwater in Urban Development: Assessing Management Needs and Formulating Policy Strategies*. World Bank Technical Paper 390: Washington D.C., USA.

Simmers, I., Hendriks, J. M. H., Kruseman, G. P. and Rushton, K. R. 1997 *Recharge of Phreatic Aquifers in Semi-Arid Aquifers*. IAH International Contributions to Hydrogeology 19.

### Publicación

La Serie de Notas Informativas del GW•MATE ha sido publicada por el Banco Mundial, Washington D.C., EEUU. La traducción al español fue realizada por Héctor Garduño. También, está disponible en formato electrónico en la página de Internet del Banco Mundial ([www.worldbank.org/gwmate](http://www.worldbank.org/gwmate)) y la página de Internet de la GWP – Asociación Mundial del Agua ([www.gwpforum.org](http://www.gwpforum.org))

Los resultados, interpretaciones y conclusiones expresados en este documento son responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan los puntos de vista del Directorio Ejecutivo del Banco Mundial ni de los gobiernos en él representados.

### Patrocinio económico



El GW•MATE (Groundwater Management Advisory Team – Equipo Asesor en Gestión de Aguas Subterráneas) es parte del Bank-Netherlands Water Partnership Program (BNWPP) y usa fondos de fideicomiso de los gobiernos holandés y británico.

