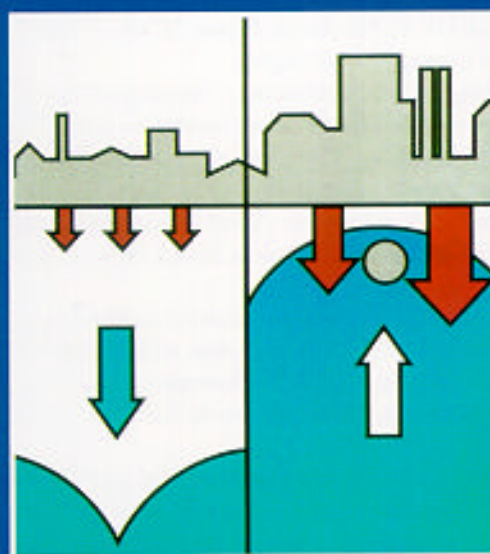




Temas de debate:  
Investigaciones en curso

# Las aguas subterráneas en el desarrollo urbano

*Evaluación de las necesidades de gestión  
y formulación de estrategias*



*Stephen Foster  
Adrian Lawrence  
Brian Morris*

# Las aguas subterráneas en el desarrollo urbano

*Evaluación de las necesidades de gestión  
y formulación de estrategias*

---

*Stephen Foster  
Adrian Lawrence  
Brian Morris*

*Banco Mundial  
Washington, D.C.*

Copyright © 1998  
Banco Internacional de Reconstrucción  
y Fomento /BANCO MUNDIAL  
1818 H Street, N.W.  
Washington, D.C. 20433, EE.UU.

Reservados todos los derechos  
Hecho en los Estados Unidos de América  
Primera impresión en español: Noviembre de 2001  
Primera impresión en inglés: Marzo de 1998

Los documentos técnicos se publican con el objeto de comunicar a la brevedad posible los resultados de los estudios del Banco Mundial a los que se ocupan del desarrollo. En consecuencia, este documento no ha sido preparado de conformidad con los procedimientos apropiados en el caso de los textos impresos oficiales y el Banco no se responsabiliza por los errores que pueda contener. Algunas fuentes citadas en este documento pueden ser trabajos informales que no están disponibles fácilmente.

Los resultados, interpretaciones y conclusiones expresados en este documento pertenecen enteramente al autor o autores y no deben atribuirse en modo alguno al Banco Mundial ni a sus afiliadas, ni tampoco al Directorio Ejecutivo o a los países representados en él. El Banco Mundial no garantiza la exactitud de los datos incluidos en esta publicación y no acepta responsabilidad alguna por las consecuencias que su uso pudiera tener. La delimitación de fronteras, los colores, las denominaciones y cualquier otra información que figura en los mapas contenidos en este trabajo no implica de parte del Grupo del Banco Mundial juicio alguno sobre la condición jurídica de territorio alguno ni aprobación o aceptación de tales fronteras.

El material contenido en esta publicación está protegido por derechos de autor. Las solicitudes de autorización para reproducir partes de la misma deben dirigirse a: Office of the Publisher, en la dirección que aparece arriba. El Banco Mundial alienta la difusión de su trabajo; en general, dará su autorización prontamente y, cuando la reproducción no sea para fines comerciales, sin cobrar cargo alguno. La autorización para reproducir partes del texto con fines didácticos se otorga a través del Copyright Clearance Center, Inc., Suite 910, 222 Rosewood Drive, Danvers, Massachusetts 01923, EE.UU.

El diseño de la cubierta se ha usado con el permiso del British Geological Survey.

En la fecha en que se publicó la primera versión en inglés, Stephen Foster era director adjunto del British Geological Survey, profesor visitante de hidrogeología y contaminantes de la Universidad de Londres y presidente de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos: Comisión Burdon sobre Países en Desarrollo. A partir de septiembre de 2000, es director del GW-MATE, un grupo interdisciplinario patrocinado por el Banco Mundial y la Asociación Mundial para el Agua, con objeto de desarrollar la capacidad en la gestión y protección de la calidad del agua subterránea. Adrian Lawrence y Brian Morris son hidrogeólogos principales del British Geological Survey, Nottingham.

# Índice

Prefacio.....	v
Agradecimientos.....	vii
Sinopsis .....	ix
Resumen.....	xi
1. Interdependencia de las aguas subterráneas y la urbanización.....	1
Aspectos subsuperficiales del desarrollo urbano.....	1
Etapas y modalidades de la evolución urbana .....	3
Procesos interrelacionados y conflictivos .....	5
Las aguas subterráneas urbanas en el contexto hidrogeológico general .....	7
2. Análisis de los procesos hidrogeológicos en las zonas urbanas .....	11
Influencias de las ciudades en la recarga y la calidad de las aguas subterráneas .....	11
Efectos de la extracción no controlada de aguas subterráneas .....	21
3. Cuestiones relacionadas con la gestión de las aguas subterráneas urbanas .....	27
Análisis desde diferentes perspectivas .....	27
Evolución de los problemas.....	30
Causas subyacentes de los problemas de gestión .....	34
4. Mejora de la gestión de los recursos de agua subterránea .....	39
Marco institucional y dimensiones sociales .....	39
Objetivos y metas de la gestión técnica .....	40
Logro de los objetivos de gestión.....	40
El camino futuro: Realismo político y medidas prácticas .....	52
Referencias y bibliografía .....	55
Glosario sobre aguas subterráneas español-inglés .....	57
<b>Recuadros</b>	
1.1 Ocurrencia de aguas subterráneas .....	9
1.2 Sistemas de flujo de aguas subterráneas .....	10
2.1 Contaminación de las aguas subterráneas urbanas por infiltraciones de los canales—Hat Yai (Tailandia) .....	15
2.2 Contaminación de las aguas subterráneas por agentes patógenos—Mérida (México).....	19
2.3 Infiltración descendente de la contaminación inducida por el bombeo—Santa Cruz (Bolivia).....	20
3.1 Separación del abastecimiento de agua y la disposición de aguas servidas en acuíferos vulnerables—Mérida (México).....	29
3.2 Deterioro de la calidad de las aguas subterráneas profundas inducida por la contaminación—Hat Yai (Tailandia) .....	32
3.3 Reutilización de las aguas servidas industriales para el riego: Problemas y posibles soluciones—León (Guanajuato, México).....	33
3.4 El problema de la extracción privada no reglamentada—Bangkok (Tailandia).....	35
3.5 Amenaza a largo plazo de la calidad de las aguas subterráneas planteada por el saneamiento <i>in situ</i> en un medio urbano de zona árida—Sana (Yemen).....	38

4.1 Reducción de la extracción de agua subterránea urbana en una economía dirigida para controlar los asentamientos del terreno—Tianjin (China).....	42
4.2 Uso conjunto de los recursos de agua superficial y subterránea: Más que la suma de las partes.....	45
4.3 Instrumentos económicos y de reglamentación para reducir la extracción de agua subterránea—Yakarta (Indonesia).....	47
4.4 Relación complementaria entre la extracción pública y privada de aguas subterráneas—Santa Cruz (Bolivia).....	48
4.5 Respuesta activa a la extracción excesiva de agua subterránea—Querétaro (México).....	49
4.6 Zonas de protección de las fuentes de agua subterránea periurbanas—Bridgetown (Barbados) .....	54

### Gráficos

1.1 Interacción del abastecimiento con aguas subterráneas y la disposición de aguas servidas en una ciudad situada sobre un acuífero poco profundo .....	1
1.2 Evolución del abastecimiento de agua y la disposición de aguas servidas en una ciudad típica situada sobre un acuífero poco profundo.....	4
1.3 Crecimiento de la población y demanda de agua en la zona metropolitana de la Ciudad de México.....	5
2.1 Flujos hidrológicos equivalentes en tuberías de las zonas urbanas .....	13
2.2 Gama potencial de infiltración subsuperficial causada por la urbanización .....	17
2.3 Procesos que promueven la atenuación de la contaminación en los sistemas de aguas subterráneas.....	22
2.4 Evolución de los problemas de calidad del agua subterránea en un sistema acuífero aluvial costero típico tras una urbanización rápida .....	26
3.1 Interacción entre los servicios e instalaciones urbanos a través del sistema subyacente de aguas subterráneas.....	27
3.2 Evolución urbana desde la perspectiva de los recursos de aguas subterráneas .....	31

### Cuadros

R.1 Ciudades que utilizan aguas subterráneas consideradas en la evaluación de las necesidades de gestión y la formulación de estrategias de política .....	xii
1.1 Aspectos que se deben considerar para lograr equilibrar los beneficios iniciales y los costos a largo plazo en el uso urbano.....	2
1.2 Características de los principales medios hidrogeológicos urbanos .....	7
2.1 Impactos de los procesos urbanos en la infiltración a las aguas subterráneas .....	11
2.2 Fuentes de recarga de los acuíferos en las zonas urbanas y sus consecuencias en la calidad del agua subterránea .....	12
2.3 Clasificación de los problemas de calidad de las aguas subterráneas .....	18
2.4 Medios hidrogeológicos y su vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas .....	23
2.5 Resumen de las actividades que podrían generar cargas de contaminación subsuperficial .....	24
2.6 Susceptibilidad de los medios hidrogeológicos a efectos secundarios adversos durante la explotación no controlada .....	25
3.1 Problemas de las aguas subterráneas urbanas y requerimientos de gestión .....	36
4.1 Gestión del abastecimiento de agua subterránea: Objetivos, problemas y medidas de mitigación.....	41
4.2 Etapas prácticas para llegar a definir y promover una política de gestión de los recursos de aguas subterráneas en el medio urbano.....	53

## *Prefacio*

La definición de estrategias mejoradas y sostenibles reviste una importancia crucial para la política del Banco en materia de desarrollo y recursos hídricos de las zonas urbanas. Los recursos de agua subterránea situados debajo y en la vecindad de los centros urbanos del mundo en desarrollo son excepcionalmente importantes como fuente de costo relativamente bajo y calidad generalmente alta para el abastecimiento municipal y doméstico. En las estrategias de gestión es preciso reconocer y encarar los vínculos complejos que existen entre los recursos de agua subterránea, los usos urbanos de la tierra y la disposición de los efluentes.

Este trabajo, preparado por funcionarios de nivel superior del British Geological Survey (BGS), es resultado de proyectos de investigación promovidos por el Departamento de Desarrollo Internacional del Reino Unido (antiguamente la Administración de Desarrollo de Ultramar). Estos proyectos, que se concentran en los distintos impactos de la urbanización rápida en las aguas subterráneas, se realizaron en colaboración con los gobiernos de Bolivia, China, México y Tailandia. Se hace en ellos un examen de la situación actual de los recursos de agua subterránea en zonas urbanas del mundo en desarrollo y una evaluación de las necesidades para la gestión de esos recursos, y se indican las primeras medidas que deben adoptarse en la formulación de estrategias.

El público a que está destinado este trabajo incluye los gerentes de nivel superior de los órganos encargados del abastecimiento de agua y del medio ambiente interesados en el desarrollo y la gestión de la infraestructura urbana, especialmente en las ciudades en rápido desarrollo que dependen de las aguas subterráneas, y los funcionarios de los organismos internacionales que prestan asistencia financiera y técnica en esta esfera. Mediante este trabajo se quiere concentrar la atención en los problemas de las aguas subterráneas urbanas. Se espera que sirva como referencia útil para los encargados de adoptar decisiones sobre la infraestructura urbana, y que promueva una gestión y una protección más activas de los recursos de agua subterránea.

Anthony Pellegrini  
Director  
Transporte, Agua y Desarrollo Urbano

John Briscoe  
Asesor Superior, Agua  
Desarrollo Social y Económicamente Sostenible



## *Agradecimientos*

La idea de preparar un documento técnico del Banco Mundial sobre la base de los resultados de los proyectos del Departamento de Desarrollo Internacional del Reino Unido sobre el impacto de la urbanización rápida en las aguas subterráneas partió de Carl Bartone, ingeniero ambiental principal del Departamento de Transporte, Agua y Desarrollo Urbano del Banco Mundial, que coordinó también la preparación de este trabajo.

El Departamento de Desarrollo Internacional financió los trabajos relacionados con la producción del presente trabajo. Se agradece a John Hodges y Alistair Wray, funcionarios de nivel superior de la División de Ingeniería, su apoyo y su interés en la iniciativa, que se encomendó juntamente con el British Geological Survey.

Varias organizaciones nacionales desempeñaron funciones importantes en la obtención de los datos sobre aguas subterráneas urbanas de los casos utilizados para ilustrar este documento. Entre ellas cabe citar la Comisión Nacional del Agua de México; el Ministerio de Salud Pública, División de Salud Ambiental, de Tailandia, y las siguientes empresas de agua potable y alcantarillado y organismos del medio ambiente: los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado de Santa Cruz (SAGUAPAC) de Bolivia, el Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de León (SAPAL) de México y la Oficina de Geología y Recursos Minerales de Tianjin (TBGMR) de China.

Los autores desean agradecer la asistencia de numerosos funcionarios del Banco en la identificación de los problemas, la obtención de datos, los análisis de políticas y la edición, entre ellos John Briscoe, Paula Stone, David Hanrahan, David Grey, Geoffrey Read, Heinz Ungar, Ulrich Koeffner, Larry Simpson, Augusta Dianderas, Awa Busia y Prasad Gopalan. Se recibieron comentarios útiles sobre el manuscrito de Marcus Moench y Henry Salas, y se reconoce el apoyo brindado anteriormente por Richard Helmer, Jefe de Salud Ambiental Urbana de la Organización Mundial de la Salud. Los autores desean también dar las gracias a los siguientes colegas del British Geological Survey por sus aportaciones a este proyecto y a otros proyectos conexos: John Chilton, Brian Adams, Marianne Stuart, Roger Calow y Daren Goody. Gill Tyson preparó todos los gráficos y diseñó los recuadros.

La traducción del presente informe fue realizada por la Unidad de Servicios de Traducción e Interpretación del Banco Mundial, con la asesoría técnica del Sr. Héctor Garduño, Consultor, Groundwater Management Advisory Team (GWMATE). La supervisión de la producción fue realizada por Karin Kemper y Anna Corsi de la Unidad de Recursos Hídricos del Banco Mundial.





## *Sinopsis*

Las aguas subterráneas revisten una importancia fundamental en el suministro a las redes de agua potable, y se explotan intensivamente para usos privados, domésticos e industriales en muchos centros urbanos de los países en desarrollo. Al mismo tiempo, la subsuperficie se ha convertido en receptor de gran parte de las aguas servidas y los desechos sólidos urbanos e industriales. Hay indicios cada vez más generalizados de deterioro de la calidad y la cantidad de las aguas subterráneas, grave o incipiente, causado por la sobreexplotación y/o el control deficiente de la contaminación. La escala y el grado de la degradación varían considerablemente según la susceptibilidad de los acuíferos locales al deterioro relacionado con la explotación y a su vulnerabilidad a la contaminación.

Este trabajo se basa en la investigación o el examen de la situación imperante en un número considerable de ciudades en desarrollo de todo el mundo. Su objetivo es aumentar la conciencia de los encargados de formular políticas sobre los procesos hidrogeológicos en las zonas urbanas, poner de relieve los asuntos clave relativos a las aguas subterráneas en las ciudades, proporcionar un marco para la consideración sistemática de los aspectos relacionados con el agua subterránea en la gestión urbana, y presentar enfoques para una gestión más sostenible de los recursos de agua subterránea en las zonas urbanas.



# Resumen

*Todo lo que cae sobre la Tierra, cae sobre los hijos de la Tierra.  
Si los hombres escupen en el suelo, escupen sobre sí mismos.  
Todas las cosas están conectadas, como la sangre que une a una familia.*

extracto de *El Gran Jefe (Seathle) envía un mensaje  
(a los “jefes blancos” en Washington, D.C.), 1855*

Las aguas subterráneas desempeñan un papel fundamental en la salud económica y social de muchas zonas urbanas del mundo en desarrollo. No hay estadísticas completas sobre la proporción del suministro de agua en las zonas urbanas que se obtiene de aguas subterráneas, pero más de 1.000 millones de habitantes de ciudades en Asia y 150 millones en América Latina dependen tal vez, directa o indirectamente, de manantiales, pozos y norias. Debido a su costo relativamente bajo y a su calidad por lo general alta, el agua subterránea ha sido a menudo la fuente preferida para las redes públicas de abastecimiento de agua potable y se explota ampliamente para usos privados domésticos e industriales.

La urbanización y la industrialización tienen un efecto profundo en los recursos de aguas subterráneas de las zonas urbanas, que están vinculados indisolublemente y de maneras complejas con el uso de la tierra y las prácticas de disposición de efluentes y desechos. El diagnóstico de los problemas de gestión urbana relacionados con el agua subterránea que se presentan en este documento se basa en la evaluación de la situación actual en muchas ciudades de todo el mundo en desarrollo (Cuadro R.1). En el cuadro se indica la importancia del agua subterránea y la gama de problemas que ponen en peligro la sostenibilidad de su uso.

Es preciso mejorar con urgencia la gestión de los recursos de agua subterránea de las zonas urbanas para mitigar el menoscabo real y potencial causado por la sobreexplotación y el control deficiente de la contaminación. Si no se protegen las aguas subterráneas, tanto en términos de cantidad como de calidad, habrá escasez de agua y aumentarán los costos de abastecimiento, con posibles consecuencias para la salud humana. Muchas industrias requieren un abastecimiento de agua de buena calidad y alta confiabilidad; si no existe ese abastecimiento, esas industrias podrían tener que optar por situarse en otros lugares, y se produciría así un estancamiento económico.

Los principales objetivos de este documento de política son los siguientes:

- Poner de relieve los problemas y las necesidades de gestión relacionados con las aguas subterráneas de las zonas urbanas.
- Aumentar la conciencia y la comprensión de los procesos hidrogeológicos en las zonas urbanas.
- Proporcionar un marco para el examen adecuado y sistemático de los aspectos relacionados con las aguas subterráneas en la administración urbana.
- Sugerir opciones de explotación y gestión más sostenibles de las aguas subterráneas en las zonas urbanas.

En el **Capítulo 1** se hace una breve exposición de la importancia y el comportamiento de las aguas subterráneas en términos generales, y de la interdependencia y la interacción estrechas que hay entre la urbanización y las aguas subterráneas en muchas situaciones.

Aunque se trata principalmente de un documento de política, en el **Capítulo 2** se incluye una cantidad considerable de información técnica a fin de permitir a los no especialistas comprender el comportamiento de los sistemas de aguas subterráneas en las zonas urbanas, en razón de que:

**Cuadro R.1:** Ciudades que utilizan aguas subterráneas consideradas en la evaluación de las necesidades de gestión y la formulación de estrategias de política

Ciudad	País	Situación de la información	Papel del agua subterránea	Problemas del agua subterránea	Ciudad	País	Situación de la información	Papel del agua subterránea	Problemas del agua subterránea
América Latina									
Buenos Aires	Argentina	3	menor*	cont urb	Dhaka	Bangladesh	2	única*	nfd
Mar del Plata	Argentina	2	import	int sal	Beijing	China	3	menor*	cont urb
Salta	Argentina	3	import	cont urb	Shenyang	China	2	import*	nfd, cont a-a
Santa Cruz	Bolivia	1	única*	cont urb	Jinzhou	China	2	import	cont a-a
Cochabamba	Bolivia	3	import*	nfd	Tianjin	China	1	import	asen
Santiago	Chile	2	menor	cont urb, cont a-a	Shijiazhuang	China	3	import	cont urb, cont a-a
Cali	Colombia	3	menor*	cont urb	Lucknow	India	3	import*	cont urb
San José	Costa Rica	1	import	cont a-a	Nagpur	India	3	import*	cont urb
Ciudad de Guatemala	Guatemala	2	import	cont a-a	Yakarta	Indonesia	3	menor*	int sal
San Pedro Sula	Honduras	2	import*	cont urb	Bandung	Indonesia	2	import*	cont urb
Ciudad de México	México	2	import	asen	Semarang	Indonesia	2	menor*	nfd, cont urb
Leon-Guanajuato	México	1	import*	cont a-a	Surakarta	Indonesia	3	import*	cont urb
Chihuahua	México	2	única	nfd, cont a-a	Manila	Filipinas	2	menor*	int sal
Querétaro	México	2	import	asen, cont urb	Cebu City	Filipinas	3	import*	int sal, cont urb
Merida	México	1	import*	cont urb	Jaffna	Sri Lanka	1	única*	int sal, cont urb
Managua	Nicaragua	2	import	cont urb	Bangkok	Tailandia	2	import*	int sal, cont urb, asen
Lima	Perú	2	import	nfd	Hat Yai	Tailandia	1	menor*	int sal, cont urb
Ica	Perú	3	única*	cont urb	Hanoi	Viet Nam	3	import*	cont urb
El Tigre	Venezuela	2	única	cont urb	Sana	Yemen	2	import	nfd, cont urb
Cuenca del Caribe									
Nassau	Bahamas	2	import*	int sal, cont urb	Abidján	Côte d'Ivoire	3	menor*	cont urb
Bridgetown	Barbados	1	única	cont urb	El Cairo	Egipto	3	menor	cont urb
Bermuda	Bermuda	1	import	cont urb	Dakar	Senegal	3	menor*	cont urb
Santo Domingo	República Dominicana	2	única*	int sal, cont urb	Lusaka	Zambia	3	import*	nfd, cont urb

\* Uso privado doméstico/industrial importante.  
 cont a-a Contaminación subterránea aguas abajo.  
 nfd Nivel freático descendente.  
 import Fuente importante de abastecimiento público.  
 menor Fuente de menor importancia de abastecimiento público.  
 única Fuente única de abastecimiento público.

Intrusión salina en el acuífero.  
 Asentamiento del terreno.  
 Contaminación de las aguas subterráneas en la zona urbana.  
 Datos de estudios completos.  
 Documento sumario útil.  
 Información general solamente.

- Los que se ocupan del abastecimiento de agua y de la gestión ambiental en las zonas urbanas tienen a menudo una comprensión deficiente de las aguas subterráneas.
- Para ser eficaces, los controles reglamentarios y los instrumentos económicos deben basarse en un marco hidrogeológico sólido (de modo que actúen con la naturaleza y no en contra de ella).

La urbanización tiene un impacto importante en la recarga de los acuíferos situados bajo las ciudades y en el flujo de esas aguas dentro de los acuíferos. Esto es resultado de una combinación de factores tales como:

- La importación de grandes cantidades de agua.
- La modificación del drenaje pluvial.
- El uso extenso del suelo para la descarga de efluentes y la disposición de desechos.
- La extracción de grandes volúmenes de agua subterránea para el abastecimiento de agua.

Entre las consecuencias de esto están el agotamiento del acuífero, la intrusión salina y el asentamiento del terreno.

Además, en la mayoría de las ciudades en desarrollo, el crecimiento demográfico precede al desarrollo de la infraestructura para la disposición de las aguas servidas. Esto tiende a producir una contaminación generalizada de las aguas subterráneas poco profundas con efluentes domésticos e industriales. Dada la gran capacidad de almacenamiento de la mayoría de los acuíferos y los períodos prolongados de residencia de las aguas subterráneas en ellos, suele pasar mucho tiempo antes de que los problemas de contaminación de las aguas subterráneas se hagan evidentes. El resultado neto es una escasez creciente de agua y un aumento de los costos marginales a largo plazo para el abastecimiento de agua. El uso tradicional de aguas subterráneas de bajo costo con un tratamiento mínimo para el suministro público de agua en las zonas urbanas se ve amenazado, y en algunos medios hidrogeológicos están aumentando los peligros para la salud.

En consecuencia, los responsables de la gestión de las aguas subterráneas deben ser conscientes de las causas de la degradación de los acuíferos, de las variaciones de los medios hidrogeológicos con respecto a la susceptibilidad a la explotación no controlada y la vulnerabilidad a la contaminación antropogénica, y de las consecuencias a largo plazo para los recursos hídricos.

En el **Capítulo 3** se presentan tres perspectivas algo diferentes sobre el medio subsuperficial de las ciudades, a saber:

- El suministro y la reglamentación del abastecimiento de agua.
- La disposición de las aguas servidas y los desechos sólidos.
- El desarrollo y el mantenimiento de la infraestructura.

Estas tres funciones son muy diferentes y a menudo pueden estar en conflicto. En el capítulo se ilustran esos conflictos utilizando varios ejemplos de todo el mundo.

Para un aprovechamiento sostenible y una gestión eficaz de las aguas subterráneas en las zonas urbanas es preciso conciliar intereses diferentes: la conservación del rendimiento de los pozos, la salvaguardia de la calidad del agua, la disposición eficaz de los desechos sólidos y los efluentes líquidos, y la protección de la infraestructura. Hay varios procesos hidrogeológicos que pueden poner en peligro estos objetivos. Cabe citar en particular los problemas de intrusión de agua salada en los acuíferos, el asentamiento del terreno y la contaminación de las aguas subterráneas, que son resultado de dos procesos básicos:

- La extracción excesiva de recursos de agua subterránea.
- La carga excesiva de contaminantes en el suelo en relación con la capacidad natural de asimilación.

Los especialistas en la materia deberán diagnosticar cada caso individual a fin de identificar zonas prioritarias para la limitación de la extracción de agua y establecer objetivos prioritarios para el control de la carga de contaminantes subsuperficiales.

El **Capítulo 4** se concentra en la formulación de estrategias encaminadas a eliminar o mitigar estos problemas. Se examinan en él las necesidades en términos de un marco institucional apropiado, reconociendo que la aplicación de políticas sostenibles para la asignación y la protección de los recursos de agua subterránea exigirá en muchos casos una conciencia pública y la promoción de un diálogo con los interesados a fin de crear el consenso sociopolítico necesario.

En las medidas de gestión es preciso concentrar la atención en el control de los niveles freáticos y/o la carga de contaminantes en la subsuperficie. Estos objetivos pueden lograrse mediante una gama de medidas, que incluyen tanto los controles reglamentarios como los instrumentos económicos. Sin embargo, el equilibrio óptimo dependerá del medio hidrogeológico de que se trata, del marco institucional imperante y de la necesidad obvia de promover la reglamentación a través del interés propio.

Otro aspecto importante que se destaca es la necesidad de llegar a un equilibrio realista y un control efectivo de la explotación pública y privada de las aguas subterráneas en las zonas urbanas si se quiere evitar consecuencias negativas para todos los usuarios y conservar las aguas subterráneas escasas y de alta calidad para usos potables y sensibles.

Las ciudades evolucionan en el espacio y en el tiempo y cambian en consecuencia las modalidades de uso de las aguas subterráneas, de disposición de desechos y de desarrollo industrial. Así pues, las medidas de gestión deben ser flexibles y deben revisarse periódicamente. Será mucho más fácil controlar las tendencias incipientes relacionadas con el desequilibrio de la recarga de agua subterránea o el exceso de la carga de contaminantes que hacer frente a problemas más maduros. En algunas megaciudades, especialmente en las regiones más áridas, sólo será posible lograr remedios parciales. Las políticas encaminadas a ayudar a las ciudades de tamaño mediano a evitar los problemas que se observan actualmente en algunas megaciudades tal vez deban ser la primera prioridad.

Se prevé la preparación de un volumen para acompañar a éste, en el que se proporcionará una guía de las metodologías de evaluación (relativamente) rápida de las aguas subterráneas y de las necesidades de datos (mínimos) conexas. Esas metodologías se concentrarán en la definición de la magnitud y la situación de los recursos de agua subterránea, en la determinación de su susceptibilidad a los efectos secundarios durante la explotación, y en la evaluación de los peligros de contaminación del agua subterránea, la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero y la carga de contaminantes en la subsuperficie.

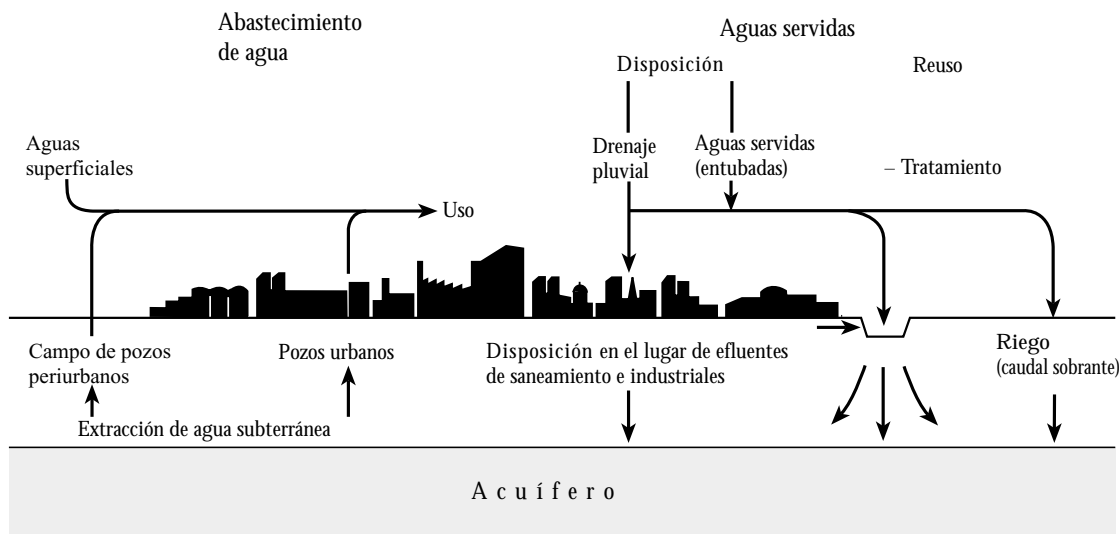
# 1

## INTERDEPENDENCIA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y LA URBANIZACIÓN

### Aspectos subsuperficiales del desarrollo urbano

El suministro de agua, saneamiento y drenaje es un requisito crucial del proceso de urbanización. La subsuperficie desempeña un papel importante para estos tres elementos del desarrollo de la infraestructura y para la disposición de los efluentes industriales y los desechos sólidos (Gráfico 1.1, Cuadro 1.1). Así pues, en el desarrollo de la infraestructura urbana, el medio subsuperficial es una consideración fundamental, y la presencia o la ausencia de un subsuelo permeable y de aguas subterráneas a poca profundidad son factores clave.

*Gráfico 1.1. Interacción del abastecimiento con aguas subterráneas y la disposición de aguas servidas en una ciudad situada sobre un acuífero poco profundo*



### Abastecimiento de agua

Cuando las ciudades están situadas sobre acuíferos productivos, las aguas subterráneas son casi invariablemente el primer recurso hídrico que se utiliza. Esto se debe a que esas aguas:

- Son en general de excelente calidad natural, y permiten así ahorros importantes en los costos de tratamiento, en comparación con una fuente equivalente de agua superficial.



- Son más seguras como fuente de abastecimiento durante períodos de sequía prolongados que la mayor parte de los recursos de agua superficiales.
- Pueden usarse para el abastecimiento público y la utilización privada independientemente, por lo menos durante las primeras etapas de desarrollo.
- Son atractivas en términos de inversiones de capital, porque el desarrollo puede progresar por etapas a medida que aumenta la demanda de agua.

*Cuadro 1.1. Aspectos que se deben considerar para lograr equilibrar los beneficios iniciales y los costos a largo plazo en el uso urbano*

<i>Función de la subsuperficie</i>	<i>Beneficios iniciales</i>	<i>Costos a largo plazo</i>
Fuente de abastecimiento de agua	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajo costo de capital</li> <li>• Posibilidad de desarrollo por etapas</li> <li>• Mejor calidad inicial del agua</li> <li>• Posibilidad de desarrollar por separado el abastecimiento privado y público</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La extracción excesiva puede llevar               <ul style="list-style-type: none"> <li>- al abandono/la reducción de la eficiencia de los pozos</li> <li>- al riesgo de intrusión salina en las ciudades costeras</li> <li>- al riesgo de asentamiento del terreno en medios susceptibles</li> </ul> </li> </ul>
Receptor del saneamiento <i>in situ</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Posibilidad de construcción por la comunidad de instalaciones de bajo costo</li> <li>• Posibilidad de expansión rápida en condiciones sanitarias</li> <li>• Uso de la capacidad natural de atenuación del subsuelo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La sostenibilidad de la extracción de aguas subterráneas se ve amenazada si la carga de contaminantes excede la capacidad de asimilación del acuífero</li> </ul>
Receptor del drenaje pluvial	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajo costo de capital</li> <li>• Conservación de los recursos hídricos</li> <li>• Menor riesgo de inundaciones aguas abajo a lo largo de los cursos de agua</li> <li>• La escorrentía de los techos diluye los contaminantes urbanos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contaminación procedente de zonas industriales/comerciales y carreteras principales</li> </ul>
Eliminación de efluentes industriales y desechos sólidos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gastos de manufactura reducidos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los efluentes nocivos pueden perjudicar la calidad de las aguas subterráneas</li> <li>• El sistema favorece una actitud irresponsable hacia la gestión del flujo de desechos</li> </ul>

La mayoría de los acuíferos urbanos se explotan mediante pozos cavados a mano o perforados. Los pozos cavados a mano tienen generalmente menos de 20 metros de profundidad y diámetros de un metro o más. El agua se extrae mediante bombas pequeñas o a mano. Los pozos perforados mecánicamente suelen tener un diámetro menor que los cavados, pero mucha mayor profundidad (entre 20 y 200 metros, o más). Los pozos perforados están revestidos de acero, plástico o fibra de vidrio, y el agua se extrae con bombas eléctricas o de diesel. Es posible que se necesiten secciones de rejilla para apoyar y retener estratos no consolidados y permitir al mismo tiempo la entrada de aguas subterráneas de horizontes permeables, pero en algunos acuíferos bien consolidados el recubrimiento es innecesario.

### *Medidas de saneamiento*

El subsuelo desempeña también un papel crucial en la disposición de las aguas servidas de las ciudades a causa del uso muy difundido del saneamiento sin alcantarillado. Debido a su costo elevado, la instalación de redes de alcantarillado va invariablemente a la zaga del crecimiento demográfico y de la instalación de redes primarias para el abastecimiento de agua potable. La disposición de las aguas servidas en el lugar (mediante tanques sépticos, pozos negros o letrinas de pozo) en los asentamientos de gran densidad puede ser semipermanente, especialmente en los distritos de bajos ingresos donde las autoridades municipales tienen dificultades para proporcionar un servicio operacional.

### *Drenaje pluvial*

Si bien la urbanización lleva siempre a la impermeabilización de la superficie, el efecto neto sobre un sistema subyacente de aguas subterráneas depende de los arreglos de desagüe pluvial que acompañan la construcción. Las condiciones del suelo y el régimen de lluvias ejercen a su vez una influencia importante en la necesidad (y el tamaño) de los desagües pluviales para eliminar el exceso de agua de la superficie. Cuando la capacidad de infiltración del subsuelo es adecuada, el suelo es el receptor más económico de los escurrimientos urbanos, y se evita así la necesidad de medidas de drenaje superficial costosas.

### *Descarga de efluentes industriales*

La capa subsuperficial es con frecuencia un receptor importante de efluentes industriales, ya sea directamente a través de la disposición casual en el suelo o indirectamente como resultado de las infiltraciones de lagunas de tratamiento o de cursos de agua o canales superficiales. Gran parte de la expansión industrial que sostiene el crecimiento urbano depende implícitamente del subsuelo para la disposición de los productos secundarios indeseables. Otro factor son los derramamientos y/o las fugas de hidrocarburos y productos químicos líquidos almacenados en tanques en sitios industriales y por todas partes en las zonas urbanas, que se infiltran al suelo.

### *Disposición de los desechos sólidos*

Como parte del proceso de urbanización, las autoridades municipales y las entidades privadas organizan en algún momento la recolección de los desechos sólidos. En la mayor parte de los casos su disposición se hace mediante rellenos sanitarios o vertederos a cielo abierto que, si no se controlan, generan lixiviaciones que se infiltran en el terreno y pueden tener un impacto grave en el abastecimiento de agua subterránea en el ámbito local.

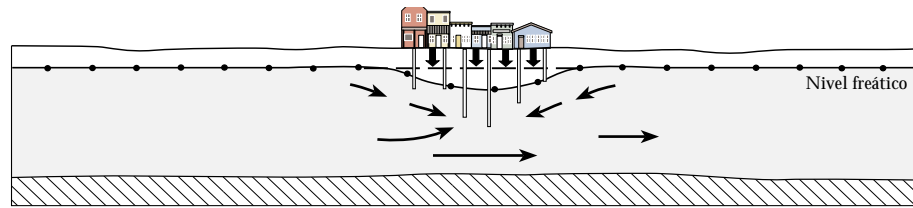
## **Etapas y modalidades de la evolución urbana**

Todas las ciudades evolucionan a partir de asentamientos pequeños (Gráfico 1.2). En las economías industrializadas, esta evolución se produjo normalmente en el curso de siglos, pero en los países en desarrollo, donde está ocurriendo la mayor parte del crecimiento demográfico del mundo, las tasas de crecimiento urbano no tienen parangón en la historia humana. Entre 1800 y 1910, la población del Gran Londres creció de 1,1 millones a 7,3 millones de habitantes; sin embargo, algunas ciudades de América Latina y de Asia han tenido tasas de crecimiento similares en unas pocas décadas (Gráfico 1.3).

Una característica común de muchas ciudades en desarrollo ha sido el surgimiento de asentamientos informales situados en tierras marginales o en distritos periurbanos en rápida expansión. La proporción de pobres urbanos en esos asentamientos equivale típicamente a entre el 30% y el 60% de la población urbana total, y las estimaciones indican que para el año 2000 más de 1.000 millones de personas vivirán en ese tipo de asentamiento. Si se pretende que las ciudades proporcionen un suministro adecuado de agua, servicios de saneamiento, alcantarillado y disposición de desechos a sus residentes, las autoridades municipales deben evaluar críticamente la forma de utilizar el subsuelo de manera más sostenible, porque esas comunidades dependen cada vez más de él, tanto para el abastecimiento de agua como para la disposición de desechos.

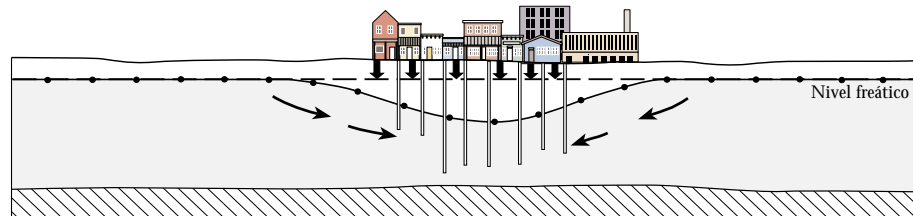
Los efectos del abastecimiento de agua y la disposición de las aguas servidas en las zonas urbanas no se limitan a la superficie geográfica que ocupa la propia ciudad. Esto se debe a que las ciudades, especialmente las que están con rapidez, están estrechamente vinculadas con sus tierras circundantes. Por ejemplo, a medida que las ciudades crecen, el agua que se obtenía originalmente de acuíferos poco profundos puede resultar insuficiente, ya sea porque los recursos disponibles son demasiado limitados o porque la contaminación ha hecho que el acuífero se deteriorara. Los recursos hídricos adicionales necesarios pueden obtener-

Gráfico 1.2 Evolución del abastecimiento de agua y la disposición de aguas servidas en una ciudad típica situada sobre un acuífero poco profundo



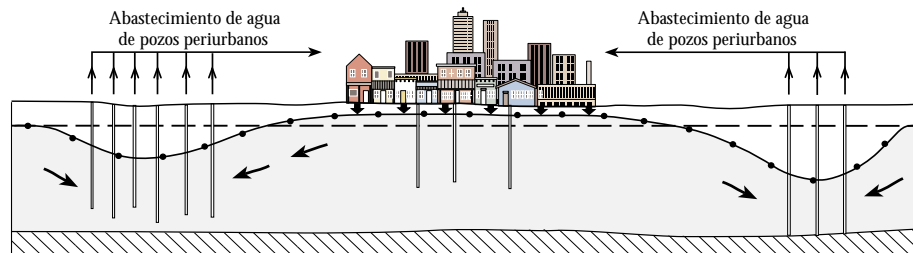
a) Primeros asentamientos

- El agua se obtiene de pozos poco profundos.
- Las aguas servidas se descargan en el suelo.
- El drenaje pluvial va al suelo o a un curso de agua.



b) La población se convierte en ciudad

- Caer el nivel freático bajo la ciudad y los pozos se profundizan.
- Las aguas servidas se descargan en el suelo.
- Se contaminan las aguas subterráneas poco profundas en el centro de la ciudad.
- Puede haber asentamiento del terreno si el acuífero es no consolidado e interestratificado.
- Ampliación del drenaje pluvial al suelo y los cursos de agua locales.



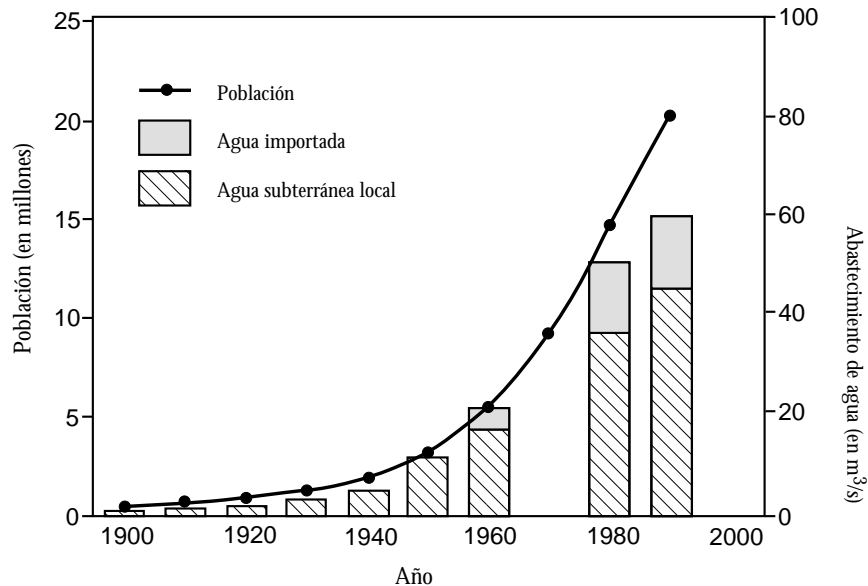
c) La ciudad crece

- El acuífero situado bajo la ciudad se abandona en su mayor parte a causa de la contaminación.
- El nivel freático empieza a subir bajo la ciudad debido al cese del bombeo y al alto nivel de recarga urbana.
- Caer significativamente el nivel freático en la periferia urbana debido a la extracción considerable de los pozos cercanos.
- Contaminación incipiente de los pozos urbanos por la recarga de las aguas subterráneas bajo el centro de la ciudad.



d) La ciudad se extiende más

- Los pozos no pueden hacer frente a la demanda creciente y se ven amenazados por el crecimiento hacia afuera de la ciudad.
- Es preciso importar agua costosa de fuentes distantes, o recurrir al uso conjunto de agua superficial y subterránea.
- Sube el nivel freático bajo el núcleo de la ciudad—problemas de inundación, disposición de aguas servidas, etc.
- Reducción de las posibilidades de drenaje pluvial (de bajo costo) hacia el suelo.

**Gráfico 1.3.** Crecimiento de la población y demanda de agua en la zona metropolitana de la Ciudad de México

Fuente: Mazari y Mackay (1993).

se de acuíferos más profundos o, más frecuentemente, pueden extraerse de acuíferos o cuerpos de agua superficiales en las zonas circundantes (Gráfico 1.2), invariablemente situados a una distancia y con un costo marginal cada vez mayores. Esos recursos tienen en general un uso anterior que compite con éste, a saber el riego agrícola, y pueden surgir como resultado de ello conflictos graves.

De la misma manera, a medida que las ciudades crecen, pueden absorber sus propios campos de pozos periurbanos (Gráfico 1.2) y la calidad de las aguas subterráneas puede así deteriorarse progresivamente, ya sea a causa de la invasión urbana directa o de la infiltración proveniente de cursos de agua superficiales contaminados en zonas adyacentes situadas aguas abajo. Esa expansión tendrá inevitablemente costos económicos ocultos resultantes de las necesidades crecientes de tratamiento del agua o de la necesidad de recurrir a fuentes de agua nuevas en zonas más distantes.

Cabe señalar también que el papel del subsuelo en la infraestructura de las ciudades depende mucho de la etapa de desarrollo que ha alcanzado la ciudad; sin embargo, esa evolución no guarda necesariamente una correlación con el tamaño.

## Procesos interrelacionados y conflictivos

### *Efectos de la urbanización en los recursos de aguas subterráneas*

Se ha reconocido desde hace mucho que los acuíferos subterráneos pueden ser una fuente conveniente y segura de agua para los habitantes urbanos. Pero se reconoce menos el uso del subsuelo para otros aspectos del desarrollo de la ciudad, como la disposición de aguas servidas. Esas funciones esenciales tienen objetivos diferentes y potencialmente en conflicto, que si no se entienden y se enfrentan de manera integrada pueden dar lugar a problemas graves (Cuadro 1.1).

En la mayoría de los casos, la urbanización afecta los sistemas de aguas subterráneas de las dos maneras siguientes (Gráfico 1.1):

- Modificando radicalmente las modalidades y las tasas de recarga del acuífero.
- Afectando adversamente la calidad de las aguas subterráneas.

El efecto sobre la recarga es resultado de modificaciones en el sistema de infiltración natural, como la impermeabilización de la superficie y los cambios en el drenaje natural, y de la introducción de una red de agua potable, que está invariablemente asociada con grandes volúmenes de pérdida de agua de las tuberías e infiltraciones de las aguas servidas.

El efecto neto de la recarga en la calidad es generalmente adverso. Los procesos de urbanización ocasionan una contaminación grave, pero esencialmente difusa, de las aguas subterráneas con compuestos de nitrógeno y azufre y niveles elevados de salinidad. También suele observarse una contaminación relativamente generalizada de las aguas subterráneas con productos de petróleo, hidrocarburos clorados y otros compuestos sintéticos y en forma más localizada, con bacterias y virus patógenos. Estos efectos adversos perjudican el uso de las aguas subterráneas para el abastecimiento urbano.

#### *Consecuencias de la extracción de las aguas subterráneas*

La extracción de agua subterránea da como resultado una disminución en los niveles de los acuíferos. Cuando la extracción es limitada, los niveles se estabilizan a un nuevo nivel de equilibrio, de manera que la afluencia a las zonas en que se bombean las aguas subterráneas equilibra la extracción. Sin embargo, en los casos en que la extracción de agua subterránea es intensa y concentrada, a tal punto que excede considerablemente las tasas medias de recarga locales, esos niveles pueden seguir bajando durante décadas. Las caídas graves pueden reducir el rendimiento de los pozos, y dar lugar a un ciclo costoso e ineficiente de profundización de los pozos para recuperar productividad, o incluso a la pérdida prematura de las inversiones causada por el abandono de los pozos.

Los cambios importantes en la distribución de la presión hidráulica en los acuíferos pueden llevar a una inversión en la dirección de la corriente de las aguas subterráneas. Esta inversión puede producir un deterioro grave de la calidad del agua como resultado de la intrusión de aguas marinas, la succión o la penetración de otras aguas subterráneas salobres, y la infiltración inducida de agua contaminada de la superficie. Así pues, el agotamiento de los recursos de agua subterránea se complica a menudo a raíz del deterioro importante de la calidad del agua (Cuadro 1.1).

Las ciudades situadas sobre ciertos tipos de acuíferos pueden tener problemas de asentamiento del terreno a causa de la extracción de agua subterránea (Cuadro 1.1). Los asentamientos diferenciales dañan no sólo los edificios y los caminos sino también conductos de servicios subterráneos; aumentan así las fugas de las tuberías de agua y ocurren rupturas en los sistemas de alcantarillado, los oleoductos y los tanques subterráneos. Todo puede causar una contaminación grave de los acuíferos subyacentes.

#### *Impacto de las aguas subterráneas en la infraestructura urbana*

Los cambios radicales en la frecuencia y la tasa de infiltración subterránea causados por la urbanización tienden en general a aumentar el ritmo de recarga de las aguas subterráneas. Si el acuífero subyacente no se utiliza y no es suficientemente permeable para transmitir hacia afuera el agua excedente, subirán los niveles freáticos. A medida que el nivel de agua sube hacia la superficie, los túneles y los ductos de servicio pueden sufrir daños estructurales o inundarse, y puede haber efectos hidráulicos y de corrosión en los cimientos de los edificios y los recubrimientos de los túneles. En casos extremos, el nivel freático llega a la superficie y puede producirse un peligro para la salud a causa del mal funcionamiento de los tanques sépticos y de la posible acumulación de aguas contaminadas en las depresiones de la superficie.

Por el contrario, si la extracción es considerable, puede quedar oculta la existencia de tasas crecientes de infiltración urbana. Sin embargo, a medida que las ciudades evolucionan, es posible que la extracción disminuya, a veces como resultado del deterioro de la calidad del agua y otras veces a consecuencia de factores económicos no relacionados. En esas circunstancias, puede ocurrir que el nivel freático empiece a recuperarse y eventualmente (tras varias décadas) suba a niveles más altos que antes de la urbanización a causa de la recarga urbana adicional (Gráfico 1.2). Esto puede poner en peligro una infraestructura urbana bien establecida. Así pues, el régimen hidrogeológico sigue teniendo un efecto importante en la infraestructura urbana incluso cuando las ciudades han dejado de depender significativamente de las aguas subterráneas para su abastecimiento.

**Cuadro 1.2.** Características de los principales medios hidrogeológicos urbanos

<i>Medio hidrogeológico</i>	<i>Litología</i>	<i>Descripción/génesis</i>	<i>Extensión/dimensión</i>
Sedimentos aluviales y de llanuras costeras importantes	Grava, arena, limo y arcilla	Detritos no consolidados depositados por ríos importantes, deltas y mares poco profundos; porosidad primaria y permeabilidad generalmente alta.	Ambas generalmente amplias y de grosor importante.
Sistemas coluviales entre montañas y sistemas volcánicos	Guijarros, grava, arena y arcilla, a veces entremezclados con lavas y piroclásticos	Formados por el relleno rápido de depresiones y cuencas en regiones montañosas; los depósitos son no consolidados, de porosidad y/o permeabilidad primaria de coluvio, lavas basálticas/andesíticas modernas y piroclastos andesíticos/riolíticos generalmente altos.	Mucho menos extensos que los sedimentos aluviales y de llanuras costeras, pero pueden ser muy gruesos
Acuíferos sedimentarios consolidados	Arenisca	Depósitos marinos o continentales compactados para formar rocas consolidadas; el grado de consolidación generalmente aumenta con la profundidad/la edad de deposición y el aumento de la compactación reduce la porosidad y la permeabilidad primarias; la porosidad secundaria introducida por fracturas de origen tectónico puede constituir un componente muy importante.	Difícil de generalizar, pero pueden formar acuíferos extensos y tener un grosor considerable
	Piedra caliza	Derivada de material de esqueletos (arrecifes, fragmentos de conchas y detritos de arrecifes) depositados en mares poco profundos y compactados para formar rocas consolidadas; las piezas calizas está a menudo fisuradas y pueden crecer por un proceso de solución para formar cavidades bien desarrolladas conocidas como "karst".	Difícil de generalizar, pero pueden formar acuíferos extensos y tener un grosor considerable.
Formaciones calcáreas costeras recientes	Piedra caliza y arenas calcáreas	Compuestas generalmente de piedra caliza de coral y detritos esqueléticos marginales, a menudo cementados muy ligeramente; la porosidad y la permeabilidad pueden ser excepcionalmente altas.	Zona limitada, que forma a menudo acuíferos en franjas que rodean la línea de la costa o forman pequeñas islas oceánicas.
Formaciones glaciales	Peñascos, guijarros, grava, arena, limo y arcilla	Sedimentos transportados por el hielo generalmente no diferenciados y de baja permeabilidad, pero los sedimentos distribuidos por los aluviones fluviales y las aguas de deshielo suelen tener alta porosidad y permeabilidad.	Zona limitada, incluso lineal, y muy variable lateralmente.
Base rocosa erosionada	Rocas cristalinas	La erosión de rocas ígneas o metamórficas produce generalmente una capa muy erosionada de porosidad moderada y permeabilidad generalmente baja, que tiene por debajo roca más nueva que puede estar fracturada; la combinación da como resultado un sistema acuífero de bajo potencial, pero importante.	Muy extensa, pero los acuíferos están normalmente restringidos a los 20 metros superiores.
Depósitos de mesetas de loess	Limos, arenas finas y arcillas arenosas	Depósitos de limo y arena fina generalmente bien distribuidos transportados por el viento, con algunos depósitos de arcilla arenosa de origen fluvial secundario; la baja permeabilidad hace generalmente que la subsuperficie sea más adecuada como receptor que como acuífero.	Muy extensa, aunque los depósitos pueden formar sistemas aislados cortados por barrancos profundos.

### Las aguas subterráneas urbanas en el contexto hidrogeológico general

Aunque existen muchas combinaciones de tipos de acuíferos y regímenes climáticos, pueden condensarse en siete tipos amplios de medios hidrogeológicos en que están situadas más frecuentemente las ciudades que dependen de las

aguas subterráneas (Cuadro 1.2). Cada tipo amplio tiene una importancia diferente para las ciudades situadas sobre ellos y, así pues, los efectos sobre el desarrollo urbano pueden ir de insignificantes a críticos.

El abastecimiento urbano de agua subterránea sólo puede ser posible si las formaciones geológicas tienen una permeabilidad moderada o alta (Recuadro 1.1), un gran volumen de almacenamiento y sistemas de flujo importantes (Recuadro 1.2). Estos acuíferos más permeables pueden agruparse en términos generales en dos tipos, como sigue:

- *Sedimentos no consolidados.* Incluyen los sedimentos aluviales importantes y los sedimentos de llanuras costeras, que suelen contener grandes volúmenes de agua subterránea en almacenamiento y ser suficientemente permeables para permitir una extracción económica. Los depósitos aluviales y coluviales profundos situados en los valles ascendentes entre montañas pueden tener también acuíferos muy productivos.
- *Formaciones consolidadas.* Los acuíferos consolidados más prolíficos son de origen sedimentario e incluyen algunas calizas y areniscas, pero numerosas formaciones volcánicas constituyen también sistemas de acuíferos importantes. Estos acuíferos, especialmente cuando están fracturados, pueden ser muy permeables y capaces de suministrar grandes cantidades de agua. Este grupo incluye también las formaciones calizas costeras recientes. Si bien su extensión más limitada restringe la magnitud total del recurso, la ausencia frecuente de aguas superficiales en las zonas donde existen esas formaciones significa que las aguas subterráneas pueden ser la única fuente de abastecimiento.

Otros medios hidrogeológicos generalmente tienden a ser menos permeables. Sin embargo, pueden utilizarse para el abastecimiento industrial privado y/o doméstico, y sirven frecuentemente como receptores para la disposición de aguas servidas en el lugar.

Un criterio importante para la gestión de las aguas urbanas consiste en diferenciar entre las condiciones en que la subsuperficie es sumamente importante, y aquellas en que es secundaria. Lo primero ocurre cuando el subsuelo y los estratos geológicos subyacentes son suficientemente permeables para aceptar y transmitir agua, ya sea directamente a través de un acuífero no confinado poco profundo, o indirectamente a través de formaciones más profundas semiconfinadas.

Cuando la subsuperficie es relativamente impermeable como ocurre, por ejemplo, en las ciudades situadas directamente sobre una base de rocas cristalinas, las posibilidades de un abastecimiento de agua local serán pocas. Esas bases de roca cristalina no son raras pero, en algunos casos, pueden tener una capa superpuesta de depósitos aluviales u otros depósitos geológicos recientes que proporcionan un subsuelo permeable adecuado para las funciones de abastecimiento de agua y drenaje. Esos medios hidrogeológicos pueden ser importantes para el desarrollo urbano, pero sus acuíferos tienden a ser menos profundos y de menor magnitud; así pues, están más expuestos a los efectos adversos como la sobreexplotación de los recursos o la contaminación antropogénica.

Las ciudades que dependen de las aguas subterráneas están situadas en zonas con regímenes de lluvias muy diferentes, desde zonas áridas tropicales (por ejemplo, Lima (Perú)), a zonas húmedas ecuatoriales (por ejemplo, Abidján (Côte d'Ivoire)). La distribución y la intensidad de las lluvias determina las posibilidades de recarga natural de las aguas subterráneas en la mayoría de las ciudades, pero no en todas. Algunas zonas urbanas áridas que dependen de las aguas subterráneas están situadas cerca de ríos perennes que se originan en montañas vecinas, más húmedas, y que recargan los acuíferos locales naturalmente a través de filtraciones del lecho del río (por ejemplo, Santiago (Chile)). Una recarga pluvial amplia permite la dilución de los contaminantes, de modo que un acuífero situado en una zona húmeda puede soportar una carga de contaminación urbana mayor que su equivalente situado en una región árida.

### Recuadro 1.1. Ocurrencia de aguas subterráneas

Las aguas subterráneas constituyen alrededor del 98% del agua dulce de nuestro planeta, sin incluir el agua de los casquetes polares. Tienen así una importancia fundamental para la vida humana y la actividad económica, y es apropiado hacer aquí una breve introducción de su comportamiento general.

Cuando llueve, una parte del agua caída se infiltra en el suelo. Aunque parte de esa humedad es captada por las plantas, otra parte se infiltra más profundamente, y se acumula eventualmente sobre un lecho impermeable, saturando los espacios porosos del suelo y formando un reservorio subterráneo. Un reservorio subterráneo del que puede extraerse una cantidad significativa de agua se denomina *acuífero*. El suelo por encima del acuífero, a través del cual ha pasado verticalmente el exceso de lluvia, se denomina la *zona vadosa*. El nivel hasta el cual el terreno está totalmente saturado es el nivel freático.

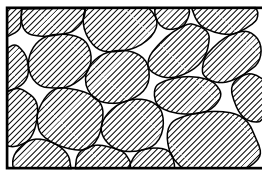
La productividad de un acuífero depende de las características fundamentales de poder almacenar y a la vez transmitir agua. Pero no todos los acuíferos son iguales. Los sedimentos granulares no consolidados a) tales como

las arenas, contienen espacios de poros entre los granos, y su porosidad puede superar el 30%, pero en b) eso se reduce progresivamente con la cementación. Para fines de gestión, es importante tener en cuenta que el volumen total de agua almacenada en todas esas formaciones es generalmente muy grande en comparación con la tasa del caudal a través del sistema.

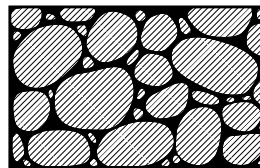
En las rocas muy consolidadas c) sólo se encuentra agua subterránea en las fracturas, y ésta raramente supera el 1% del volumen de la masa rocosa. Sin embargo, en d) en el caso de las calizas, estas fracturas pueden resultar agrandadas por solución para formar fisuras y cavernas. Sin embargo, aun así el almacenamiento total es relativamente pequeño, en comparación con los acuíferos no consolidados, y estos sistemas son más susceptibles al agotamiento debido, por ejemplo, a la sequía. Las rocas consolidadas incluyen sedimentos compactados y cementados (como las areniscas y las calizas), pero otras pueden ser cristalinas. Estas incluyen las lavas y las cenizas volcánicas, que en algunos casos forman sistemas acuíferos muy productivos.

Gráfico R1.1. Textura y porosidad de las rocas que forman el material de los acuíferos típicos

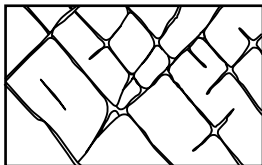
a) Arena bien distribuida con alta porosidad



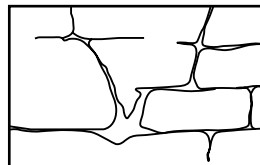
b) Arena bien distribuida pero con porosidad reducida por la cementación subsiguiente



c) Roca consolidada convertida en porosa por fracturación



d) Roca fracturada consolidada con porosidad aumentada por solución





**Recuadro 1.2. Sistemas de flujo de aguas subterráneas**

Toda el agua dulce que se encuentra bajo tierra debe tener una fuente de *recarga*. Esta fuente es generalmente la lluvia, pero puede ser también a veces la filtración de ríos, lagos o canales. El acuífero se llena hasta que el agua llega a la superficie, donde fluye del suelo en forma de manantiales o infiltraciones, creando los caudales del estiaje (o flujos base) de los ríos de tierras bajas. El acuífero se satura así hasta el nivel en que la descarga es igual a la recarga. Desde el punto de vista de la gestión, es preciso tener presente que la mayor parte de la extracción continua de aguas subterráneas, para su consumo o para exportar de la cuenca, tendrá algún impacto en las corrientes fluviales durante el estiaje, y puede también afectar la descarga de manantiales captados y/o los niveles freáticos en los humedales.

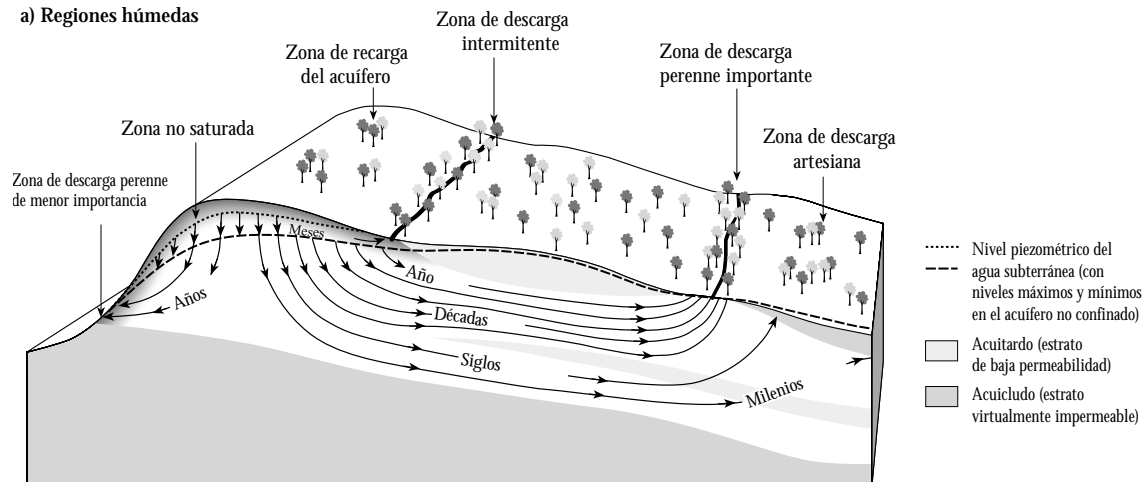
Los sistemas de aguas subterráneas son dinámicos; las aguas avanzan en forma lenta y continuada de las zonas de recarga a las de descarga. El agua puede pasar decenas, centenares o incluso miles de años en esta parte subterránea del ciclo hidrológico, porque las tasas del flujo no pasan generalmente de unos pocos metros por día y pueden ser de apenas un metro por año. Estas velocidades se comparan con tasas de hasta un metro por segundo para los ríos. Es así evidente que pasará mucho tiempo hasta que un incidente de contaminación superficial afecte los pozos profundos, y esto tiene consecuen-

cias de política importantes para el control de la contaminación.

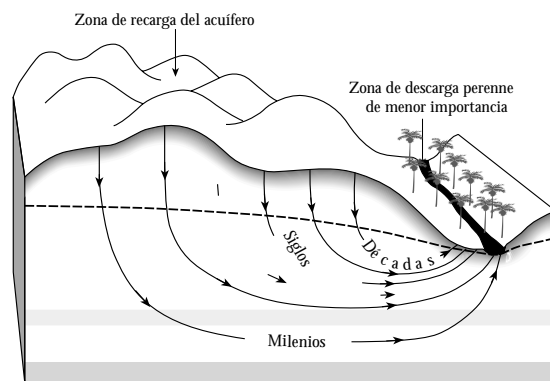
Los acuíferos en las zonas de recarga son generalmente *no confinados*, pero en otros sitios y normalmente a profundidades mayores, el agua subterránea se encuentra a menudo *confinada* por capas virtualmente impermeables. En esos casos, cuando se perforan por primera vez pozos, se encuentra agua bajo presión que sube por sus propios medios, a veces incluso hasta la superficie. El nivel o superficie hasta el cual sube el agua de un acuífero dado se llama *carga* o *superficie piezométrica*. En algunos casos, las capas superyacentes son menos permeables (por ejemplo, limos) pero no impiden completamente el paso vertical del agua, y el acuífero se denomina entonces *semiconfinado*, bajo un *acuitardo*. Esos acuíferos semiconfinados todavía pueden recibir una recarga vertical, pero a ritmos muy inferiores, lo que puede ser significativo en términos de la sostenibilidad a largo plazo de la extracción de agua.

**Gráfico R1.2. Sistemas de flujo de aguas subterráneas en a) regiones húmedas y b) regiones semiáridas. Los períodos de residencia indicados son valores típicos de órdenes de magnitud entre el momento de la recarga y el punto de descarga (tomado de Foster e Hirata, 1988).**

**a) Regiones húmedas**



**b) Regiones semiáridas**



# 2

## ANÁLISIS DE LOS PROCESOS HIDROGEOLÓGICOS EN LAS ZONAS URBANAS

### Influencias de las ciudades en la recarga y la calidad de las aguas subterráneas

#### Modificaciones de los sistemas naturales

*Impermeabilización de la superficie del terreno y drenaje.* La urbanización ocasiona la impermeabilización de la superficie. Esto, además de reducir la infiltración directa de las aguas pluviales, tiende también a disminuir la evaporación y a aumentar y acelerar así las escorrentías superficiales. Dependiendo de los arreglos de drenaje pluvial, puede producirse un cambio neto en la tasa global de recarga de las aguas subterráneas, desde una reducción importante hasta un aumento leve (Cuadro 2.1).

**Cuadro 2.1.** Impactos de los procesos urbanos en la infiltración a las aguas subterráneas

Proceso de urbanización	Tasas	Efecto en la zona de infiltración	Base temporal
<i>A) Modificaciones del sistema natural</i>			
Impermeabilización de la superficie y drenaje:			
• Absorción en sumideros de las aguas pluviales*	Aumento	Extenso	Intermitente
• Colectores de drenaje pluvial	Reducción	Extenso	Intermitente a continua
• Canalización de las aguas superficiales	Reducción marginal	Lineal	Variable
Riego de zonas de esparcimiento*	Aumento	Restringido	Estacional
<i>B) Introducción de una red de agua potable</i>			
Extracción local subterránea			
	Mínima	Extenso	Continua
Pérdidas de las tuberías de agua importada	Aumento	Extenso	Continua
Saneamiento <i>in situ</i> (sin alcantarillado)**	Aumento importante	Extenso	Continua
Colectores de alcantarillado			
• En zonas urbanas*	Algún aumento	Extenso	Continua
• Aguas abajo**	Aumento importante	Zonas ribereñas	Continua

\* Tiene también un impacto menor en la calidad de las aguas subterráneas.

\*\* Tiene también un impacto importante en la calidad de las aguas subterráneas.

Los procesos de impermeabilización de la superficie incluyen la construcción de techos y de zonas pavimentadas, como caminos, aparcamientos, instalaciones industriales y aeropuertos. Si bien la proporción de la superficie terrestre cubierta es un factor clave, algunos tipos de pavimento urbano como las tejas, los ladrillos o el asfalto poroso son bastante permeables y, a la inversa, algunas superficies no pavimentadas pueden quedar muy compactadas y con una capacidad de infiltración reducida.

Si no se instalan drenajes pluviales, las escorrentías se infiltrarán a través de sumideros o en los bordes de las superficies impermeables, entrarán en los canales de drenaje, se acumularán en las depresiones de la superficie, o harán una combinación de esas cosas, dependiendo de la intensidad de las lluvias y de la humedad previa del suelo. Si se insta-

lan drenajes pluviales, las modalidades de disposición del agua de drenaje tendrán una influencia importante en las tasas de recarga del agua subterránea urbana. La reducción de la recarga directa causada por la impermeabilización de la superficie queda muy a menudo compensada por los aumentos en la recarga indirecta cuando las aguas de drenaje se encaminan hacia sumideros de aguas pluviales en el suelo o estanques de infiltración, y no hacia cursos de agua urbanos a través de drenajes pluviales.

La desviación de las aguas de drenaje hacia sumideros de aguas pluviales o estanques de infiltración constituye una buena práctica de conservación de agua cuando incluye el drenaje de carreteras importantes y patios industriales. Sin embargo, aumenta considerablemente el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas causada por derramamientos de hidrocarburos y productos químicos industriales (Cuadro 2.2). Los sumideros de aguas pluviales se utilizan muy frecuentemente para la disposición de desechos líquidos de zonas residenciales, como, por ejemplo, el aceite de motor usado, o para la conexión ilegal de los derramamientos de tanques sépticos.

La urbanización entraña también una modificación radical de la condición de los cursos de agua superficiales que puede afectar la recarga y la calidad del agua subterránea, o su descarga. Esto puede ocurrir, por ejemplo, cuando se sella el lecho de los ríos para reducir la erosión, o se desvían los colectores de aguas negras hacia canales. Los efectos varían considerablemente dependiendo del medio hidrogeológico y de la región climática.

**Cuadro 2.2.** Fuentes de recarga de los acuíferos en las zonas urbanas y sus consecuencias en la calidad del agua subterránea

<i>Fuente de recarga</i>	<i>Importancia</i>	<i>Calidad del agua</i>	<i>Indicadores de contaminación</i>
Fugas de tuberías de agua potable	Importante	Buena	No hay generalmente indicadores obvios
Sistemas de saneamiento <i>in situ</i>	Importante	Deficiente	N, B, C1, CF
Fugas de alcantarillas	Menor	Deficiente	N, B, C1, CF, SO <sub>4</sub> (productos químicos industriales)
Drenaje de sumidero de las aguas pluviales	Escasa a importante	Buena a deficiente	N, C1, CF, HC, COD (productos químicos industriales)
Infiltraciones de canales y ríos	Escasa a importante	Moderada a deficiente	N, B, C1, SO <sub>4</sub> , CF, COD (productos químicos industriales)

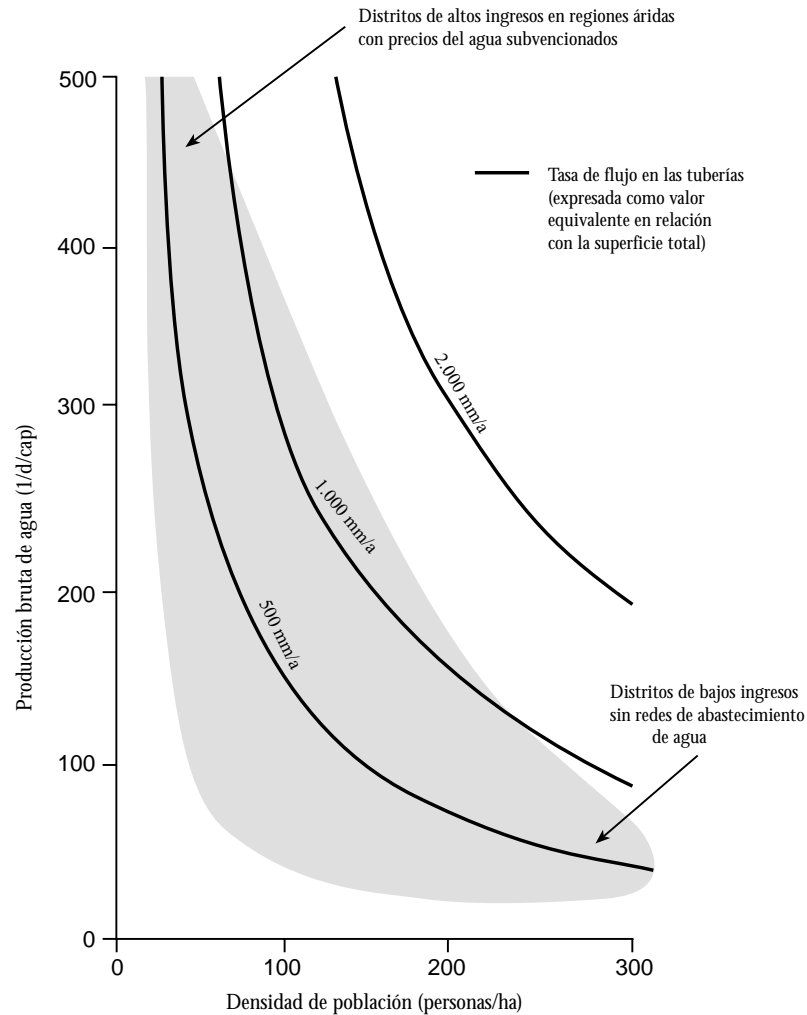
B	Boro.
Cl	Cloruro y salinidad general.
COD	Carbono orgánico disuelto (carga orgánica).
CF	Coliformes fecales
HC	Combustibles de hidrocarburos
N	Compuestos de nitrógeno (nitrato o amoníaco).
SO <sub>4</sub>	Sulfato.

*Riego de zonas de esparcimiento.* En los climas en que el riego se practica de manera intermitente o continua, como, por ejemplo, en los parques, los jardines y las zonas ajardinadas, suele haber un uso excesivo de agua, especialmente si ésta se aplica mediante la inundación a partir de canales de riego o con mangueras. Estas zonas se riegan por razones estéticas y no comerciales, y la cantidad de agua utilizada raramente guarda relación con las necesidades de las plantas. Las tasas de riego varían considerablemente según la política de cobro del agua, el nivel de riqueza de los consumidores individuales y, en el caso de los parques municipales, los procedimientos burocráticos.

En las zonas urbanas con suelos permeables, el riego excesivo puede dar como resultado en sitios localizados niveles extremadamente altos de recarga de las aguas subterráneas. Aunque estos niveles se limitan normalmente a una proporción relativamente pequeña de la zona urbanizada total (Cuadro 2.1), en las ciudades donde las autoridades municipales se ocupan del riego de las calles y las avenidas bordeadas de árboles, el volumen de recarga puede ser importante; esto ocurre, por ejemplo, en las capitales de Asia central de Bishkek y Tashkent. Las tasas de infiltración son mucho menores cuando se emplean métodos de riego eficientes, como el de goteo o la aspersión controlada, y donde se mide el agua utilizada, como suele ocurrir en los terrenos deportivos.

Las aguas obtenidas del riego de zonas de esparcimiento son por lo general de calidad relativamente buena, pero no ocurre así donde se usan aguas servidas urbanas para el riego. Estas aguas tienden a sobrecargar el suelo con nitrógeno y a veces contaminan las aguas subterráneas con agentes microbiológicos y/u orgánicos.

Gráfico 2.1. Flujos hidrológicos equivalentes en las tuberías de las zonas urbanas



Nota: Gama típica indicada por el sombreado.

Fuente: Foster, Morris y Lawrence (1993).

### Expansión de las redes de agua potable

**Sistemas de abastecimiento de agua.** A medida que las zonas urbanas crecen, aumentan el volumen y la proporción de agua importada, ya sea porque la ciudad supera la capacidad de suministro del acuífero local o porque la calidad de sus aguas subterráneas se deteriora. Si las fuentes locales de agua subterránea son insuficientes en cantidad o calidad para el uso doméstico urbano, la ciudad se ve obligada a importar agua de fuera de los límites urbanos. El desarrollo de un abastecimiento de agua reticulado da como resultado un gran volumen de agua que circula (en tuberías) por debajo de la superficie. Posteriormente se debe botar la mayor parte de esta agua. Expresada en términos hidrológicos, la cantidad de agua que circula en los sistemas de distribución es considerable en relación con la lluvia excedente (Gráfico 2.1), incluso en climas relativamente húmedos. Así pues, las fugas de las tuberías de distribución y la disposición de las aguas servidas pueden ser muy significativas en términos de recarga del sistema de aguas subterráneas subyacente.

Las tuberías de agua potable están, en su mayor parte, constantemente presurizadas y, en consecuencia, expuestas a las fugas. En los suelos permeables, la mayor parte de estas fugas de agua de alta calidad ocurre sin ninguna manifestación superficial, en la forma de infiltración en el suelo, y pasa a ser así un componente importante de la recarga

de las aguas subterráneas. Sin embargo, es difícil cuantificar esa recarga, ya que no es posible hacer mediciones directas. Las estadísticas más comúnmente citadas de agua no contabilizada incluyen: las pérdidas dentro de las instalaciones del consumidor, la extinción de incendios, el lavado de las tuberías por descarga de agua, y las conexiones ilícitas. Esto equivale a menudo a entre el 30% y el 60% del abastecimiento total. Además, una proporción de las fugas sub-superficiales puede resultar interceptada por raíces de árboles o entrar al sistema de alcantarillado (u otros conductos subterráneos), y no llegar así a los acuíferos.

Las fugas son a menudo una importante fuente de recarga para el equilibrio de las aguas subterráneas de los acuíferos urbanos no confinados y constituyen un recurso de agua adicional (Cuadro 2.1). Sin embargo, las fugas excesivas constituyen una pérdida importante de ingresos para las empresas de abastecimiento de agua. Incluso si la mayor parte del agua perdida se recupera de pozos de producción locales, el costo de la energía adicional para el bombeo es considerable. No obstante, es preciso tener en cuenta que las campañas encaminadas a minimizar las fugas de los sistemas de distribución reducen a menudo incidentalmente la recarga de las aguas subterráneas.

*Medidas de saneamiento.* El saneamiento sin un sistema de alcantarillado aumenta mucho la tasa de recarga de las aguas subterráneas urbanas (Cuadro 2.1). Si se calcula que el consumo para usos domésticos equivale a entre el 5% y el 10% del abastecimiento de agua, más del 90% del suministro terminará como recarga de las aguas subterráneas en las situaciones en que la disposición de todas las aguas servidas se efectúa en el suelo a través de unidades de saneamiento *in situ*. Esta recarga tendrá en general una influencia importante en el equilibrio de las aguas subterráneas urbanas, especialmente en zonas de alta densidad de población con abastecimiento entubado. Si una proporción considerable del agua se obtiene de las aguas subterráneas locales, habrá un reciclado en gran escala, en tanto que si una proporción importante se obtiene de fuentes externas, la recarga neta de las aguas subterráneas aumentará considerablemente.

Hay diferencias significativas entre los tanques sépticos y otros sistemas de disposición de las excretas en el lugar. Los tanques sépticos bien instalados y mantenidos tienen menos probabilidades de plantear amenazas graves para las aguas subterráneas porque a) la descarga de los tanques sépticos se produce a un nivel más alto en el perfil del suelo, donde las condiciones son más favorables para la disposición de los organismos patógenos, y b) una gran proporción de los efluentes sólidos (y en consecuencia de la carga contaminante) se retira periódicamente. Sin embargo, el uso de tanques sépticos en zonas de alta densidad de población, sin espacio suficiente para la disposición en el lugar de los efluentes, puede ocasionar una contaminación grave (Cuadro 2.2). Por ejemplo, en muchas ciudades de Asia, especialmente las que están en llanuras aluviales costeras bajas situadas sobre niveles freáticos poco profundos, la disposición de las excretas en el suelo mediante sistemas de saneamiento *in situ* no es posible debido al afloramiento del nivel freático durante la estación de monzones. En muchas zonas donde no hay sistemas de alcantarillado, las heces humanas y otros desechos se descargan en consecuencia directa o indirectamente en cursos de agua superficiales. Por ejemplo, en Yakarta, que tiene más de 900.000 tanques sépticos, el efluente se descarga en canales superficiales debido a sumideros insuficientes y sobrecargados y a deficiencias en el mantenimiento. Esto causa una contaminación grave de las aguas superficiales y plantea riesgos importantes para la salud. Algunos tramos de los cursos de agua pueden convertirse en fuentes longitudinales importantes de contaminación de las aguas subterráneas si parte de los caudales se infiltran a través de los lechos de los canales o de los ríos en acuíferos subyacentes poco profundos (Recuadro 2.1).

El uso de sistemas de saneamiento *in situ* sobrecargados puede ocasionar peligros para la salud y contaminación. Puede haber peligros para la salud incluso en zonas áridas cuando el terreno ya no puede recibir los volúmenes crecientes de aguas servidas, ya sea porque la subsuperficie no es suficientemente permeable o porque el nivel freático ha llegado a ser tan poco profundo que las unidades de saneamiento dejan de funcionar adecuadamente.

En algunas condiciones hidrogeológicas, sobre todo cuando hay un lecho de roca fracturada cerca de la superficie y/o el nivel freático es muy poco profundo, el uso de unidades de saneamiento *in situ* de diseño estándar plantea un alto riesgo de contaminación de las fuentes cercanas de agua subterránea con bacterias y virus patógenos. Ésta ha sido la vía demostrada de transmisión de organismos patógenos en numerosos brotes de enfermedades. Ocurre sobre todo en asentamientos densamente poblados, pero puede ocurrir también en asentamientos urbanos más prósperos donde las casas tienen pozos privados poco profundos y tanques sépticos sin un control adecuado de su ubicación.

Además, el uso de saneamiento *in situ* en zonas densamente pobladas puede producir una carga excesiva de nitrógeno en la subsuperficie, y causar problemas considerables de contaminación de las aguas subterráneas con nitratos o, más raramente, amoníaco (Cuadro 2.2). Los principales factores que determinan la gravedad de esa contaminación son los niveles de uso no consuntivo de agua per cápita, la tasa natural de infiltración y la proporción de la carga de nitrógeno bruto que puede lixiviarse en las aguas subterráneas en forma de nitrato. Esto último varía considerablemente

**Recuadro 2.1.** Contaminación de las aguas subterráneas urbanas por infiltraciones de los canales—Hat Yai (Tailandia)

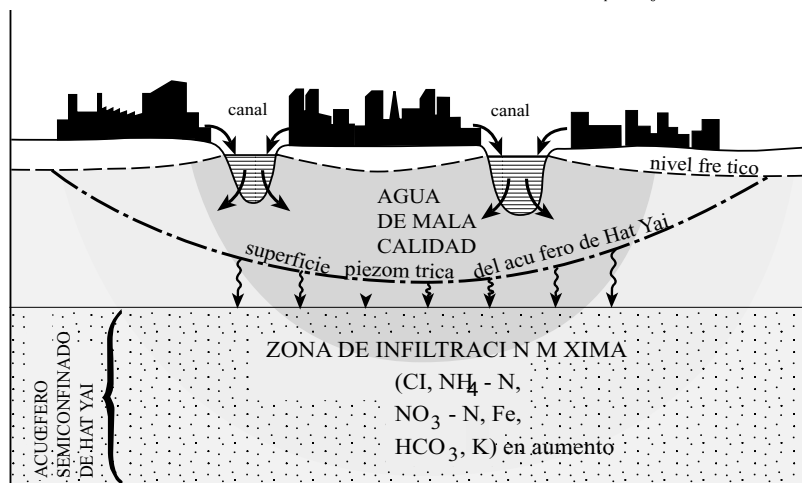
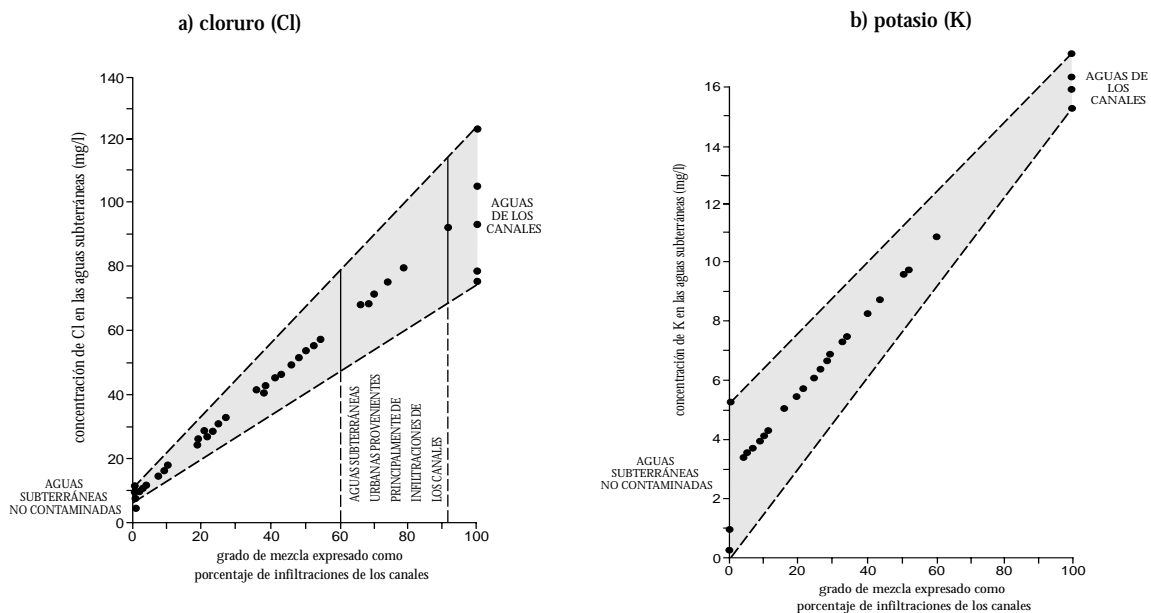
La ciudad de Hat Yai, en la parte sur de Tailandia, está situada sobre depósitos aluviales costeros bajos. La parte superior de esos depósitos tiene poca permeabilidad y un bajo nivel freático, lo cual crea problemas para la disposición de las aguas servidas y pluviales. Se estima que alrededor del 20% de las aguas servidas descargadas va directamente al suelo a través de unidades de saneamiento sin alcantarillado. El resto se descarga mediante drenes a canales de drenaje no recubiertos, que reciben también escorrentías pluviales.

Como resultado de la extracción de grandes cantidades de agua subterránea en las zonas urbanas, el nivel piezométrico en el acuífero semiconfinado ha bajado

considerablemente. Hay infiltraciones importantes del nivel freático poco profundo al acuífero semiconfinado y las infiltraciones de los canales constituyen actualmente el componente más importante de la recarga de las aguas subterráneas.

Se encuentran concentraciones elevadas de amoníaco, cloruro y sulfato en el acuífero semiconfinado situado bajo el centro de la ciudad a causa de la mala calidad de las infiltraciones de los canales. Cuando las concentraciones son muy altas, equivalen a una mezcla de entre 60% y 80% de infiltraciones de los canales y 20% a 40% de aguas subterráneas no contaminadas.

**Gráfico R2.1.** Mezcla del caudal subterráneo regional no contaminado y las infiltraciones de los canales en Hat Yai (Tailandia). Las aguas subterráneas urbanas más contaminadas tienen concentraciones de cloruro que indican que provienen en buena parte de infiltraciones de los canales, y se producen donde la extracción de agua subterránea y las infiltraciones descendentes consiguientes son mayores.



con el tipo y el funcionamiento de las unidades sanitarias y las condiciones locales del suelo, pero en muchos casos documentados supera el 50%.

Las aguas residuales mezcladas con productos químicos domésticos que contienen compuestos orgánicos sintéticos halogenados persistentes aumentan también el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas. La instalación de redes de alcantarillado reduce considerablemente la tasa de recarga de las aguas subterráneas urbanas, pero no elimina el riesgo de contaminación, dadas las pruebas crecientes de tasas elevadas de fugas de las tuberías.

*Disposición de los efluentes industriales.* En muchos países en desarrollo, hay grandes zonas urbanas marginales que carecen todavía de sistemas de alcantarillado. Un número cada vez mayor de industrias, tales como la de textiles, la metalurgia, el mantenimiento de vehículos, las lavanderías, las imprentas, las curtiembres y el revelado de fotos, tienden a estar situadas en esas zonas. La mayoría de esas industrias generan efluentes líquidos como, por ejemplo, lubricantes usados, licores ácidos ricos en metales, solventes y desinfectantes, que a menudo se descargan directamente en el suelo y que pueden también constituir una amenaza grave a largo plazo para la calidad de las aguas subterráneas.

Las plantas industriales de mayor envergadura utilizan a menudo grandes volúmenes de agua y usan corrientemente estanques para el tratamiento y la concentración de los efluentes líquidos. Además, las autoridades municipales tienden cada vez más a tratar las aguas servidas urbanas mediante su retención en estanques de oxidación poco profundos antes de su descarga en los ríos o en el suelo o de su uso para el riego. Estos estanques industriales o municipales no suelen estar recubiertos, y tienen en consecuencia tasas elevadas de filtración; así pues, las fugas de efluentes parcialmente tratados pueden afectar de manera significativa la calidad de las aguas subterráneas locales.

### *Efectos globales de la urbanización*

Se pueden ilustrar muchos efectos importantes de la urbanización sobre las aguas subterráneas haciendo referencia a tres ciudades de mediano tamaño, a saber: Hat Yai (Tailandia); Mérida (México) y Santa Cruz (Bolivia). Esas ciudades, todas con menos de un millón de habitantes, abarcan una amplia gama de medios y de prácticas y plantean los problemas comunes a que hacen frente muchas ciudades que dependen de las aguas subterráneas.

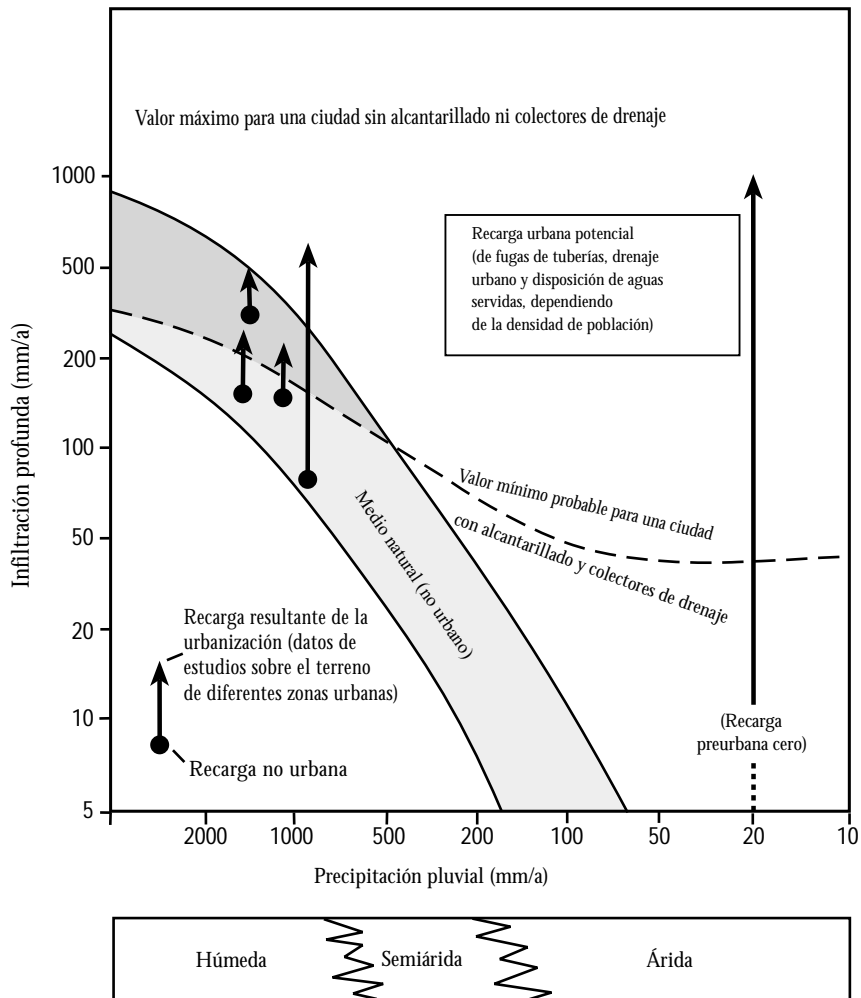
*Recarga de las aguas subterráneas.* El Gráfico 2.2 muestra el efecto neto de la urbanización en la recarga de las aguas subterráneas. Indica tan sólo aproximadamente la relación normal entre la precipitación pluvial y las infiltraciones en condiciones naturales (no urbanas) y la recarga potencial resultante de las fugas de tuberías, las percolaciones de aguas servidas y el drenaje urbano, aunque reconociendo que las fugas de tuberías y las percolaciones de aguas servidas variarán considerablemente según la densidad de población y el nivel de desarrollo. Las fugas de las tuberías de agua son la fuente más constante de recarga urbana; corresponde a esas fugas más del 20% de la producción bruta de agua (Gráfico 2.1), y su volumen supera así generalmente los 100 milímetros por año.

En las ciudades que carecen en su mayor parte de alcantarillado, el 90% de la producción bruta de agua puede llegar por varias rutas al suelo (Gráfico 2.1), porque el uso consuntivo (que no excede normalmente el 10%) será la única pérdida. Esto suele ocurrir sobre todo en las regiones áridas situadas sobre estratos permeables donde el riego de zonas de esparcimiento es probablemente otro factor importante en la recarga de aguas subterráneas.

En las regiones más húmedas, un porcentaje más alto del drenaje y las aguas servidas urbanas se dirigirá normalmente a los cursos de agua superficiales a causa de los volúmenes mayores de drenaje urbano. Además, en las llanuras costeras bajas, donde están situadas muchas ciudades del mundo en desarrollo, los sedimentos subyacentes son de grano fino. En este caso, el suelo tendrá una capacidad de infiltración y almacenamiento reducida a causa de la ocurrencia frecuente de estratos de arcilla y niveles freáticos poco profundos. En consecuencia, el aumento de la infiltración profunda causado por la urbanización será menos espectacular, aunque a menudo es importante.

El régimen hidrogeológico poco profundo tiene una importancia crucial cuando se trata de predecir los efectos de la urbanización sobre las aguas subterráneas. Esto se ilustra muy bien en las respuestas contrastantes de Hat Yai y Mérida. En Mérida, la formación de caliza cárstica muy permeable acepta fácilmente toda el agua descargada en el suelo, aunque a costa de la calidad de las aguas subterráneas. En consecuencia, las estimaciones realizadas indican que la infiltración profunda a las aguas subterráneas ha aumentado de 180 a 600 milímetros por año. En el caso de Hat Yai, los lechos poco profundos semiconfinantes son insuficientemente permeables para aceptar la infiltración urbana, y la existencia de un nivel freático poco profundo agrava este efecto. En consecuencia, la mayor parte de las aguas servidas se descarga en cursos de agua superficiales pero, aun así, se calcula que la recarga de las aguas subterráneas ha aumentado de 170 a 370 milímetros por año como resultado de la urbanización.

Gráfico 2.2. Gama potencial de infiltración subsuperficial causada por la urbanización



Fuente: Foster, Morris y Lawrence (1993).

*Calidad de las aguas subterráneas.* En el Cuadro 2.3 se resumen los principales tipos de problemas que afectan a la calidad de las aguas subterráneas (aparte de la intrusión y la succión de agua salina causadas por la explotación no controlada). Todos estos problemas pueden presentarse en el medio urbano, con la excepción de los relacionados con la intensificación del cultivo agrícola. Además, algunos problemas relacionados con la agricultura pueden producirse en los márgenes de las ciudades como resultado de la horticultura intensiva y/o de sistemas de riego con aguas servidas.

Las infiltraciones de sistemas de saneamiento sin alcantarillado, como los tanques sépticos, los pozos negros y las letrinas, constituyen probablemente la fuente más común y difundida de contaminación urbana difusa. Para las aguas subterráneas, el problema más inmediato de los sistemas de saneamiento *in situ* es el riesgo de migración directa de bacterias y virus patógenos a los acuíferos subyacentes y las fuentes cercanas de aguas subterráneas.

Las calizas cársticas y otros acuíferos muy fisurados son especialmente vulnerables a los organismos patógenos. En el caso de Mérida (Recuadro 2.2), ha habido una amplia contaminación microbiológica de las aguas subterráneas urbanas, y los recuentos de coliformes fecales están generalmente por encima de 1.000 por 100 mililitros en las muestras obtenidas de pozos poco profundos. En los casos de descarga de tanques sépticos en sumideros con una base de piedra caliza fisurada situada apenas entre uno y tres metros por encima del nivel freático, las oportunidades de atenuación de los organismos patógenos en la zona vadosa (no saturada) son limitadas.



**Cuadro 2.3.** *Clasificación de los problemas de calidad de las aguas subterráneas*

<i>Tipo de problema</i>	<i>Causas</i>	<i>Preocupaciones</i>
Contaminación antropogénica	Protección deficiente de acuíferos vulnerables contra descargas y lixiviaciones humanas de: <ul style="list-style-type: none"> <li>● Actividades urbanas e industriales</li> <li>● Intensificación del cultivo agrícola</li> </ul>	Organismos patógenos, NO <sub>3</sub> , NH <sub>4</sub> , Cl, SO <sub>4</sub> , B, metales pesados, COD, hidrocarburos aromáticos y halogenados NO <sub>3</sub> , Cl, pesticidas
Contaminación natural	Relacionada con la evolución pH-Eh de las aguas subterráneas y la disolución de minerales (agravada por la contaminación antropogénica y/o la explotación no controlada)	Principalmente Fe, F y a veces As, I, Mn, Al, Mg, SO <sub>4</sub> , Se, NO <sub>3</sub> (de la recarga paleolítica)
Contaminación en el cabezal del pozo	Diseño y construcción deficientes de los pozos que permiten el ingreso directo de aguas superficiales o aguas poco profundas contaminadas	Principalmente organismos patógenos

Se cree que la contaminación microbiológica de los pozos poco profundos es muy frecuente en la mayoría de los medios hidrogeológicos. Sin embargo, en el caso de formaciones granulares no consolidadas, es más a menudo consecuencia del diseño y la construcción incorrectos de los pozos que de la contaminación de los acuíferos (Cuadro 2.3). La migración de agentes patógenos a través de estratos no consolidados a los pozos profundos es muy poco probable. La contaminación es casi con certeza resultado del mal diseño y la mala construcción del pozo de que se trata, que permite que el agua contaminada se infiltre de la superficie o de los acuíferos menos profundos. En las formaciones consolidadas, donde puede haber un flujo rápido de la zona vadosa a través de fracturas o fisuras, la contaminación microbiológica plantea un riesgo mayor y puede comprender protozoarios patógenos, al igual que bacterias y virus.

Los compuestos de nitrógeno que surgen de la disposición de las excretas no constituyen un peligro inmediato para las aguas subterráneas, pero pueden causar problemas mucho más persistentes en una amplia gama de medios hidrogeológicos. Las concentraciones resultantes de nitratos en las aguas subterráneas son normalmente altas, aunque muy variables. En Mérida, pese al porcentaje excepcionalmente alto de nitrógeno proveniente de los tanques sépticos y los pozos negros que se oxida y se lixivia hacia el nivel freático, la concentración media de nitrato-nitrógeno en las aguas subterráneas es de sólo cuatro miligramos por litro. Esta escasa concentración se debe en gran medida a la densidad relativamente baja de la población urbana y a la considerable dilución que permiten el flujo a través del acuífero y el elevado nivel de uso de agua en las zonas urbanas.

Por el contrario, en Santa Cruz, probablemente no más del 20% del nitrógeno descargado se lixivia en los acuíferos aluviales subyacentes. Sin embargo, la densidad de población y la menor dilución dan como resultado concentraciones medias de nitrato-nitrógeno en los acuíferos poco profundos de entre 10 y 40 miligramos por litro. El porcentaje inferior de nitrógeno oxidado y lixiviado a las aguas subterráneas refleja la menor cantidad de oxígeno disuelto en el suelo y la zona vadosa en el medio aluvial de Santa Cruz (Recuadro 2.3).

En Hat Yai, donde la disposición de excretas en el suelo mediante sistemas de saneamiento *in situ* no es siempre posible a causa de un nivel freático poco profundo en la estación húmeda, las heces humanas y otros desechos se descargan en cursos de agua superficiales. En consecuencia, los cursos de agua reciben cargas considerables de efluentes no tratados. Se producen concentraciones elevadas de nitrógeno (en su mayor parte amoníaco) en las aguas subterráneas cercanas a esos canales como resultado directo de la infiltración (Recuadro 2.1). La presencia de amoníaco (por oposición al nitrato) refleja la poca cantidad de oxígeno disuelto en las aguas subterráneas y la ausencia de una zona vadosa importante.

Además de los niveles elevados de nitrógeno en forma de nitrato o amoníaco en las aguas subterráneas urbanas, las concentraciones crecientes de cloruro (en su mayor parte provenientes de sistemas de saneamiento *in situ*), sulfato (de detergentes y escorrentías de los caminos) y bicarbonato (de la degradación de desechos orgánicos) son frecuentes (Cuadro 2.1).

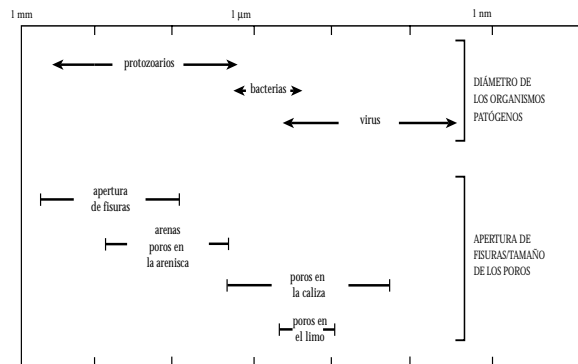
Los derramamientos accidentales, las fugas o la disposición incorrecta de efluentes industriales causan también problemas graves, pero más localizados, de contaminación de las aguas subterráneas. En Mérida, un estudio de los pozos de abastecimiento reveló una contaminación frecuente con solventes clorados. Aunque las concentraciones eran generalmente inferiores a 10 partes por 1.000 millones, se consideró que había una subestimación de las concentraciones reales a causa de las dificultades inherentes a la obtención y el análisis de las muestras.

**Recuadro 2.2. Contaminación de las aguas subterráneas por agentes patógenos—Mérida (México)**

La ciudad de Mérida, situada en la península mexicana de Yucatán, no tiene alcantarillado entubado y la disposición de la mayor parte de sus aguas servidas se hace directamente en el suelo a través de tanques sépticos, sumideros y pozos negros. Los sumideros se cavan en la caliza cárstica y suelen estar apenas uno a tres metros por encima del nivel freático. La caliza, que es sumamente permeable, proporciona la totalidad del agua para la ciudad. El agua proviene en su mayoría de pozos situados fuera del perímetro de la ciudad, pero alrededor del 30% se obtiene de pozos perforados en la zona urbana.

La naturaleza fisurada de la piedra caliza hace que el movimiento hacia el nivel freático sea con frecuencia rápido. Además, la infiltración migra a través de las fisuras, y la zona vadosa no tiene así casi ninguna capacidad de atenuación, dado que la apertura de las fisuras es muchas veces mayor que los microorganismos patógenos. No es así sorprendente que los acuíferos poco profundos estén muy contaminados con coliformes fecales (CF), típicamente a una tasa de entre 1.000 y 4.000/100 ml, en comparación con la concentración permitida en el agua potable de <1/100 ml.

**Gráfico R2.2a. Diámetro de los microorganismos en relación con el tamaño de los poros y las fisuras de los acuíferos**

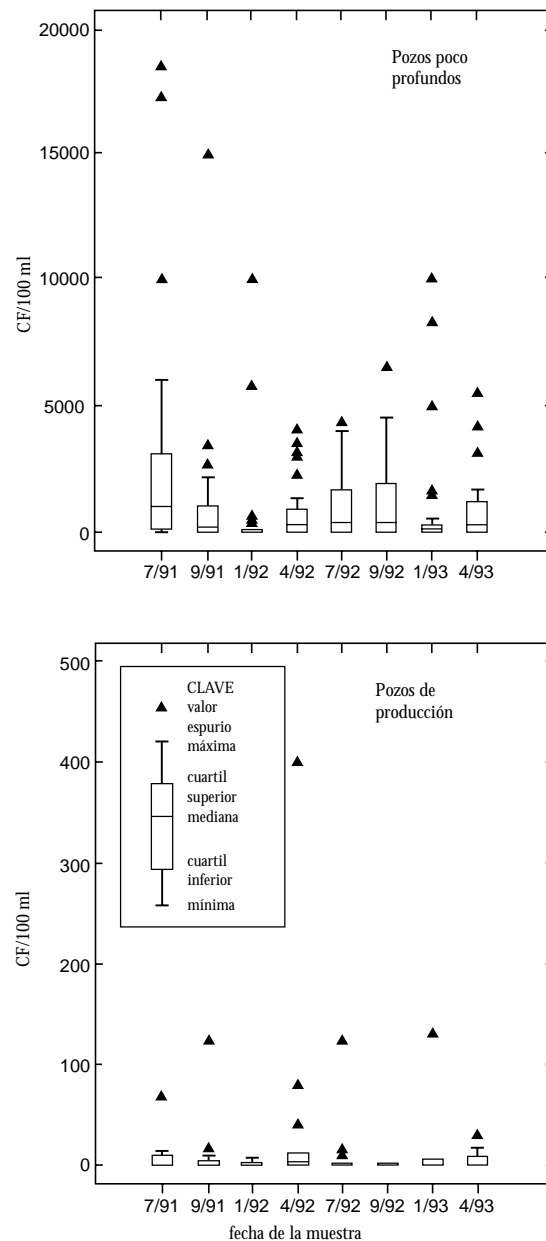


El recuento de CF fluctúa estacionalmente. Los valores más bajos se observan en la estación seca (enero a abril) y los más altos en la estación húmeda (junio a septiembre). Estas variaciones hacen pensar que hay menos atenuación durante la estación lluviosa, probablemente porque la mayor carga hidráulica hace que las fisuras transmitan agua, incluso agua contaminada de las escorrentías superficiales.

La contaminación es mucho más pronunciada en los pozos cavados poco profundos que en los pozos perfora-

dos más profundos, pero estos últimos también están seriamente afectados. La contaminación en los sitios profundos puede deberse a fracturas verticales o al mal funcionamiento de un pequeño número de sistemas de inyección profunda de aguas servidas.

**Gráfico R2.2b. Recuento de coliformes fecales en las aguas subterráneas de Mérida**



**Recuadro 2.3. Infiltración descendente de la contaminación inducida por el bombeo—Santa Cruz (Bolivia)**

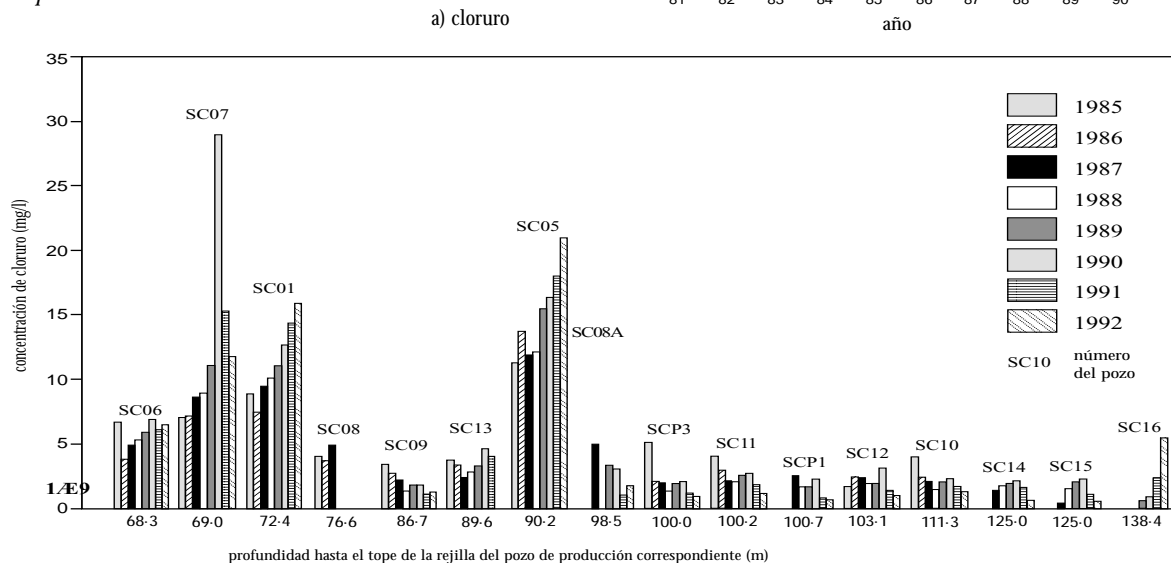
Santa Cruz (Bolivia) es una ciudad con edificios bajos, relativamente poca densidad y rápido crecimiento, cuyo suministro municipal de agua proviene enteramente de pozos situados dentro de los límites de la ciudad que extraen agua de acuíferos aluviales profundos semilibres. El abastecimiento se hace a través de cooperativas, de las cuales la más importante es SAGUAPAC, que abastece a casi las dos terceras partes de la población. El abastecimiento municipal se obtiene de unos 50 pozos situados a entre 90 y 350 metros de profundidad, que proporcionan 98 Ml/d (1994). Hay también muchos pozos privados (unos 550 en 1991) que se utilizan para el abastecimiento industrial, comercial y en algunos casos residencial. Esos pozos tienen generalmente menos de 90 metros de profundidad y extraen agua principalmente del acuífero poco profundo.

La ciudad tiene una cobertura bastante buena de agua entubada, pero hasta hace muy poco sólo la zona central más antigua tenía alcantarillado entubado, y la mayor parte de la disposición de los efluentes domésticos e industriales y el drenaje pluvial se hacía en el suelo. Los principales componentes de la recarga de agua subterránea (además de la infiltración natural del exceso de agua de lluvia) son la disposición en el lugar de aguas servidas y las fugas de las tuberías de agua. Se cree que las filtraciones del río Piray cercano también son importantes, pero son difíciles de cuantificar con precisión.

Las aguas subterráneas del acuífero más profundo, por debajo de los 100 metros, son de excelente calidad, similares a las del acuífero poco profundo gradiente arriba de la ciudad, y esto constituye la condición natural. Sin

embargo, el acuífero superior, por encima de los 45 metros, muestra un deterioro considerable, con concentraciones elevadas de nitrato y cloruro bajo los distritos más densamente poblados. Esas concentraciones provienen de la disposición de efluentes en el suelo, principalmente en unidades de saneamiento *in situ*. Esa recarga urbana es arrastrada hacia abajo en respuesta al bombeo de los acuíferos semiconfinados más profundos. Hay poco oxígeno disuelto en la recarga urbana porque fue consumido al oxidarse el carbono en la carga orgánica para convertirse en dióxido de carbono, que a su vez reacciona con carbonatos en la matriz del acuífero para producir bicarbonato. La oxidación de la elevada carga orgánica moviliza también el manganeso que se encuentra naturalmente en la matriz del acuífero, y algunas de las perforaciones productivas del principal campo de pozos han empezado a mostrar concentraciones por encima de los 0,5 mg, que crean problemas de sabor y para el lavado de ropa.

**Gráfico R2.3. Contaminación incipiente de los pozos de abastecimiento público de agua en que se muestra el aumento relativo en los pozos con rejillas por encima de los 90 metros de profundidad**



### *Variaciones en la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación*

Las amenazas a las aguas subterráneas que plantean el número creciente de productos químicos solubles derivados de los efluentes urbanos, las actividades industriales y la disposición de desechos sólidos son insidiosas, y en muchos casos la contaminación de las aguas subterráneas se produce casi imperceptiblemente. El lento avance del agua desde la superficie, a través de la zona vadosa, a los acuíferos profundos hace que puedan transcurrir muchos años entre el momento en que los productos químicos entran al terreno y el momento en que afectan la calidad de las fuentes de abastecimiento de aguas subterráneas.

La capacidad de los perfiles naturales del subsuelo de atenuar muchos contaminantes se ha reconocido implícitamente desde hace mucho tiempo con el uso difundido de la subsuperficie como un sistema potencialmente efectivo para la disposición inocua de los excrementos humanos y las aguas servidas domésticas. En un menor grado, los procesos de atenuación (Gráfico 2.3) continúan a mayor profundidad en la zona vadosa, sobre todo cuando hay sedimentos no consolidados, por oposición a rocas consolidadas fisuradas. El grosor natural de esta zona es así un factor importante, que en un medio urbano puede resultar modificado por obras de ingeniería o ser circundada por algunos efluentes o sumideros de drenaje. Además, una vez que la recarga urbana llega al nivel freático, la dispersión hidrodinámica de los contaminantes en el flujo de agua subterránea diluirá los contaminantes persistentes y móviles (Gráfico 2.3). Habrá más mezcla y más dilución en los pozos de producción desde los cuales se bombea el agua, porque esos pozos por lo general interceptan o inducen flujo de aguas subterráneas a varias profundidades y de distintas direcciones; normalmente, no todas ellas están contaminadas.

Sin embargo, no todos los perfiles del suelo y los medios hidrogeológicos subyacentes son igualmente eficaces en la atenuación de contaminantes (Cuadro 2.4). Además, el grado de atenuación varía mucho con los tipos de contaminantes y los procesos de contaminación en un medio dado. El riesgo de contaminación de las aguas subterráneas es por eso relativo. Las preocupaciones acerca del deterioro de la calidad de las aguas subterráneas guardan relación principalmente con acuíferos no confinados o freáticos, especialmente cuando la zona vadosa es delgada y el nivel freático poco profundo. Puede haber también un riesgo considerable de contaminación incluso si los acuíferos están semiconfinados y los acuitardos superyacentes son relativamente delgados y/o permeables. El agua subterránea extraída de acuíferos más profundos muy confinados es afectada en mucho menor grado por la contaminación de la superficie, excepto por los contaminantes más persistentes y a muy largo plazo. Aun así, es probable que las concentraciones se reduzcan considerablemente al mezclarse con aguas subterráneas circulantes provenientes de zonas de recarga distantes.

La vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación es un concepto útil que se usa mucho para indicar la medida en que pueden verse afectados adversamente por una carga de contaminantes. Esto puede ser función de las características intrínsecas de la zona vadosa o de los lechos confinantes que separan el acuífero saturado de la superficie inmediatamente suprayacente. Algunos medios hidrogeológicos son inherentemente más vulnerables que otros (Cuadro 2.4). Distintas zonas del mismo sistema acuífero pueden tener vulnerabilidades relativas diferentes debido a variaciones espaciales en el grosor de la zona vadosa o a las características de los estratos confinantes.

La naturaleza de la carga de contaminantes subsuperficiales que recibe la superficie del terreno es también crítica; su interacción con la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación determina el peligro de contaminación de las aguas subterráneas.

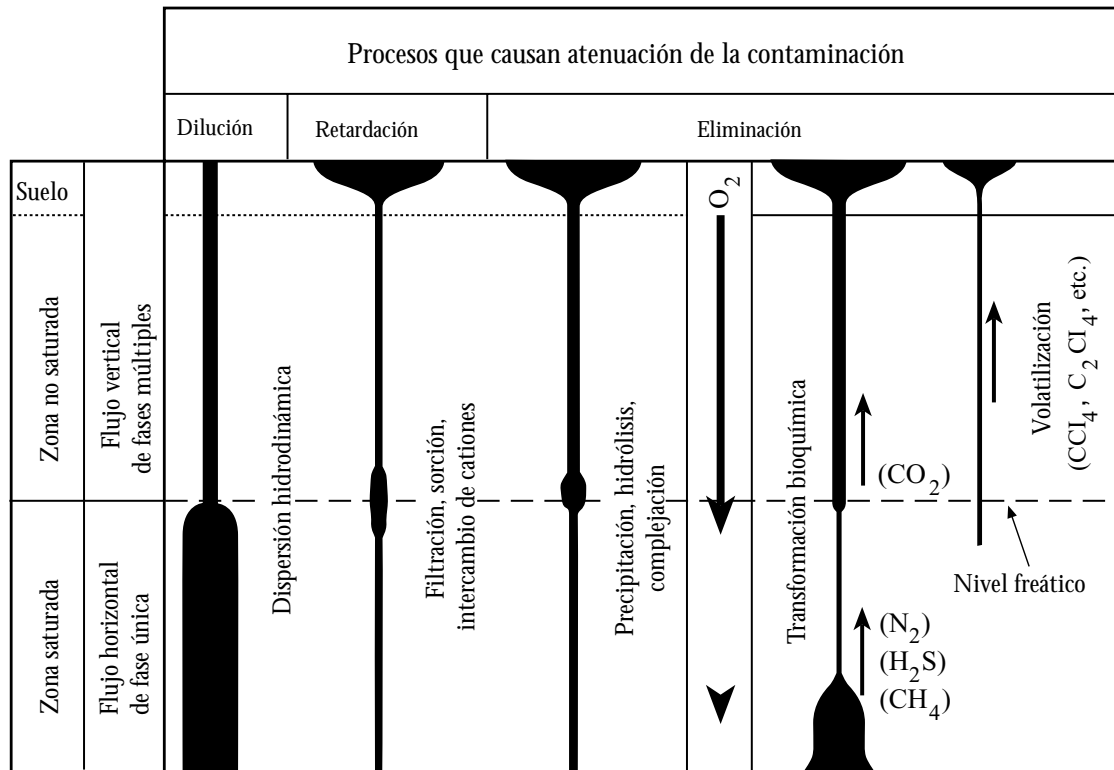
En el Cuadro 2.5 se resumen las principales actividades que suelen generar una carga de contaminación subsuperficial. Hay muchas actividades que producen alguna carga de contaminación, pero muchas veces sólo unas pocas son responsables del riesgo de una contaminación importante de las aguas subterráneas en una zona dada. En este contexto, la sobrecarga hidráulica asociada con la carga contaminante es un factor clave.

Para considerar la adopción de medidas de prevención y control de la contaminación, es fundamental diferenciar las fuentes puntuales o longitudinales fácilmente identificables y la contaminación más difusa. Además, es preciso distinguir entre las actividades en que la generación de una carga contaminante subsuperficial es un elemento integral del diseño y aquellas en que es un componente incidental o accidental.

### **Efectos de la extracción no controlada de aguas subterráneas**

#### *Competencia por los recursos disponibles*

La extracción de aguas subterráneas hace que baje el nivel freático. Si la extracción es limitada, ese nivel se estabiliza a un nuevo nivel de equilibrio en que la afluencia a las zonas de extracción de aguas subterráneas contrarresta la extrac-

**Gráfico 2.3.** *Procesos que promueven la atenuación de la contaminación en los sistemas de aguas subterráneas*

(El grueso de la línea indica la importancia relativa del proceso en la zona correspondiente)

Fuente: Foster e Hirata (1988).

ción. Sin embargo, si la extracción es considerable y concentrada, de modo que excede la recarga local, el nivel freático puede seguir bajando durante muchos años; la zona de niveles deprimidos puede ampliarse, y pueden ocurrir así cambios importantes en la distribución de la carga hidráulica dentro del sistema acuífero.

El problema de la extracción de aguas subterráneas está autolimitado ya que, en algún momento, el acuífero queda sin agua, y aumenta así radicalmente el costo del abastecimiento de agua. Los costos se elevan a causa del mayor consumo de energía por bombas más poderosas, de la eficiencia reducida de los pozos de producción y, en los casos extremos, se produce un ciclo de profundización de los pozos y/o reemplazo de las bombas. Además, los acuíferos no son hidráulicamente uniformes, y los niveles freáticos pueden caer más rápido de lo previsto cuando las partes inferiores son menos permeables que las superiores, lo cual no es raro.

Otro problema es la competencia entre los operadores privados de pozos y los servicios públicos de abastecimiento de agua. Pueden surgir conflictos si el nivel de las aguas cae rápidamente, provocando hostilidad y frustrando los esfuerzos por movilizar la cooperación necesaria con objeto de adoptar políticas de gestión sostenible de los recursos hídricos.

Desde comienzos de los años ochenta, se han venido acumulando pruebas de una caída importante y difundida de los niveles de los acuíferos en muchas ciudades de Asia como resultado de su explotación intensa. Algunas ciudades han sufrido depresiones extensas de entre 20 y 50 metros (Bangkok, Manila, Tianjin) y muchas otras de entre 10 y 20 metros (entre ellas Beijing, Madrás, Shanghai, Xian). En todos esos casos, ha habido un deterioro de la calidad de las aguas subterráneas y/o asentamiento del terreno a raíz de la caída de los niveles. Además, un gran número de ciudades y poblaciones pequeñas muestran señales de degradación incipiente de la calidad del agua a causa de la explotación no controlada de los acuíferos. Hasta 45 ciudades de China están experimentando algún asentamiento, lo que indica que la caída de los niveles freáticos es ciertamente generalizada.

Varias ciudades de México han tenido también problemas asociados con la extracción excesiva. Por ejemplo, en la Ciudad de México, los niveles de los acuíferos de los sistemas entre montañas (aluviales y volcánicos) situados por debajo de la ciudad bajaron entre cinco y 10 metros entre 1986 y 1992. En León (Guanajuato), el nivel freático bajó 90 metros entre 1960 y 1990 y siguió bajando entre uno y cinco metros por año en 1990-95. Dado el uso extensivo de agua subterránea para el riego en México, un rasgo común en muchas ciudades mexicanas es la competencia por los recursos locales de aguas subterráneas con el sector agrícola poderoso e influyente.

**Cuadro 2.4.** Medios hidrogeológicos y su vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas

Medio hidrogeológico	Tiempos típicos de desplazamiento al nivel freático	Potencial de atenuación del acuífero	Vulnerabilidad a la contaminación
<i>Sedimentos aluviales y de llanuras costeras</i>			
No confinado	Meses-años	Alto-moderado	Moderada
Semiconfinado	Años-décadas	Alto	Baja
<i>Rellenos de valles intermontanos</i>			
No confinado	Meses-años	Moderado-alto	Moderada
Semiconfinado	Años-décadas	Moderado	Moderada-baja
<i>Acuíferos sedimentarios consolidados</i>			
Areniscas porosas	Semanas-años	Alto	Moderada-alta
Calizas cársticas	Días-semanas	Bajo-moderado	Extrema
<i>Calizas costeras</i>			
No confinado	Días-semanas	Bajo-moderado	Alta-extrema
<i>Depósitos glaciales</i>			
No confinado	Semanas-años	Moderado	Alta-moderada
<i>Base rocosa intemperizada</i>			
No confinado	Días-semanas	Bajo	Alta-extrema
Semiconfinado	Semanas-años	Moderado	Moderada
<i>Llanuras de loess</i>			
No confinado	Días-meses	Bajo-moderado	Moderada-alta

#### *Externalidades ambientales potenciales*

La explotación no controlada puede tener otros efectos secundarios, cuya gravedad y frecuencia dependen de las condiciones hidrogeológicas (Cuadro 2.6).

*Intrusión salina.* El impacto más común de la explotación mal controlada de los acuíferos, en la calidad del agua, particularmente en las zonas costeras, es la intrusión (Cuadro 2.6). A medida que baja el nivel freático, puede invertirse la dirección del flujo, y la interfaz entre el acuífero y las aguas salinas avanzará así tierra adentro. En el caso de acuíferos aluviales delgados, esto adopta la clásica forma de cuña, pero en las secuencias de acuíferos múltiples y de mayor espesor características de la mayoría de las formaciones aluviales importantes, las inversiones de salinidad se producen a menudo con intrusión de aguas de mar modernas (o retención de aguas paleosalinas) en horizontes acuíferos cercanos a la superficie, y de aguas dulces subterráneas en horizontes más profundos (Gráfico 2.4). El efecto de la intrusión salina en la mayoría de los tipos de acuíferos es casi irreversible. Una vez que la salinidad se ha difundido en el agua alojada en los poros de la matriz de grano fino del acuífero, su elución llevará décadas o siglos, incluso si se restablece un flujo de aguas dulces subterráneas hacia la costa.

*Contaminación inducida.* La contaminación de acuíferos más profundos (semiconfinados) situados bajo un acuífero freático poco profundo de mala calidad por causas antropogénicas y/o intrusión salina es a menudo consecuencia de la explotación no controlada. La contaminación inducida es resultado de la mala construcción de los pozos que hace que haya infiltraciones directas a los pozos causadas por la vinculación accidental de uno o más horizontes acuíferos, que

**Cuadro 2.5.** *Resumen de las actividades que podrían generar cargas de contaminación subsuperficial*

<i>Naturaleza de la carga contaminante</i>	<i>Actividad/ estructura</i>	<i>Categoría de distribución</i> <i>Categoría de distribución</i>	<i>Principales tipos de contaminantes</i>	<i>Sobrecarga hidráulica</i>	<i>Circunvalación de la zona del suelo</i>
<i>Aguas servidas urbanas y otros servicios</i>					
SANEAMIENTO SIN ALCANTARILLADO	u/p/r	P-D	nfo	+	*
Alcantarillado con fugas <sup>1</sup>	u	P-L	ofn	+	*
LAGUNAS DE OXIDACIÓN DE AGUAS SERVIDAS <sup>1</sup>	u/p	P	ofn	++	*
Lodos de agua residual doméstica/descarga de efluentes en suelo <sup>1</sup>	u/p/r	P-D	nsf	+	*
AGUAS SERVIDAS VERTIDAS EN UN RÍO	u/p/r	P-L	nof	++	*
INFILTRANTE <sup>1</sup>	u/p/r	P	osh		*
Lixiviaciones de derramamiento de rellenos sanitarios	u/p/r	P-D	o		*
Tanques de almacenamiento de combustible	u/p/r	P-D	so	+	*
Sumideros de drenaje de carreteras					
<i>Industrial</i>					
Tanques/oleoductos con fugas <sup>2</sup>					
Derramamientos accidentales	u	P-D	oh		
AGUA DE PROCESAMIENTO/LAGUNAS DE EFLUENTES	u	P-D	oh		*
DESCARGA DE EFLUENTES EN SUELO	u	P	ohs	+	
EFLUENTES VERTIDOS EN UN RÍO	u	P-D	ohs	++	*
INFILTRANTE	u/p/r	P-L	ohs	+	
Lixiviaciones de derramamiento de desechos	u/p/r	P	ohs	++	*
Drenaje de sumideros	u/p/r	P	oh		*
Deposición atmosférica	u/p/r	D	so	++	*
<i>Agrícola/hortícola<sup>3</sup></i>					
CULTIVO DEL SUELO	p/r	D	no		
CON PRODUCTOS AGROQUÍMICOS	p/r	D	nos	+	
Y CON RIEGO	p/r	D	nos		
Con lodos de aguas residuales	p/r	D	nosf	+	
CON RIEGO DE AGUAS SERVIDAS					
<i>Cría de ganado/procesamiento de cultivos</i>					
Laguna de efluentes	p/r	P	fon	++	*
Descarga de efluentes en el suelo	p/r	P-D	nsf		
Efluentes descargados en un río infiltrante	p/r	P-L	onf	++	*
<i>Extracción de minerales</i>					
<i>Perturbación hídrica</i>					
Descarga de aguas de drenaje	r/p	P-D	sh		*
AGUA DE PROCESAMIENTO/LAGUNAS DE LODOS DE AGUAS RESIDUALES	r/p	P-D	hs	++	*
Lixiviaciones de derramamiento de desechos	r/p	P	hs	+	*
	r/p	P	sh		*

+	Moderada.
++	Considerable.
f	Patógenos fecales.
h	Metales pesados.
n	Compuestos de nutrientes.
o	Compuestos microorgánicos y/o carga orgánica.
P/L/D	Puntual/lineal/difusa.
s	Salinidad.
u/p/r	Urbana/periurbana/rural.

*Nota:* Las mayúsculas indican las fuentes más comunes y graves de contaminación del agua subterránea.

1. Puede incluir componentes industriales.

2. Puede ocurrir también en zonas no industriales.

3. Su intensificación plantea el principal riesgo de contaminación.

**Cuadro 2.6.** Susceptibilidad de los medios hidrogeológicos a efectos secundarios adversos durante la explotación no controlada

Medio hidrogeológico	Tipo de efecto secundario		
	Intrusión salina o succión	Asentamiento del terreno	Contaminación inducida
<i>Formaciones aluviales importantes</i>			
Costeras	**	(algunos casos)**	**
Interiores	(pocas zonas)*	(pocos casos)*	**
<i>Rellenas en valles intermontanos</i>			
Con depósitos lacustres	(algunas zonas)**	(la mayoría de los casos)**	*
Sin depósitos lacustres	(pocas zonas)*	(pocos casos)*	*
Acuíferos sedimentarios consolidados	(algunas zonas)**	—	(pocos casos)*
Calizas costeras recientes	**	—	*
Depósitos glaciales	—	(pocos casos)*	*
Base rocosa intemperizada	—	—	*
Mesetas cubiertas de loess	—	(pocos casos)*	—

\* Ocurrencias conocidas.

\*\* Efectos importantes.

— No aplicable o raro.

actúan como conducto vertical. Es también resultado de las fugas verticales inducidas por el bombeo causadas por diferencias en la carga hidráulica a medida que el nivel de las aguas superficiales del acuífero inferior cae por debajo de la napa del acuífero freático. Estas condiciones (Gráfico 2.4) facilitan la penetración de contaminantes más móviles y persistentes.

Puede también haber contaminación en acuíferos aluviales de considerable espesor situados aguas abajo de las ciudades. Algunas ciudades en rápido desarrollo han establecido redes de alcantarillado y generan grandes volúmenes de aguas servidas. Esas aguas se descargan normalmente sin tratar, o con un tratamiento mínimo (especialmente en los climas más áridos), en cursos de agua superficiales, desde donde se usan a menudo para el riego agrícola no controlado en las zonas ribereñas situadas aguas abajo. Esas zonas pueden estar situadas encima de acuíferos aluviales importantes. Por ejemplo, en la ciudad de Shenyang (China), que depende mucho del agua subterránea, se bombean más de 1.000 millones de litros por día de acuíferos ribereños situados por debajo y a lo largo del río Hunhe. El río es una fuente importante de recarga local, especialmente por la infiltración inducida ocasionada por la sobreextracción local. Sin embargo, ha habido una degradación grave de la calidad del agua causada por nitratos o amoníaco, petróleo y fenol en algunos pozos de producción a causa de infiltraciones del agua del río muy contaminada. Muchas otras ciudades de la parte nororiental de China y la zona septentrional y central de México hacen frente a una situación similar.

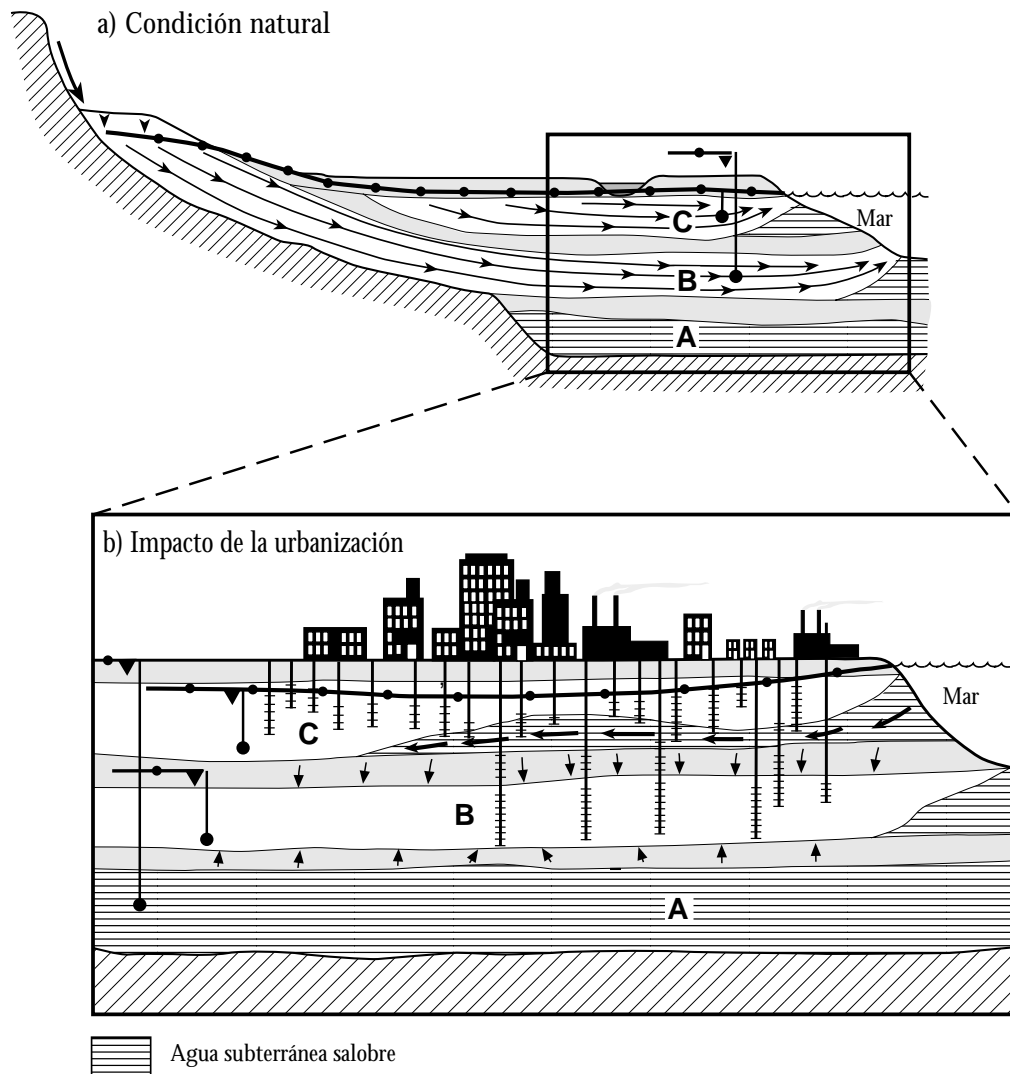
*Asentamiento del terreno.* Aunque puede haber asentamientos por varias razones, la extracción natural o por el hombre de aguas subterráneas (Cuadro 2.6) es una de las más comunes. El costo económico de las medidas para remediar la situación suele ser alto.

Los asentamientos diferenciales dañan los edificios, los caminos y otras estructuras superficiales, y pueden provocar roturas graves en las instalaciones subterráneas como las tuberías principales y secundarias, las tuberías de alcantarillado, los conductos de cables, los túneles y los tanques subterráneos. En las ciudades situadas en una topografía plana, los asentamientos pueden alterar las redes de drenaje de los ríos y canales, lo que puede a su vez aumentar el riesgo de inundaciones o, en el caso de ciudades ribereñas, de inundación por mareas.

Los efectos del asentamiento en los valles intermontanos que contienen depósitos lacustres pueden ser graves y costosos, como en el caso de la Ciudad de México, donde ha habido cambios en el nivel del suelo de hasta nueve metros a causa de la extracción excesiva de agua subterránea. Los efectos pueden ser más graves en zonas costeras bajas, donde incluso una pequeña caída de la superficie del terreno puede aumentar el riesgo de inundaciones. En esos casos, el costo de las medidas de control adicionales y de las estructuras de protección es elevado.



**Gráfico 2.4.** Evolución de los problemas de calidad del agua subterránea en un sistema acuífero aluvial costero típico tras una urbanización rápida



- C** Acuífero poco profundo de extensión limitada; recarga rápidamente contaminada por la urbanización y resultante de la disposición de efluentes domésticos/industriales y de la extracción excesiva/la intrusión de agua de mar.
- B** Acuífero semiconfinado más profundo pero susceptible al deterioro de la calidad a través de la infiltración vertical de arriba abajo, y de los pozos mal contruidos, después de su desarrollo.
- A** Acuífero de canal enterrado alojando aguas subterráneas palaeosalinas.

# 3

## CUESTIONES RELACIONADAS CON LA GESTIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS URBANAS

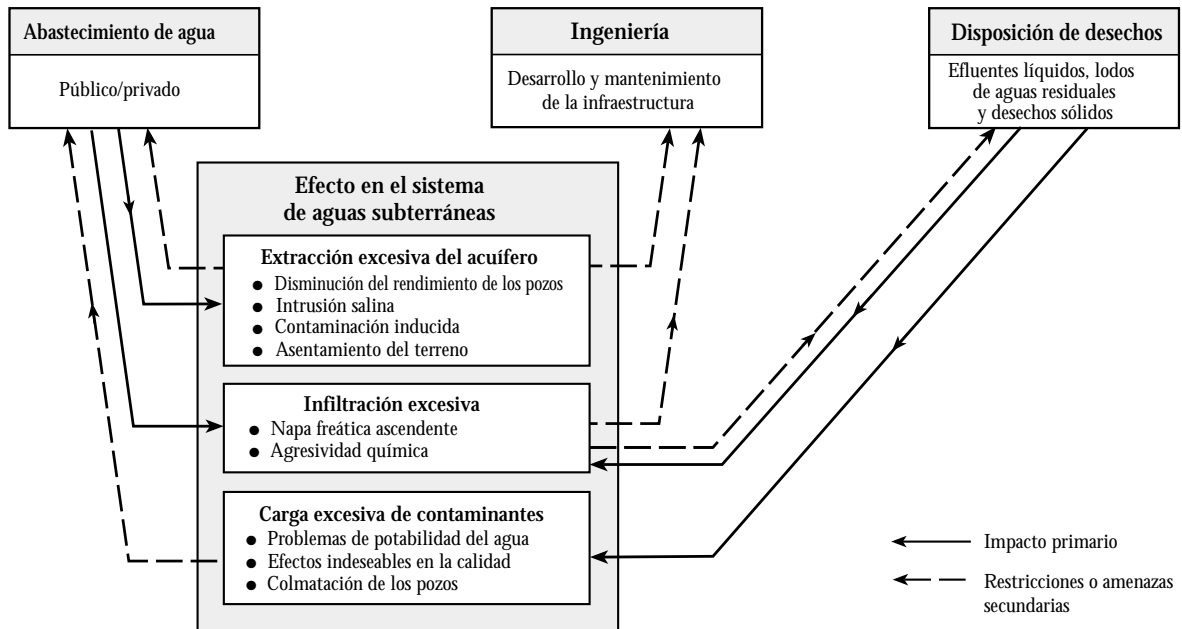
### Análisis desde diferentes perspectivas

Los principales servicios e instalaciones urbanos que guardan relación directa o indirecta con las aguas subterráneas (Gráfico 3.1) son:

- El abastecimiento de agua.
- La eliminación de aguas servidas y la disposición de desechos sólidos.
- Las intervenciones de ingeniería, edificios y otra infraestructura conexos.

Los primeros dos afectan directamente el sistema de aguas subterráneas y pueden ocasionar varios problemas o amenazas graves para todos los aspectos del desarrollo urbano (Gráfico 3.1).

Gráfico 3.1. Interacción entre los servicios e instalaciones urbanos a través del sistema subyacente de aguas subterráneas



El personal profesional y administrativo de las entidades municipales que prestan estos servicios suele tener perspectivas diferentes sobre las cuestiones relacionadas con las aguas subterráneas. Esas diferencias afectan el desarrollo y el mantenimiento de los servicios respectivos. Los estudios de casos en que se describen los problemas en el contexto de situaciones urbanas reales (Recuadros 3.1 a 3.5) ponen de relieve varias observaciones formuladas en este capítulo.

### *Abastecimiento de agua*

Las aguas subterráneas son frecuentemente una fuente importante o principal de abastecimiento de agua. Su uso para el abastecimiento puede limitarse a unos pocos pozos de alto rendimiento o a campos de pozos explotados por la empresa municipal, pero normalmente entraña también un número mucho mayor de fuentes de abastecimiento privadas. Estas últimas incluyen a menudo pozos industriales y comerciales y un gran número de pozos de bajo rendimiento para uso doméstico.

Las perspectivas de las empresas municipales y de los extractores privados (residenciales e industriales) con respecto a los problemas de abastecimiento de agua son en general similares. La disminución de la disponibilidad y el empeoramiento de la calidad de las aguas subterráneas son problemas que afectan a ambos. Estos problemas pueden aumentar los costos de producción, generar quejas de los clientes sobre inconvenientes en la calidad del agua (como las manchas de herrumbre en la ropa lavada) y/o causar peligros para la salud pública. Los extractores municipales y privados pueden también estar preocupados por el establecimiento o la protección de derechos legales para la extracción de aguas subterráneas. Sin embargo, su posición respecto de esos problemas y las opciones para hacerles frente son bastante diferentes.

Los servicios municipales tienden a adoptar una perspectiva amplia. Aunque les afectan sin duda los problemas específicos del lugar, les preocupan sobre todo la escasez general de recursos y los problemas de calidad costosos o imposibles de tratar. Pueden considerar la posibilidad de recurrir a fuentes alternativas de agua fuera del núcleo de la ciudad, en zonas periurbanas y en la zona rural circundante (Recuadro 3.1). Sin embargo, el aprovechamiento de aguas subterráneas situadas fuera de los límites de la ciudad puede hacer que los servicios municipales entren en conflicto con otros usuarios importantes del agua subterránea, en especial en el caso del riego agrícola.

Los extractores privados residenciales e industriales tienen inevitablemente que adoptar un punto de vista más estrecho. Les preocupa sobre todo la disminución del rendimiento y el deterioro de la calidad de los pozos en las tierras que poseen u ocupan. Además, sus opciones para hacer frente a los problemas son limitadas porque están generalmente restringidas al sitio específico de que se trata. Pueden estar en condiciones de tratar las aguas subterráneas (por lo menos en el caso de algunos problemas de calidad) o de profundizar sus pozos (en esfuerzos por solucionar los problemas de reducción de rendimiento). En última instancia, la decisión acerca de la continuación del uso dependerá de la confiabilidad y el costo del suministro, en comparación con el costo de los servicios municipales.

### *Eliminación de aguas servidas y disposición de desechos sólidos*

Los funcionarios municipales que se ocupan de la eliminación de las aguas servidas consideran la subsuperficie desde una perspectiva muy diferente, incluso cuando están empleados por la misma empresa municipal de abastecimiento de agua y aún más cuando el servicio de eliminación está organizado sobre una base *ad hoc*.

La primera cuestión que se plantea es si la disposición de efluentes líquidos en el suelo es factible. Puede no ser así en el caso en que la capacidad de infiltración es baja como resultado de un nivel freático poco profundo o un estrato superficial relativamente impermeable. Estas condiciones pueden impedir la instalación o afectar el funcionamiento de sistemas de saneamiento convencionales en el lugar, como las letrinas de pozo o los tanques sépticos. Otra complicación es una posible entrada importante de aguas subterráneas en la red de alcantarillado proveniente de cuerpos de agua subterránea poco profundos o colgados. El incremento resultante de los volúmenes de aguas servidas puede aumentar los costos de tratamiento.

Un segundo conjunto de cuestiones que deben tener siempre en cuenta los que se ocupan de la eliminación de las aguas servidas y la disposición de los desechos sólidos es el impacto de la descarga de aguas servidas y la disposición de desechos en la calidad de las aguas subterráneas. Es preciso considerar en particular lo siguiente:

- Si el tipo y la densidad de los sistemas de saneamiento *in situ* tienen un efecto serio en la calidad de las aguas subterráneas.

**Recuadro 3.1. Separación del abastecimiento de agua y la disposición de aguas servidas en acuíferos vulnerables—Mérida (México)**

Mérida, una ciudad de 535.000 habitantes, está situada sobre caliza cárstica no confinada sumamente permeable, de donde obtiene la totalidad de su abastecimiento de agua equivalente a 240 Ml/d. La mayor parte de esas aguas se importa de campos de pozos situados fuera de los límites de la ciudad, pero en 1992 los pozos perforados suburbanos proporcionaban todavía alrededor del 35% del abastecimiento público de agua.

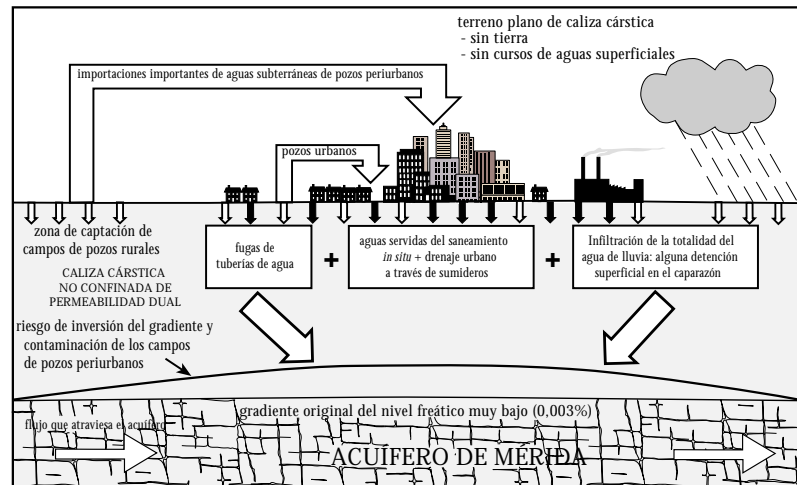
No hay alcantarillado ni sistema de drenaje pluvial, y todas las aguas servidas se devuelven al suelo a través de unidades de saneamiento *in situ* y del drenaje superficial a través de sumideros. A causa de esto, y del suministro de agua per cápita elevado (460 l/d), la infiltración urbana es muy alta (600 mm/a) y considerablemente mayor que la recarga periurbana, de alrededor de 100 mm/a.

Las aguas poco profundas situadas inmediatamente por debajo de la ciudad muestran una grave contaminación microbiológica, aunque las infiltraciones de nitrato y de cloruro se mantienen parcialmente controladas gracias a la

densidad de población relativamente baja, la dilución proporcionada por el aumento de la recarga y el importante flujo en el acuífero. Se teme que estas aguas contaminadas puedan migrar hacia los principales campos de pozos situados fuera de la ciudad.

La napa freática está entre cinco y nueve metros por debajo de la superficie, con un gradiente muy bajo (un metro en 35 kilómetros). Pese a la elevada recarga urbana, sólo hay una protuberancia poco pronunciada de la napa freática bajo la ciudad a causa de la alta permeabilidad del acuífero. Así pues, a las tasas de extracción de 1992, hay poca modificación del flujo de agua subterránea y el riesgo de que regresen aguas subterráneas urbanas hacia los pozos periurbanos es bajo. Sin embargo, algunos modelos sugieren que si se duplican la población y la extracción, la recarga urbana podría fluir hacia esos pozos y se necesitarían tratamiento y vigilancia adicionales de la calidad del agua. Es necesario también definir y proteger las zonas de captación de esos pozos.

**Gráfico R3.1. Modelo conceptual del sistema de aguas subterráneas situado bajo Mérida (México)**



**Cuestiones relacionadas con el abastecimiento de agua y la disposición de aguas servidas**

- El uso del acuífero a la vez para abastecimiento de agua y la disposición de las aguas servidas (aunque con separación espacial de las funciones) se reivindica y se justifica a causa del costo excesivo y el impacto ecológico de la alternativa de alcantarillado.
- Es probable que la futura expansión de la ciudad ponga en conflicto esas funciones.
- Debe eliminarse gradualmente el uso de pozos urbanos para el abastecimiento público.

**Necesidades relacionadas con la gestión del agua**

- Se debe alentar el bombeo de aguas subterráneas dentro de la ciudad para usos no potables.
- Deben reducirse las fugas en la transmisión y el uso santuario.
- Deben reforzarse las zonas de protección para los campos de pozos periurbanos.
- Deben construirse nuevos campos de pozos más lejos de los límites de la ciudad.

- Si la ubicación de las redes de alcantarillado y la calidad de las aguas servidas descargadas aguas abajo, junto con su reutilización para el riego agrícola, perjudican los intereses de los usuarios de las aguas subterráneas a través de la infiltración de una recarga de mala calidad.
- Si la ubicación, el diseño y el funcionamiento de los rellenos sanitarios que reciben desechos sólidos son aceptables desde el punto de vista de los lixiviados que afectan la calidad del agua subterránea.

Cuando no hay un órgano de reglamentación con recursos y facultades adecuados, rara vez se tienen debidamente en cuenta estas cuestiones. Sin embargo, si los que se ocupan del abastecimiento del agua son conscientes de los impactos potenciales, pueden actuar en bien del interés público para proteger las aguas subterráneas a través de reglamentos locales.

### *Infraestructura*

Hay cuestiones relacionadas con las aguas subterráneas que conciernen a los ingenieros municipales responsables del desarrollo y mantenimiento de los edificios y la infraestructura urbana. Esto puede ser resultado de una caída considerable de los niveles freáticos causada por la extracción para el abastecimiento en algunas condiciones del terreno, o de un nivel freático ascendente causado por tasas de infiltración en aumento cuando la extracción de agua subterránea es mínima a causa de la calidad inaceptable.

Los impactos que suelen comunicarse con más frecuencia pueden clasificarse como sigue:

- *Nivel freático descendente*: daño físico a los edificios y las instalaciones subterráneas tales como túneles, alcantarillas y tuberías de agua como resultado del hundimiento y asentamiento del terreno.
- *Nivel freático ascendente*: daño a las estructuras de ingeniería subsuperficiales ligeras como resultado del incremento del empuje ascendente hidrostático, inundación de instalaciones subterráneas, ingreso excesivo de aguas subterráneas en las alcantarillas, y/o ataques químicos a los cimientos de hormigón, las instalaciones subsuperficiales y las estructuras subterráneas, cuando las aguas subterráneas están contaminadas con una acidez elevada o con altas concentraciones de sulfatos o solventes orgánicos.

La reducción de esos daños o la recuperación del costo de las medidas correctivas es un problema que enfrentan los responsables del mantenimiento de los edificios e infraestructura urbanos. Sin embargo, pocas veces puede hacerse algo al respecto, porque la atribución a los distintos extractores o contaminadores es difícil. En general, es la comunidad en su conjunto quien soporta los costos a través de impuestos o tarifas. Aún más injusto es el hecho de que los dueños de las propiedades damnificadas terminan a menudo teniendo que absorber parte de los costos.

## **Evolución de los problemas**

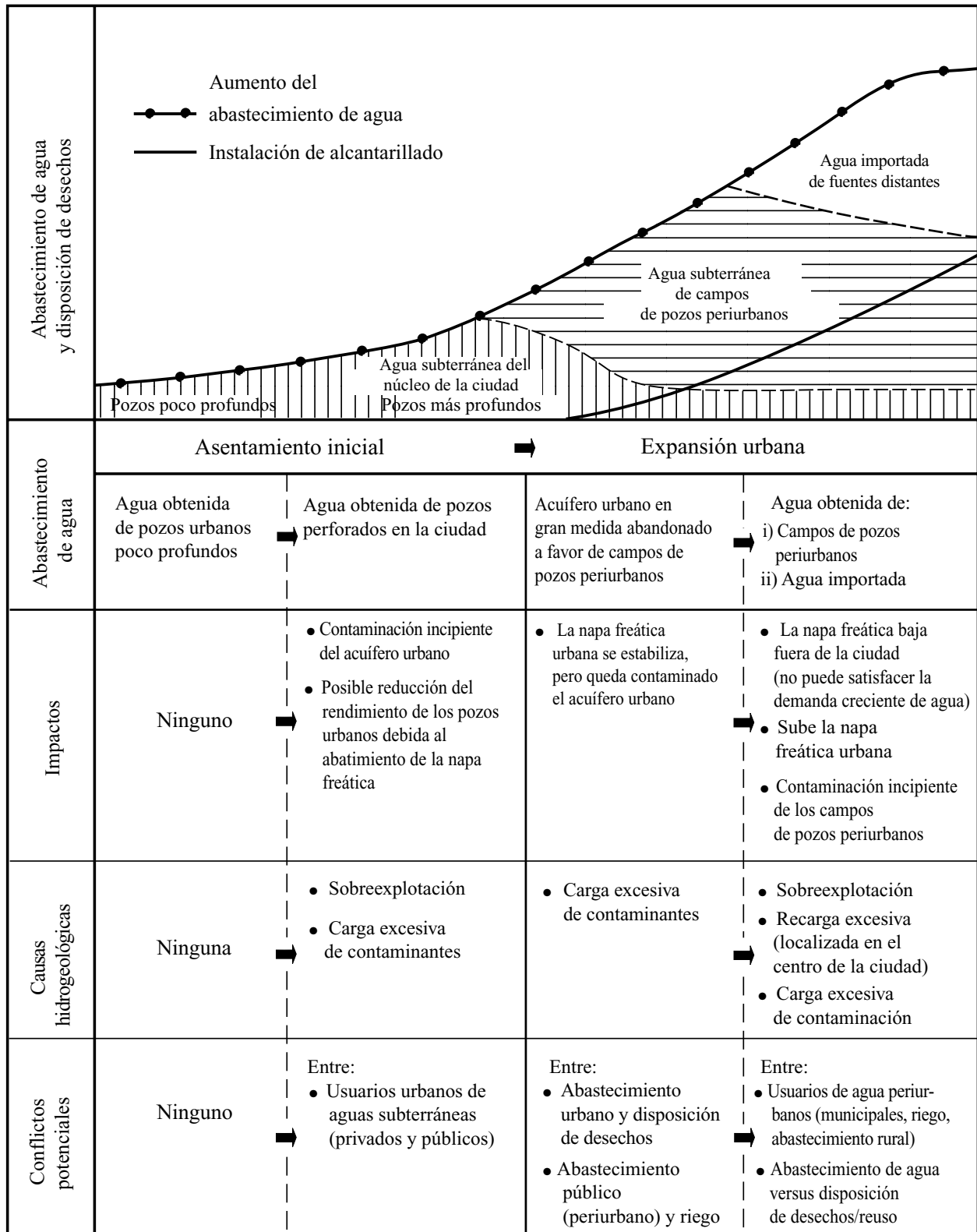
### *Cambios temporales y espaciales*

Los problemas de las aguas subterráneas urbanas evolucionan durante muchos años o décadas. Si bien esto refleja en parte el crecimiento de la población urbana y el aumento concomitante de la demanda de agua y de los desechos generados, es en mayor medida consecuencia de la gran capacidad de almacenamiento y el bajo ritmo de respuesta de la mayoría de los sistemas de aguas subterráneas.

En las etapas iniciales del desarrollo urbano, las aguas subterráneas se extraen generalmente de pozos que penetran en el acuífero menos profundo (normalmente freático) dentro del núcleo urbano inmediato (Gráfico 3.2). A medida que las ciudades crecen y las poblaciones aumentan, hay dos consecuencias comunes, a saber: a) el descenso general del nivel freático, con efectos secundarios que son a veces virtualmente irreversibles, y b) la disposición indiscriminada de efluentes residenciales e industriales y de desechos sólidos en el suelo, que produce una contaminación difundida de las fuentes de aguas subterráneas poco profundas.

La combinación de estos impactos lleva generalmente al organismo municipal a abandonar sus pozos poco profundos y reemplazarlos con pozos perforados más profundos si las condiciones hidrogeológicas imperantes lo permiten. Los organismos encargados del agua prefieren los pozos más profundos porque extraen inicialmente aguas subterráneas no contaminadas de acuíferos más protegidos (semiconfinados) y permiten rendimientos superiores como

Gráfico 3.2. Evolución urbana desde la perspectiva de los recursos de aguas subterráneas



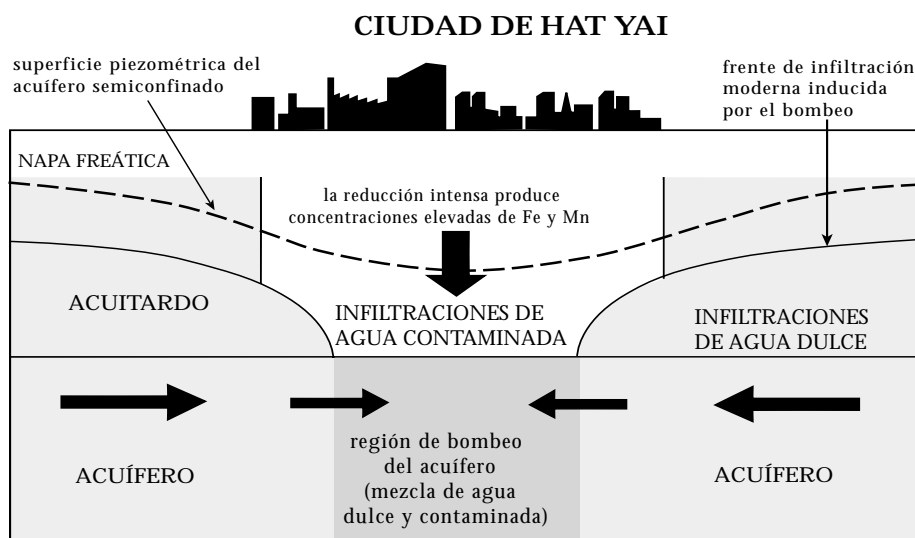
**Recuadro 3.2. Deterioro de la calidad de las aguas subterráneas profundas inducida por la contaminación—Hat Yai (Tailandia)**

Puede haber deterioro de la calidad debido a la descarga de contaminantes en las aguas subterráneas o a la movilización de metales presentes en la matriz del acuífero como resultado de cambios en el potencial de oxidación-reducción (redox) de las aguas subterráneas. Esta última situación se observa en Hat Yai, donde la infiltración de aguas servidas ricas en sustancias orgánicas desde los canales hasta el acuífero subyacente poco profundo ha producido aguas subterráneas fuertemente reductoras. Se han movilizado en consecuencia el hierro y el manganeso naturalmente presentes de los minerales sedimentarios.

La zona urbana de Hat Yai, situada en la región meridional de Tailandia (140.000 habitantes), depende del agua subterránea extraída mediante pozos privados de un acuífero aluvial semiconfinado que proporciona casi el 50% de su

abastecimiento. La capa semiconfinante suprayacente consiste en 30 metros de limos con una napa freática poco profunda. Una gran cantidad de aguas servidas urbanas se descargan en el suelo, directamente mediante el saneamiento *in situ* o a través de infiltraciones de los canales de drenaje. Los desechos se degradan en general rápidamente, pero el agua subterránea queda muy pronto privada de oxígeno. Como consecuencia de esto, el hierro y el manganeso se transforman en una forma iónica más soluble y su concentración aumenta significativamente, por encima de las directrices de la OMS de 0,3 y 0,1 mg/l, respectivamente. Hay también nitrógeno derivado de las aguas servidas principalmente en la forma reducida y preocupante de amoníaco, en lugar de nitrato.

**Gráfico R3.2. Modelo conceptual del sistema de aguas subterráneas situado bajo Hat Yai**



*Cuestiones relacionadas con el abastecimiento de agua y la disposición de las aguas servidas*

- En las ciudades situadas a bajos niveles, la disposición de los efluentes sin tratar se realiza a menudo en corrientes de agua superficiales, que pueden convertirse en una fuente importante de recarga de mala calidad de las aguas subterráneas.
- La extracción de agua subterránea de los acuíferos más profundos puede inducir filtraciones considerables de agua subterránea menos profunda contaminada.
- Las concentraciones elevadas de hierro, manganeso y amoníaco pueden hacer que algunos usuarios privados de aguas subterráneas abandonen sus pozos.

*Necesidades relacionadas con la gestión del agua*

- Se debe alentar el uso del agua subterránea dentro de los límites de la ciudad para usos no potables.
- Se deben recubrir los canales o instalar sistemas de alcantarillado o sistemas privados de tratamiento a cargo del usuario.
- Debe introducirse la gestión de la demanda para dar incentivos para alentar un uso más eficiente del agua y para reducir las pérdidas en la transmisión.
- Deben establecerse campos de pozos periurbanos para satisfacer la demanda creciente de agua potable, y ampliar la superficie de extracción.

### Recuadro 3.3. Reutilización de las aguas servidas industriales para el riego: Problemas y posibles soluciones—León (Guanajuato, México)

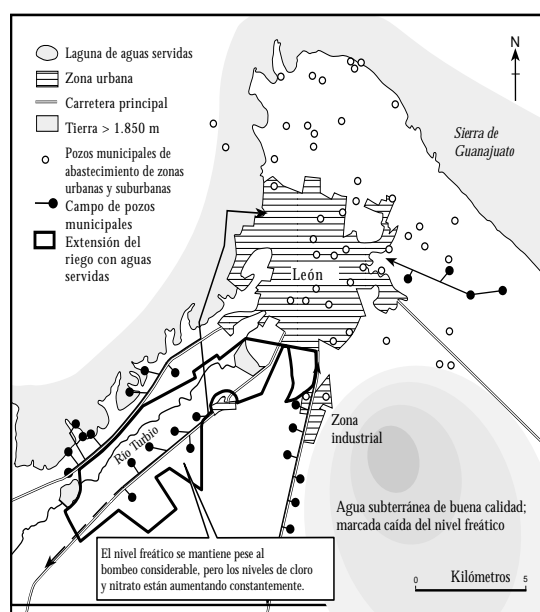
León (1,2 millones de habitantes en 1990), una de las ciudades de más rápido crecimiento de México, depende mucho del agua subterránea para el abastecimiento público. El agua se extrae principalmente de acuíferos situados aguas abajo, incluso en zonas donde se usan aguas servidas de la ciudad para el riego agrícola. León genera aguas servidas contaminadas de alta salinidad y alto contenido de cromato porque es uno de los principales centros de procesamiento de cuero y fabricación de calzado de América Latina (con más de 500 curtiembres y fábricas).

En un estudio reciente se demostró que las tasas elevadas de recarga provenientes del exceso de riego al sudoeste de la ciudad han ayudado a mantener los niveles freáticos a 10 metros de la superficie, a pesar de la extracción intensiva de horizontes más profundos. En las zonas adyacentes, los niveles freáticos están bajando entre dos y cinco metros por año. Sin embargo, hay problemas graves de salinidad proveniente del agua de riego que están empezando a afectar varios pozos de producción en la zona regada con aguas servidas. En el pozo más seriamente afectado, la concentración de cloro pasó de 100 mg/l 230 mg/l en dos años, pese a que los tubos de este pozo tienen rejillas situadas a entre 200 y 400 metros de profundidad.

En contraste con esto, aunque las aguas servidas contienen también grandes concentraciones de sales de cromo, la concentración en las aguas subterráneas sigue siendo baja. Las muestras de suelo han confirmado que se están acumulando cromo y otros metales pesados en el suelo, y que muy poca cantidad pasa por debajo de una profundidad de 0,3

metros. Puede verse así que el componente más tóxico de un efluente no es necesariamente el que plantea la amenaza más grave para las aguas subterráneas, y este ejemplo destaca la importancia de comprender el mecanismo de transporte de contaminantes en la subsuperficie. En el futuro será preciso hacer frente al problema del aumento de la salinidad.

Gráfico R3.3. Zona de riego con aguas servidas en León



#### Cuestiones relacionadas con el abastecimiento de agua y la disposición de las aguas servidas

- El empleo de aguas servidas municipales para el riego maximiza el potencial de reuso, pero tiene consecuencias para la calidad del agua subterránea.
- La consecuencia más negativa en este caso es el aumento de la salinidad de las aguas subterráneas, que podría llegar a 400 mg/l para 2010 en fuentes clave de abastecimiento público (el límite propuesto por la OMS es de 250 mg/l).
- Algunos estudios detallados muestran que no es probable que el cromo y los microorganismos patógenos de las aguas servidas afecten el uso de las aguas profundas, aunque podría haber problemas a largo plazo con los nitratos.

#### Necesidades relacionadas con la gestión del agua

- Es preciso abandonar el suministro de los pozos afectados y reducir así la infiltración descendente inducida. Sin embargo, esto plantea el peligro de un movimiento lateral hacia campos de pozos adyacentes (actualmente no afectados), y también de escasez en el suministro.
- Debe establecerse la recolección y el tratamiento por separado de la mayor parte de los efluentes salinos, pero eso tarda mucho tiempo en tener efecto.
- Se debe reducir la lámina de riego y ampliar la superficie regada con aguas servidas mediante el bombeo de aguas subterráneas poco profundas para interceptar y reciclar las aguas subterráneas situadas más arriba; puede haber algunas consecuencias para los tipos de cultivo y la fertilidad del suelo.
- Es preferible una combinación de las tres opciones.



resultado del mayor descenso de nivel disponible. Sin embargo, la explotación de acuíferos más profundos puede ser sólo una solución temporal, porque el bombeo creciente de esas formaciones invierte generalmente el gradiente hidráulico vertical dentro del sistema acuífero e induce un flujo hacia abajo considerable de los acuíferos contaminados superyacentes (Recuadro 3.2).

Los organismos municipales de agua tienden también a obtener suministros adicionales de pozos periurbanos y/o de fuentes superficiales distantes. La importación de grandes volúmenes de agua de fuera del núcleo de la ciudad produce generalmente aumentos importantes de la recarga urbana, sobre todo a causa de fugas de las redes de agua potable e infiltraciones provenientes de los sistemas de saneamiento *in situ*, que pueden, a largo plazo, llevar a una recuperación del nivel freático (Recuadro 3.1).

La instalación de redes de alcantarillado se hace generalmente en respuesta a una alta densidad de población y a la dificultad consiguiente del acceso necesario para el mantenimiento de los sistemas en el lugar, o de la capacidad insuficiente de infiltración del suelo resultante de la escasa permeabilidad del subsuelo y/o del nivel freático elevado. La instalación progresiva de redes de alcantarillado hace generalmente que se descarguen grandes volúmenes de agua fuera de la ciudad aguas abajo en zonas ribereñas, a menudo con apenas un mínimo tratamiento primario incidental (Recuadro 3.3). Esto puede tener un impacto importante en los recursos de agua subterránea en general y en las fuentes de agua subterránea existentes en esos lugares.

#### *Condiciones incipientes en comparación con condiciones maduras*

El elemento temporal es crucial cuando se consideran los problemas de las aguas subterráneas. Los que participan en la gestión de los recursos de agua deben reconocer que los:

- problemas evolucionan normalmente a lo largo de períodos prolongados.
- problemas maduros son en general mucho más difíciles de encarar que los incipientes.
- beneficios de las medidas adoptadas se producen con frecuencia a lo largo de un tiempo considerable.

Así pues, un requisito importante para una gestión efectiva es que los sistemas de vigilancia de las aguas subterráneas sean suficientemente sensibles para detectar los problemas en una etapa incipiente. Los problemas más maduros se desarrollan generalmente cuando los controles sobre la extracción de agua subterránea y la descarga subsuperficial de contaminantes son débiles, y cuando no hay ninguna estrategia eficaz a largo plazo para la explotación de las aguas subterráneas.

El problema se complica cuando hay un gran número de pozos privados que extraen agua. Cuando se teme que haya una sobreexplotación de las aguas subterráneas, suele limitarse la extracción municipal, sin preocuparse por los pozos privados. La consecuencia suele ser una epidemia de perforación de pozos privados, y la sustitución de una cantidad moderada de fuentes de suministro municipales (que por lo menos podrían controlarse, vigilarse, protegerse y tratarse sistemáticamente) por un gran número de fuentes privadas (Recuadro 3.4). Se trata a menudo de pozos de menor profundidad, mal situados y mal construidos, y por lo tanto mucho más vulnerables a la contaminación. Generalmente no están vigilados ni tratados, con lo que aumentan los riesgos para la salud. En algunos casos, un problema adicional es su conexión ilegal con las tuberías de agua corriente, sin medidas para prevenir el reflujo en momentos de presión reducida, con lo que se contamina a los usuarios situados corriente abajo.

Rara vez se conocen las cantidades totales de agua bombeada. En muchos casos aumenta, en lugar de disminuir, la explotación global del agua subterránea, pese a los temores acerca de la intrusión salina y/o los asentamientos del terreno. Muchos pozos perforados tienen sellos sanitarios deficientes y permiten así la rápida migración de contaminantes hacia acuíferos más profundos de alta calidad. Cuando los pozos poco profundos se profundizan progresivamente para llegar tanto a los acuíferos confinados como a los poco profundos, esos pozos pueden actuar como conducto para la contaminación cruzada producida por diferencias de carga entre los dos acuíferos.

### **Causas subyacentes de los problemas de gestión**

En este capítulo se han identificado varias cuestiones relacionadas con el aprovechamiento de las aguas subterráneas que ponen en peligro o reducen la sostenibilidad del desarrollo urbano, y a las que es preciso hacer frente. En resumen, esas cuestiones son consecuencia de dos causas subyacentes (Cuadro 3.1):

- La extracción mal controlada de las aguas subterráneas.
- La carga excesiva de contaminantes subsuperficiales.

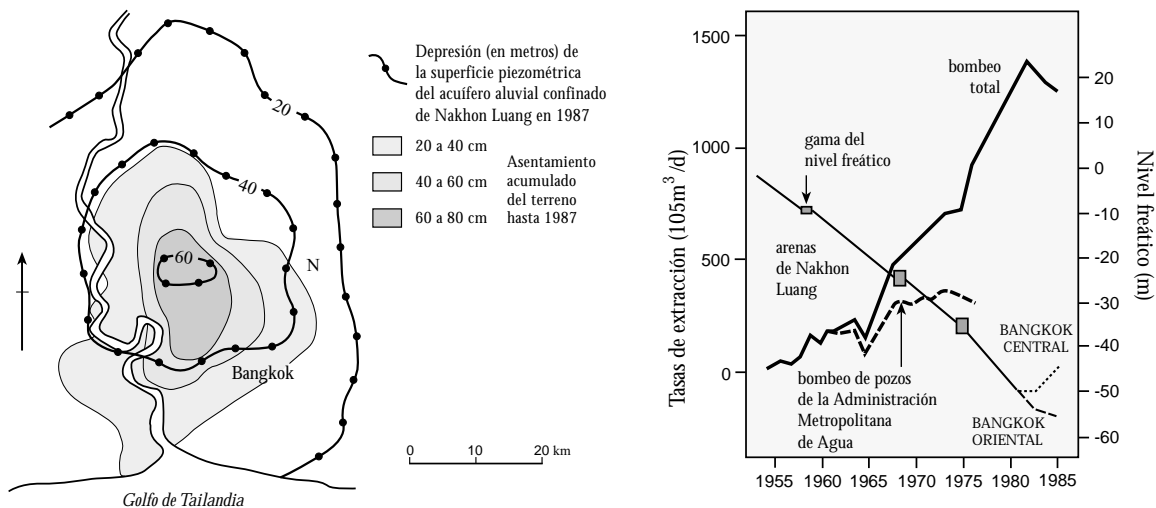
### Recuadro 3.4. El problema de la extracción privada no reglamentada—Bangkok (Tailandia)

En Bangkok (5,9 millones de habitantes), un sistema acuífero aluvial profundo ha sido muy explotado para el abastecimiento de agua. Esto ha producido una depresión importante del nivel freático, que llegaba a 60 metros a mediados de los años ochenta ocasionando asentamientos considerables del terreno y un aumento de la salinidad de las aguas subterráneas.

La Administración Metropolitana de Agua había hecho anteriormente intentos exitosos de reducir su extracción de agua, pero no impuso inicialmente ningún control sobre la extracción privada, la cual aumentó de tal modo que para comienzos de los años ochenta superaba en mucho la extracción municipal. Esto ha complicado los esfuerzos por hacer una gestión del acuífero que mitigue los problemas.

La adopción de medidas como la restricción del bombeo en zonas seleccionadas o la adaptación de la calidad del agua bombeada al uso final resultan mucho más difíciles cuando se pasa de la reglamentación de unos pocos extractores importantes a la reglamentación de un gran número de usuarios en una economía con un alto espíritu empresarial. Se está procurando ahora limitar la extracción por bombeo privado a través de un sistema de licencias y tarifas, y de la prohibición de la perforación de nuevos pozos, pero esto último no puede ponerse en práctica en las zonas donde no hay ninguna otra fuente de abastecimiento.

Gráfico R3.4. Extracción de agua subterránea y tendencias en los niveles en la zona metropolitana de Bangkok, con los correspondientes asentamientos acumulados del terreno



#### Cuestiones relacionadas con el abastecimiento de agua y la disposición de las aguas servidas

- El bombeo sin restricciones puede causar asentamientos del terreno, al igual que intrusión salina, en el acuífero.
- Cuando se limita solamente la extracción municipal, es posible que se estimule aún más la extracción privada no controlada.
- La ausencia de un control eficaz impone un costo adicional considerable a los extractores públicos y privados por igual.

#### Necesidades relacionadas con la gestión del agua

- Es preciso mejorar la eficiencia del uso industrial y doméstico de modo que sea necesario extraer menos agua subterránea.
- Se debe maximizar el uso de las facultades especiales existentes en la legislación y aplicarlas a todos los usuarios importantes.
- Deben proporcionarse desincentivos para la extracción de agua subterránea de alta calidad para usos industriales no sensibles.

**Cuadro 3.1.** Problemas de las aguas subterráneas urbanas y requerimientos de gestión

<i>Causas subyacentes</i>	<i>Problemas resultantes</i>	<i>Requerimientos de gestión</i>
Extracción mal controlada de aguas subterráneas	Extracción excesiva de recursos de buena calidad dentro de los límites de la ciudad	Reservar las aguas más profundas de buena calidad para usos sensibles y fomentar el uso de aguas menos profundas de peor calidad para usos no sensibles
	Extracción excesiva de recursos de buena calidad en la periferia de la ciudad (competencia entre abastecimiento urbano y riego agrícola)	Reservar el agua subterránea de buena calidad para el abastecimiento de agua potable y utilizar en cambio las aguas servidas tratadas o las aguas poco profundas de peor calidad para el riego
Carga excesiva de contaminantes subsuperficiales	Contaminación de pozos/campos de pozos de abastecimiento municipales	Delimitar zonas de protección de las fuentes para el control prioritario de la carga de contaminantes superficiales
	Contaminación generalizada del agua subterránea	Reducir la carga de contaminantes en zonas seleccionadas, especialmente donde el acuífero es muy vulnerable, mediante medidas apropiadas de planificación o de mitigación  Planificar el tratamiento de las aguas servidas y su disposición teniendo en cuenta los intereses y el impacto en las aguas subterráneas
Infiltración urbana excesiva	Ascenso del nivel freático bajo la ciudad que causa: <ul style="list-style-type: none"> <li>● Inundación de los sótanos</li> <li>● Malfuncionamiento de las unidades de saneamiento <i>in situ</i></li> <li>● Inversión de la corriente del acuífero (con contaminación de los campos de pozos periurbanos con aguas subterráneas urbanas contaminadas)</li> </ul>	Reducir la infiltración urbana mediante <ul style="list-style-type: none"> <li>● El control de las fugas de redes de agua potable</li> <li>● La reducción de las infiltraciones de las unidades de saneamiento <i>in situ</i> mediante la instalación de redes de alcantarillado</li> <li>● El aumento de la extracción de aguas poco profundas (contaminadas) para usos no sensibles</li> </ul>

Además, en algunas situaciones en que la extracción no es posible o se ha abandonado, el exceso de infiltración urbana puede causar diferentes tipos de problemas (Cuadro 3.1).

La escala y la importancia de los impactos ocasionados por estas dos causas dependerán del medio hidrogeológico y de la evolución histórica del problema. Sin embargo, es evidente que para una gestión eficaz de las aguas subterráneas es necesario en todos los casos considerar la limitación de la extracción y el control de la carga de contaminantes subsuperficiales.

#### *Extracción mal controlada de las aguas subterráneas*

En la mayoría de los casos en que las aguas subterráneas son la fuente principal o única del abastecimiento urbano y los pozos de extracción están principalmente dentro de los límites de la ciudad, la tasa global de extracción de agua excederá de manera considerable la recarga a largo plazo. Esto tendrá más tarde o más temprano una serie de consecuencias económicas y ambientales negativas. Puede haber excepciones a esta regla general, pero en la gran mayoría de los casos, es claramente necesario imponer, como mínimo, limitaciones selectivas a la extracción de agua subterránea. Cuando el abastecimiento municipal se obtiene de pozos periurbanos, es preciso controlar la extracción para evitar posibles conflictos con el riego agrícola.

La situación rara vez es sencilla. En la práctica, cuando la extracción de agua subterránea de alta calidad es excesiva, habrá generalmente un volumen considerable de aguas subterráneas de menor calidad adecuadas para muchos usos. Se necesitan entonces incentivos para explotar el agua subterránea de menor calidad (por ejemplo, con intrusión salina o contaminación antropogénica) para usos privados no potables o industriales. A la inversa, por razones de salud pública, es a veces necesario prohibir la perforación o el uso de pozos privados para usos potables u otros usos sensibles en acuíferos poco profundos gravemente contaminados.

#### *Carga excesiva de contaminantes subsuperficiales*

Es difícil prevenir la contaminación de los acuíferos poco profundos en las zonas urbanas. Sin embargo, es esencial para los intereses de los extractores de agua potable subterránea que se limite la carga de contaminantes subsuperficiales a niveles por debajo de un límite crítico, que variará según la vulnerabilidad de los acuíferos subyacentes, las características de los contaminantes de que se trata y las modalidades y propósitos de la extracción de agua subterránea.

Muy a menudo, la urbanización procede sin ningún reconocimiento o consideración de los peligros de contaminación de las aguas subterráneas. Raramente se tiene esto en cuenta cuando se determina a) la máxima densidad aceptable para el desarrollo residencial con sistemas de saneamiento *in situ*, b) las prioridades para la instalación de redes de alcantarillado (Recuadro 3.5) y la ubicación y los sistemas de tratamiento para captar las descargas del alcantarillado; c) la ubicación de industrias de alto riesgo y los rellenos sanitarios para disposición de desechos, y d) otras decisiones clave de planificación urbana.

#### *Exceso de infiltración urbana*

A medida que las ciudades crecen, las tasas globales de infiltración, sobre todo en zonas sin alcantarillado alguno, serán considerablemente mayores que las que existían naturalmente antes de la urbanización. Cuando la extracción de agua subterránea no se ha desarrollado a causa de las características desfavorables del acuífero o la mala calidad natural del agua, o se ha abandonado a causa de la contaminación antropogénica, el exceso de infiltración urbana puede hacer que suba la napa freática, con consecuencias diversas, incluidas la inundación de sótanos y el mal funcionamiento de los sistemas de saneamiento *in situ*. Los mismos procesos pueden también generar otros impactos, que aunque menos impresionantes que los anteriores, también son perjudiciales, como la inversión de la dirección natural de la corriente de aguas subterráneas y el transporte de contaminantes derivados de los usos urbanos hacia los pozos municipales periurbanos.

En algunos casos, es preciso hacer frente a ese problema. Entre las medidas de mitigación cabe señalar:

- La reducción de las fugas de las redes de agua potable.
- La sustitución de los sistemas de saneamiento *in situ* por redes de alcantarillado.
- El aumento de la extracción de acuíferos poco profundos (aunque contaminados) para usos no sensibles.

En casos extremos, puede ser necesario construir drenajes importantes para el agua subterránea y/o redes de pozos de alivio de drenaje, como se hace en el sector sur de Teherán (Irán) y en partes de Riyadh (Arabia Saudita). Estos pozos bombean el agua y la conducen a sitios de desecho del líquido a través de canales recubiertos). Sin embargo, como el problema no está relacionado con el foco principal de este trabajo, a saber, la escasez y el costo crecientes del abastecimiento urbano de agua, y cómo ello afecta frecuentemente a las ciudades de ingresos más altos en una etapa posterior de su evolución, no se trata aquí con mayor detalle.

**Recuadro 3.5. Amenaza a largo plazo de la calidad de las aguas subterráneas planteada por el saneamiento in situ en un medio urbano de zona árida — Sana (Yemen)**

Sana, la capital de la República del Yemen, está experimentando un rápido crecimiento. La ciudad está situada en el centro de una cuenca intermontana, por encima de 2.200 metros de altura sobre el nivel del mar, encima de un terreno aluvial situado sobre un acuífero cretácico de arenisca. Alderwish y colaboradores (1996) han mostrado que la infiltración urbana constituye el principal componente de la recarga total del acuífero.

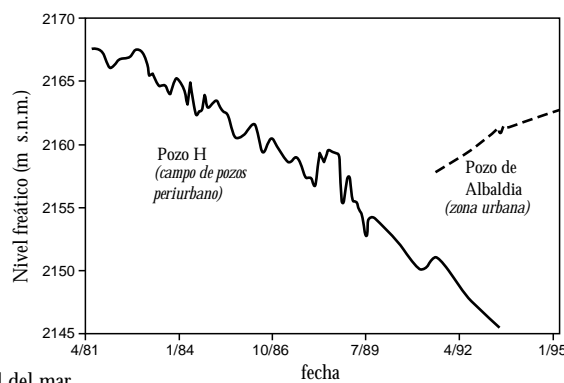
El agua para el abastecimiento urbano se extrae de dos campos de pozos perforados en la arenisca fuera de la ciudad que abastecen sólo el 30% del poco menos de un millón de habitantes de la ciudad. El uso por persona se calcula entre 100 y 120 l/d, con pérdidas de distribución del 30%. El 70% restante obtiene agua mediante tuberías o camiones cisterna de abastecedores privados cuyos pozos están en la zona urbana. El uso de agua es menor, entre 60 y 80 l/d por persona y, debido a la poca longitud de las tuberías, las pérdidas son menores (típicamente 20%).

La ciudad carece en su mayor parte de alcantarillado, y sólo un 12% de los hogares están conectados al sistema. La descarga de pozos negros constituye el principal componente de la recarga urbana y aportaba 12,5 Mm<sup>3</sup> en 1993

(75% del total estimado). Las fugas de tuberías proporcionaban 3,4 Mm<sup>3</sup>, con 1 Mm<sup>3</sup> de efluentes industriales y exceso de riego local, y una recarga adicional de infiltración del *wadi* durante inundaciones esporádicas.

Como resultado de la recarga urbana, los niveles freáticos de la ciudad están estabilizados o en aumento, especialmente en los pozos poco profundos, en contraste con la tendencia a niveles decrecientes en la cuenca. El acuífero aluvial muestra indicios claros de contaminación microbiológica, con concentraciones elevadas de nitrato y cloruro bajo las zonas más densamente pobladas. Se observan tendencias similares en el acuífero subyacente de arenisca, aunque no se ha detectado ninguna contaminación bacteriológica en los pozos más profundos. Tanto las tendencias químicas como los niveles piezométricos indican una infiltración descendente, que permite la transferencia de la recarga al acuífero principal, pero proporciona también una vía para los contaminantes. Aunque esto crea problemas potenciales para el futuro, en la actualidad la disposición en los pozos negros plantea un peligro inmediato menos importante para la salud pública, debido a la ausencia de recolección cloacal adecuada y de instalaciones de tratamiento.

**Gráfico R3.5. Recarga urbana que equilibra la extracción excesiva de aguas subterráneas en Sana (Yemen)**



m s.n.m.: metros sobre el nivel del mar.

**Cuestiones relacionadas con el abastecimiento de agua y la disposición de las aguas servidas**

- El saneamiento *in situ* en las zonas urbanas áridas mantiene los niveles freáticos pero afecta adversamente la calidad.
- La tendencia regional a la sobreexplotación limita las posibilidades de extensión de la cobertura actual de abastecimiento (30%) a la sustitución con suministros locales a medida que disminuye la calidad.

**Necesidades relacionadas con la gestión del agua**

- Es preciso extender las redes de alcantarillado y mejorar considerablemente el tratamiento de las aguas servidas; mejorará la calidad de la recarga, pero bajarán los niveles freáticos en la zona urbana.
- Se deben estudiar las posibilidades de aprovechamiento de las aguas subterráneas poco profundas para usos no sensibles en la ciudad.
- Es preciso aumentar las posibilidades de recarga de alta calidad fuera de los límites de la ciudad (por ejemplo, estanques de retención para captar la crecida de los *wadi*).

# 4

## *MEJORA DE LA GESTIÓN DE LOS RECURSOS DE AGUA SUBTERRÁNEA*

### **Marco institucional y dimensiones sociales**

Algunos consideran que un marco institucional firme es un requisito previo para mejorar la gestión de las aguas subterráneas, y casi todos lo consideran recomendable. El marco ideal debería incluir leyes con el fin de:

- Definir claramente los derechos de uso del agua (en forma separada de la propiedad de la tierra) a través de la concesión de licencias y el cobro de cánones para la explotación de las aguas subterráneas de una manera especificada.
- Establecer que la descarga de efluentes líquidos en el suelo, la disposición de desechos sólidos y otras actividades potencialmente contaminantes necesitan aprobación legal y/o de los planificadores.
- Crear un organismo nacional o local de reglamentación o administración que cuente con la pericia técnica, los recursos financieros y el apoyo jurídico necesarios para supervisar los procedimientos de concesión de licencias y asegurar su aplicación.

Los organismos de reglamentación de los países en desarrollo tropiezan a menudo con los siguientes problemas:

- La falta de personal y de fondos adecuados para vigilar en campo las tasas, los niveles y la calidad de la extracción, supervisar la calidad del abastecimiento de agua potable y las descargas de efluentes e inspeccionar las actividades potencialmente contaminantes.
- Las incertidumbres hidrogeológicas acerca de la magnitud de los recursos de agua subterránea en términos de recarga media y almacenamiento explotable, la escala probable de los efectos secundarios de la explotación y el nivel probable de riesgos potenciales de contaminación.

Así pues, la existencia de un marco jurídico adecuado no garantiza por sí sola una gestión y una protección adecuadas de los recursos de aguas subterráneas. En la práctica, cuando se trata del agua subterránea, hay pocos ejemplos en el mundo de gestión y protección activas de los recursos. La impotencia o la complacencia están muy difundidas, y el cumplimiento de las medidas de reglamentación varía considerablemente entre los países y también, en algunos casos, entre la capital y otras ciudades del mismo país. Sin embargo, algunas autoridades municipales han tomado medidas unilaterales para controlar la extracción y/o proteger los recursos de agua subterránea sobre la base de decretos del gobierno local y en bien del interés común. Aunque lejos de ser ideales, estos arreglos pueden ser eficaces, en particular cuando la autoridad municipal actúa en consonancia con grupos de usuarios de agua y cámaras industriales locales. Otra alternativa sería el nombramiento de un “grupo de recursos hídricos” especializado, independiente y con un contrato por un período dado.

El principal reto administrativo consiste en definir cómo ejercer algún grado de control sobre un gran número de pequeñas extracciones y descargas de contaminantes. Para lograr progresos reales, los organismos de reglamentación y las autoridades municipales deben generar un clima social favorable a la promoción de políticas sostenibles de asignación y protección de las aguas subterráneas. Necesitan para ello una acción concertada encaminada a crear conciencia pública y establecer un diálogo con los interesados sobre la situación de los recursos de aguas subterráneas y la necesidad de introducir medidas de gestión.

## Objetivos y metas de la gestión técnica

El objetivo básico debe ser llegar a un equilibrio razonable entre el mantenimiento de la disponibilidad y la calidad del abastecimiento de agua, la preservación de la infraestructura urbana y la disposición segura de los desechos. Estas metas pueden traducirse en los siguientes objetivos, en la medida en que guardan relación con los recursos de aguas subterráneas:

- Mejorar la sostenibilidad de la explotación de los recursos de agua subterránea en las zonas urbanas y sus alrededores —en el sentido más restringido del término— evitando la degradación irreversible de los sistemas acuíferos.
- Utilizar con mayor eficiencia los recursos disponibles y evitar la anarquía en la explotación de esos recursos y en la descarga de contaminantes en el terreno. Si no se hace así, se plantearán a largo plazo problemas económicamente costosos y jurídicamente complejos, y pueden surgir peligros para la salud.

Este enfoque es aplicable a una amplia gama de medios hidrogeológicos y a problemas incipientes en muchos medios urbanos. Sin embargo, los gerentes de los recursos hídricos tienen que aceptar que los beneficios de la limitación de la extracción y de la moderación de la carga contaminante subsuperficial sólo se realizan a largo plazo, especialmente cuando los problemas están muy arraigados, como ocurre, por ejemplo, bajo las ciudades muy grandes y predominantemente sin redes de alcantarillado donde la contaminación grave de las aguas subterráneas ya está muy difundida.

Estos objetivos son probablemente aceptables para la mayoría de los gerentes y dirigentes políticos nacionales. Sin embargo, no encaran cabalmente la cuestión de la equidad en la disponibilidad de los recursos ni en el uso del terreno para la disposición de efluentes y desechos. Estos objetivos tampoco consideran en qué medida deben protegerse los derechos preexistentes contra las actividades subsiguientes.

En términos hidrogeológicos y ambientales prácticos, los gerentes de recursos hídricos tienen que lograr los siguientes objetivos para alcanzar las metas estratégicas (Cuadro 4.1):

- Restringir los niveles de agua en los acuíferos situados bajo zonas urbanas dentro de una gama tolerable mediante el control de la magnitud (y uso final) de la extracción de agua subterránea.
- Mantener la carga de contaminantes subsuperficiales a niveles aceptables, teniendo en cuenta la vulnerabilidad de los acuíferos locales a la contaminación, planificar el uso de la tierra para reducir las fuentes potenciales de contaminación, y controlar selectivamente las descargas de efluentes y otras fuentes existentes de contaminación.

Además, los responsables de formular políticas deben equilibrar el uso de controles reglamentarios directos y de instrumentos económicos (incentivos financieros y sanciones) para alcanzar esos objetivos. En las siguientes secciones se tratan con más detalle las opciones de que disponen los gerentes de recursos hídricos urbanos a este respecto.

## Logro de los objetivos de gestión

### *Limitación de la extracción de aguas subterráneas*

El riesgo de deterioro casi irreversible de los acuíferos y de pérdida prematura de las inversiones de capital resultantes de la extracción sin restricciones de agua son tales que resulta necesario urgir a los gobiernos a imponer algún tipo de control sobre la explotación de los acuíferos como primer paso en la gestión positiva (por oposición a una gestión pasiva) de los recursos de agua subterránea (Recuadro 4.1).

La explotación irrestricta, sin control alguno, de las aguas subterráneas sólo puede considerarse tolerable en las primeras etapas de explotación de acuíferos extensos con grandes reservas de almacenamiento. En esta situación: a) es probable que las consecuencias del aprovechamiento excesivo temporal sean reversibles, b) no es preciso tener en cuenta las reducciones en la descarga de los manantiales y el flujo base de los ríos, y c) el resultado no llevaría a la inequidad social entre usuarios del agua. Aun así, esta política puede ser costosa. En Esmirna (Turquía) las industrias utilizaban las aguas subterráneas locales sin pagar canon alguno de extracción. En consecuencia, el uso de agua equivalía a un 70% más de lo que se requería técnicamente para los procesos en cuestión. Si esto se hubiera evitado, la municipali-

**Cuadro 4.1.** Gestión del abastecimiento de agua subterránea: Objetivos, problemas y medidas de mitigación

<i>Objetivos</i>	<i>Problemas experimentados</i>	<i>Metas</i>	<i>Medidas de mitigación</i>
Mantener el abastecimiento de agua subterránea	<ul style="list-style-type: none"> <li>Disminución en el rendimiento de los pozos debido a la caída de la napa fréatica</li> </ul>	Restringir los niveles freáticos	<ul style="list-style-type: none"> <li>Redistribuir/reducir la extracción (esto incluye la reducción de las fugas de las redes de agua potable)</li> <li>Aumenta la recarga urbana</li> </ul>
Salvaguardar la calidad del agua subterránea	<ul style="list-style-type: none"> <li>Calidad inaceptable para uso potable</li> <li>Costo de tratamiento excesivo</li> <li>Efectos secundarios de deterioro de la calidad</li> </ul>	Moderar la carga de contaminantes subsuperficiales	<ul style="list-style-type: none"> <li>Limitar la carga de contaminantes de fuentes identificadas, especialmente en los acuíferos vulnerables</li> <li>Restringir la densidad del desarrollo residencial en zonas vulnerables</li> <li>Control selectivo de los efluentes industriales</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Salinidad creciente debido a la intrusión de agua de mar</li> <li>Contaminación inducida</li> </ul>	Restringir los niveles freáticos	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zonificar el uso del suelo</li> <li>Controlar la ubicación y el diseño de los rellenos sanitarios</li> <li>Separar espacialmente la disposición de desechos del abastecimiento de agua subterránea</li> <li>Redistribuir y/o reducir la extracción</li> <li>Usar pozos para capturar agua indeseable</li> <li>Modificar la profundidad de los pozos de abastecimiento</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Contaminantes de tierras contaminadas movilizados por la subida de la napa fréatica</li> </ul>	Restringir los niveles freáticos	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aumentar la extracción de agua subterránea contaminada poco profunda para usos no sensibles</li> <li>Reducir la recarga urbana</li> </ul>

dad podría haber ahorrado unos US\$17 millones por año en gastos de abastecimiento de agua posteriores, equivalentes al 20% del gasto real total.

El enfoque más eficaz para el control de la extracción de agua subterránea es muy diferente en el caso de los acuíferos en las primeras etapas de desarrollo, sin señales incipientes de sobreexplotación, y en el de aquellos en que es preciso reducir la extracción total para mitigar los efectos de la sobreexplotación.

*Reglamentación del aprovechamiento de los acuíferos.* La manera más directa y sencilla de reglamentar la explotación de las aguas subterráneas es mediante el control de la perforación de los pozos (con inclusión de la profundidad, el diámetro y los niveles de las rejillas para la entrada de agua), y no mediante la concesión al usuario de una licencia para utilizar el agua después de realizada la perforación. Pero para llegar a una política equilibrada es preciso hacer frente a los dos elementos. Muchos consideran que la imposición de requisitos de licencia a las empresas de perforación de pozos para que puedan llevar a cabo esa actividad es una medida muy eficaz para controlar la extracción y mejorar las normas de construcción de los pozos. El control del proceso de construcción de los pozos puede posteriormente optimizar la explotación global del acuífero de manera de:

- Reservar las aguas subterráneas de buena calidad para usos potables y sensibles y fomentar el uso de aguas subterráneas de inferior calidad para procesos industriales no sensibles.
- Evitar la presencia de zonas locales muy sobreexplotadas y prevenir así que muchos usuarios de pozos tengan fallas de rendimiento o una ineficiencia excesiva.

Así pues, cualquier particular o empresa que quisiera perforar (o excavar) un pozo para explotar recursos de aguas subterráneas necesitaría el consentimiento del órgano de reglamentación, estaría legalmente obligado a adoptar un



**Recuadro 4.1. Reducción de la extracción de agua subterránea urbana en una economía dirigida para controlar los asentamientos del terreno—Tianjin (China)**

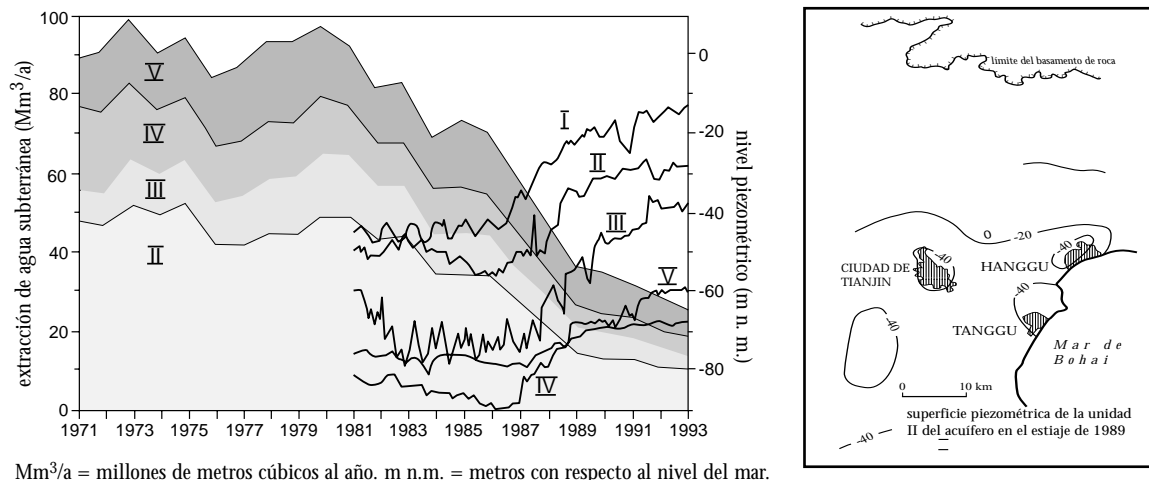
El Gran Tianjin es la tercera zona urbana de China y, junto con sus zonas costeras empresariales adyacentes de Hanggu y Tanggu, sostiene una población de nueve millones de personas. Está situada en una llanura costera plana geológicamente reciente situada por encima de una secuencia aluvial profunda de acuíferos múltiples. El acuífero superior es salobre y está separado por una formación arcillosa de acuíferos de agua dulce subyacentes, que se bombean en gran medida. La parte superior de este sistema de acuíferos múltiples está muy subconsolidada y experimenta tasas de compactación natural de entre uno y tres milímetros por año.

La extracción total de agua subterránea aumentó muy rápidamente a partir de 1960 hasta llegar a 1.200 Mm<sup>3</sup>/a en 1982, lo que produjo un asentamiento acumulado del terreno de 1,5 metros, a tasas por encima de 100 mm/a. La extracción en la ciudad de Tianjin se ha reducido ahora al

25% del pico de 1982, a través de limitaciones de la demanda y la creación de fuentes de suministro alternativas. Esto ha reducido las tasas de asentamiento a entre 10 y 20 mm/a.

Regionalmente, la agricultura sigue siendo el principal usuario de aguas subterráneas, con un bombeo total estimado de entre 600 y 700 Mm<sup>3</sup>/a, y la competencia por el agua subterránea ha ocasionado niveles freáticos deprimidos en la mayor parte de la zona de la llanura costera. Aunque la extracción de agua subterránea sigue estando muy subvalorada en las zonas urbanas, la gestión de la demanda ha tenido logros significativos, con un uso doméstico bajo (110 l/d/p) y un reciclaje industrial que llega al 75%. La excepción significativa es la agricultura, donde la eficiencia del riego es baja.

**Gráfico R4.1. Restricciones del bombeo de agua subterránea en Tianjin para reducir las tasas de asentamiento del terreno y el hundimiento general de la llanura costera**



**Cuestiones relacionadas con el abastecimiento de agua y la disposición de las aguas servidas**

- El rápido aumento del bombeo de aguas subterráneas durante los años sesenta hasta alcanzar tasas insostenibles produjo problemas graves de asentamiento del terreno.
- Mediante medidas no fiscales (economía dirigida), se ha limitado con éxito la demanda urbana, pero hay posibilidades limitadas de una mayor gestión de la demanda.
- El uso agrícola de las aguas subterráneas sigue siendo ineficiente, y ha dado como resultado una sobreextracción regional y una asignación ineficiente de recursos valiosos y escasos.

**Necesidades relacionadas con la gestión del agua**

- Se debe optimizar el uso del agua subterránea de mejor calidad dando prioridad al abastecimiento público y a los usos cuasipotables para industrias alimentarias.
- Es preciso mejorar la eficiencia del riego para reducir la extracción total.
- Se deben utilizar aguas servidas en lugar de aguas subterráneas bombeadas para regar los cultivos no sensibles; hay que considerar la posibilidad de instaurar un "mercado de derechos de agua" para intercambiar derechos de agua de pozo por aguas servidas canalizadas y utilizar las aguas subterráneas salobres para el riego costero de cultivos que toleran la sal.
- Se deben distribuir las extracciones de una manera más uniforme para reducir las diferencias de carga entre los acuíferos de agua salobre y agua dulce.

diseño técnico aprobado, a utilizar un perforador de pozos de agua autorizado, y a permitir la inspección de los trabajos. La entidad reguladora puede ofrecer asesoramiento técnico a los solicitantes y fomentar así mejores relaciones públicas y la obtención de datos confiables sobre los pozos perforados. Si los datos existentes son inadecuados y se contempla una extracción en gran escala, se necesitará un enfoque más tentativo en que se incorporen algunos estudios hidrogeológicos.

La instalación de un sello sanitario adecuado para los pozos de producción a fin de prevenir la contaminación en la boca del pozo reviste importancia fundamental. Las prácticas deficientes a este respecto siguen siendo el mecanismo más común de contaminación en el abastecimiento con agua subterránea, y urge establecer normas más exigentes.

El organismo de reglamentación debe mantener un registro de contratistas perforadores de pozos reconocidos que operan dentro de su zona de jurisdicción. Esos contratistas deben proporcionar periódicamente el programa para cada una de sus máquinas de perforación a fin de mantener el contacto y maximizar la recolección de datos (sobre registros de pozos y ensayos de bombeo), especialmente si se han perforado pozos en zonas no exploradas o críticas. Este procedimiento puede asegurar que todos los nuevos pozos perforados se registren y se ajusten a las especificaciones de diseño. Los organismos de reglamentación deben considerar la imposición de sanciones a las empresas perforadoras que persistentemente no se ajusten a esos requisitos.

Una vez construido un nuevo pozo, los solicitantes pueden obtener un permiso de extracción del organismo de reglamentación. La mayoría de esos organismos exoneran a los usuarios domésticos individuales de la obtención de una licencia o de pagar por la extracción. Sin embargo, debería requerirse también un permiso para las instalaciones domésticas y el organismo de reglamentación debería controlar la tasa de extracción indirectamente mediante la limitación de diámetro y la profundidad de la perforación. Sólo así se puede controlar la explotación global y evitar la explotación irracional. En el caso de los extractores más importantes, el organismo de reglamentación debería normalmente llegar a una decisión sobre el rendimiento permisible sobre la base de a) el estado de explotación de las aguas subterráneas en la zona afectada; b) los resultados de las pruebas de bombeo del pozo, y c) el uso propuesto.

Es preferible que el organismo de reglamentación imponga un gravamen inicial y/o cobre un canon anual por la extracción de agua subterránea. Esto puede basarse en la cantidad cuya extracción se autoriza o en la extracción anual real. Algunos piensan que esto último es preferible porque incluye un incentivo para que los usuarios reduzcan su cantidad autorizada si pueden mejorar la eficiencia en el uso del agua. En cualquier caso, se necesita un método sólido para estimar la extracción real, ya sea mediante medición o por métodos indirectos. Un sistema de tarifas con incrementos muy pronunciados para los grandes volúmenes puede proporcionar un incentivo para la introducción de eficiencias necesarias en el uso del agua. Muy a menudo, las tarifas de extracción son puramente nominales y no cubren siquiera los gastos de administración del órgano de reglamentación. Existe en todo el mundo una necesidad urgente de reformar los sistemas y cobrar cánones realistas, basados en uno o más de los criterios siguientes, dependiendo de la situación de los recursos hídricos locales:

- La recuperación de los gastos totales del órgano de reglamentación para la administración de la explotación de los recursos de agua subterránea y de las inversiones para su evaluación y vigilancia.
- El costo sombra del suministro alternativo de agua sin tratar para los usuarios interesados si se pierden los recursos de agua subterránea locales a causa de la degradación irreversible.
- El valor económico completo, incluida una provisión para cubrir el costo de externalidades ambientales probables asociadas con la extracción de las aguas subterráneas.

El enfoque más racional para determinar las tarifas anuales que se cobran por el agua subterránea consiste en aplicar un factor de ponderación a la tarifa cobrada por unidad de volumen, basado en lo siguiente:

- La proporción del uso del agua que es verdaderamente consuntivo.
- La calidad y la ubicación (en términos de las posibilidades de reutilización posterior) de los efluentes generados.
- La sensibilidad ambiental general de la extracción en términos espaciales y temporales. Debería asignarse un factor de ponderación más alto si la extracción se hace durante el estiaje, o en zonas costeras o cerca de elementos ambientalmente sensibles alimentados por aguas subterráneas.
- La calidad del agua obtenida. Debería asignarse un factor de ponderación más bajo si se extrae agua de mala calidad, con lo que se contribuye a proteger los recursos hídricos vecinos de alta calidad.

En algunas zonas urbanas, sólo puede ser posible introducir incentivos apropiados para optimizar el uso de recursos escasos de agua subterránea de buena calidad mediante la adopción de una escala de tarifas de extracción que incluya los elementos que acaban de mencionarse. La decisión en cuanto a si deben concederse descuentos para la extracción en gran escala por los servicios públicos de agua potable es una cuestión compleja. En este contexto, cabe señalar que el aumento de las tarifas cobradas por la extracción de agua sin tratar puede proporcionar un incentivo para la gestión más eficaz de la demanda en las zonas urbanas. Esto incluye la reducción de las fugas de las tuberías a niveles tolerables y el cobro de tarifas apropiadas para los usos domésticos no esenciales, como el riego de jardines o el lavado de autos.

Para que una política de control de la extracción sea efectiva, debe haber alguna sanción contra los que construyen pozos sin permiso o exceden la extracción autorizada. Las multas monetarias no suelen ser la mejor opción. Un enfoque más apropiado es la prohibición temporal del uso del pozo mediante la remoción de la planta de bombeo o el sello de la boca del pozo, dependiendo de la magnitud de la contravención y del efecto sobre terceros o sobre el recurso acuífero en su totalidad.

La falta de inversiones adecuadas en el mantenimiento de los pozos es muy común, y ha conducido a una tendencia a sobrecapitalizar la explotación de los acuíferos mediante la perforación de un número excesivo de pozos en relación con el rendimiento total alcanzado o alcanzable. Debe alentarse a las empresas de abastecimiento de agua a mejorar la vigilancia operacional para diagnosticar las necesidades de mantenimiento, tales como el servicio regular de las bombas y la limpieza y rehabilitación intermitentes de los pozos. Los órganos de reglamentación deben reconocer también que la vigilancia adecuada de las operaciones de bombeo es el método más eficaz en términos de costo para refinar progresivamente las evaluaciones de los recursos de agua subterránea y tener así mejores bases para las decisiones que tomen los encargados de la reglamentación.

*Recuperación de los acuíferos sobreexplotados.* En el caso de acuíferos ya sobreexplotados, las medidas de control de la extracción deben incluir la prohibición de la construcción de nuevos pozos y la reducción de la extracción de los pozos existentes. En la práctica, esto por lo general exige llevar a cabo la tarea jurídicamente compleja de redefinir los derechos de extracción en sitios en que antes no se requería forma alguna de permiso para los pozos (dado que la perforación de pozos era un derecho legítimo de todo propietario de tierras) y al otorgar las concesiones se sobreestimaban exageradamente los recursos disponibles o se subestimaban las externalidades ambientales asociadas con la extracción.

En esas circunstancias, el enfoque pragmático consiste en establecer zonas específicas donde es necesario proteger los recursos de agua subterránea en bien del interés público. Esto puede hacerse mediante un decreto local que prohíba o limite las circunstancias en las cuales pueden perforarse nuevos pozos de agua e imponga tarifas de extracción para todos los explotadores de pozos existentes. Esto puede facilitarse si: a) la extracción de la empresa de abastecimiento público puede redistribuirse dentro del sistema del acuífero para reducir la sobreexplotación local, y b) puede desarrollarse una fuente alternativa de abastecimiento de agua mediante la importación de un acuífero distante o un cuerpo de agua superficial. Es importante reconocer que, en el último caso, lo más eficaz es que la empresa explote ambas fuentes en forma conjunta. Se reduce así el volumen total de extracción de agua subterránea, pero se mejora al mismo tiempo la confiabilidad del abastecimiento de agua suministrado en caso de sequía (Recuadro 4.2).

Si el órgano de reglamentación considera la posibilidad de reducir la extracción de acuíferos sobreexplotados, será más fácil hacerlo si la política se aplica a través de un grupo de usuarios de agua organizados dentro de la comunidad o en el marco municipal. Este método de reducir la extracción facilita la introducción de tarifas de extracción más realistas (Recuadro 4.3) y puede permitir el uso de instrumentos más sofisticados, tales como los siguientes:

- Alentar a los usuarios no sensibles de aguas subterráneas a que pasen de la explotación de acuíferos de alta calidad a aguas subterráneas menos profundas de inferior calidad ofreciéndoles una reducción importante de las tarifas de extracción (en el Recuadro 4.4 se da un ejemplo en que esto ha ocurrido casualmente).
- Restringir o retirar los derechos de extracción a las empresas industriales que no han instalado tecnologías eficientes en términos de uso del agua.
- Promover el trueque de aguas servidas tratadas a cambio de derechos de extracción de aguas subterráneas con los agricultores de las zonas urbanas marginales (Recuadro 4.5).
- Otorgar subsidios para mejorar la eficiencia del uso del agua en el riego agrícola en las zonas urbanas marginales, a cambio de derechos de extracción de aguas subterráneas (Recuadro 4.5).

La limitación de la extracción es más fácil en las ciudades donde el grueso de la explotación depende de unas pocas empresas de abastecimiento y pozos industriales que cuando hay un gran número de pozos domésticos, comerciales e

**Recuadro 4.2. Uso conjunto de los recursos de agua superficial y subterránea: Más que la suma de las partes**

El uso conjunto de agua superficial y agua subterránea es una opción importante para la utilización más eficiente de los recursos hídricos. De hecho, el aprovechamiento óptimo de los recursos de agua exige el uso de ambos para aprovechar no sólo el almacenamiento generalmente enorme de agua subterránea, sino también las aguas superficiales durante períodos de exceso de caudal.

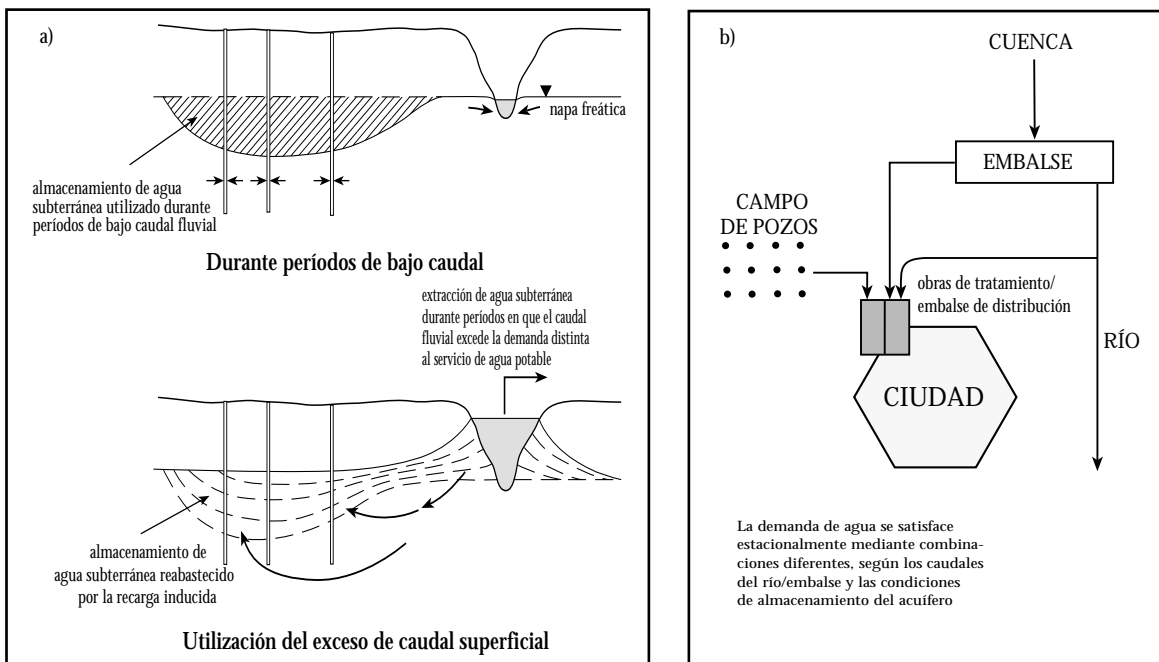
El término conjunto puede utilizarse tanto cuando el recurso superficial (río, reservorio) está conectado hidráulicamente con el recurso subterráneo (acuífero) como cuando no hay conexión directa.

Lamentablemente, si la calidad de las aguas subterráneas empieza a deteriorarse, es frecuente que se abandone el acuífero al recurrir a nuevas fuentes superficiales. Sin embargo, a medida que aumenta la demanda de agua, puede haber situaciones de escasez grave y/o problemas de calidad (por ejemplo, sedimentos suspendidos, efluentes de aguas servidas) estacionalmente o durante varios años de sequía. Las tasas elevadas e inesperadas de sedimentación en los reservorios pueden reducir la capacidad de almacenamiento, con efectos desproporcionadamente graves durante períodos de sequía, cuando los niveles de agua están bajos.

El uso conjunto puede ampliar las opciones en esas situaciones de presión. Se aprovecha así esencialmente la gran capacidad de almacenamiento del acuífero durante los períodos en que el caudal superficial es bajo o de calidad intratable, y se utiliza el agua superficial en otros momentos. En el caso de los sistemas no conectados hidráulicamente, las técnicas son principalmente operacionales, y requieren un diseño cuidadoso del trazado de los sistemas de transmisión de agua y de los diámetros de las tuberías.

En el caso de los sistemas hidráulicamente conectados, la ingeniería es más compleja. Estos últimos utilizan la diferencia temporal entre la extracción (de agua subterránea) y la reducción en la descarga en su salida natural. El uso conjunto agota así el almacenamiento subterráneo para satisfacer la demanda estacional de agua y permite la reposición de las aguas subterráneas durante períodos de exceso de lluvia y de caudal fluvial. Es necesario situar los pozos cuidadosamente para asegurar que la ganancia neta sea adecuada. Los acuíferos no consolidados con gran almacenamiento son los que mejor se prestan a esos sistemas porque su gran capacidad de amortiguación permite depresiones de la napa freática considerables antes de que se intercepte el caudal fluvial.

**Gráfico R4.2. Esquemas de uso conjunto en a) sistemas conectados hidráulicamente y b) sistemas no conectados hidráulicamente**



industriales pequeños explotados en forma privada. En el primer caso, se dispone generalmente de más información sobre las cantidades bombeadas, los niveles del acuífero y la calidad del agua. Se conoce así el estado del aprovechamiento global de los recursos. En el caso de una multiplicidad de pequeños extractores privados, su prioridad es obtener suficiente agua para sus necesidades inmediatas, y no el bienestar colectivo a largo plazo de la comunidad.

Así, las autoridades municipales permiten la escalación de la construcción privada y no controlada de los pozos a su propio riesgo. Puede ser una panacea eficaz en términos de costo para satisfacer las demandas inmediatas a corto plazo de la población en las ciudades en rápido crecimiento. Sin embargo, a menudo da como resultado un uso irracional del capital y los recursos disponibles para el abastecimiento de agua que tiene consecuencias a largo plazo y que impide una gestión eficaz de los recursos hídricos. Puede haber también peligros para la salud. Además, el uso posterior de los pozos privados abandonados para la disposición de desechos sigue siendo una causa corriente de problemas graves de contaminación de los acuíferos en las zonas urbanas.

El aprovechamiento de los recursos de agua subterránea es normalmente un proceso progresivo que lleva muchas décadas. La formulación de una buena política para controlar la explotación requiere un buen conocimiento de la magnitud de los recursos, de modo que sea posible imponer un límite razonable al aprovechamiento. La naturaleza del agua subterránea y los elevados costos de la investigación hidrogeológica, sumados a los problemas de delimitación de las zonas y determinación de los mecanismos de recarga de los acuíferos, y la variabilidad temporal y espacial de las tasas de recarga, llevan a imprecisiones inevitables en las estimaciones de los recursos. Se necesita una vigilancia operacional bien supervisada y cuidadosamente evaluada de la respuesta de los acuíferos a la extracción para refinar esas estimaciones. No suele ser por eso realista establecer una política rígida desde el comienzo.

El objetivo de toda política de control de la extracción debe ser reducir las probabilidades de que se sufran las consecuencias más graves asociadas con la explotación irracional y/o excesiva. Al mismo tiempo, es preciso evitar la reglamentación excesiva, que puede tener un costo burocrático elevado y desalentar el desarrollo económico. Para que una política de control funcione eficazmente, es importante evaluar de manera realista la susceptibilidad del sistema acuífero al descenso excesivo del nivel freático y a los efectos secundarios irreversibles. Es también importante identificar la presencia de interfaces de agua de mala calidad en las cercanías de la zona de explotación.

La incertidumbre que rodea las estimaciones de recarga de los acuíferos exige un control pragmático de la explotación de los recursos basado en la respuesta del nivel freático del acuífero. Por lo tanto, se necesita una red de vigilancia básica para determinar los niveles freáticos en pozos de observación (por oposición a los de producción), porque los pozos de producción son una guía mucho menos coherente y sensible del estado de la explotación de los recursos de aguas subterráneas. Los organismos de reglamentación pueden utilizar los niveles freáticos para orientar la política de explotación de varias maneras, ya que, en interés de todos los usuarios de agua, convendrá evitar lo siguiente:

- La caída general de los niveles freáticos de los acuíferos hasta el punto que los horizontes de acuíferos productivos y/o los niveles de captación principales en los pozos de producción se reducen constantemente.
- Los gradientes pronunciados hidráulicos tierra adentro en los acuíferos costeros, porque plantean un riesgo considerable de inducir la invasión de agua salina.
- Los gradientes verticales descendentes pronunciados en las secuencias de acuíferos múltiples, ya que aumentan mucho el riesgo de inducir una infiltración descendente rápida de aguas subterráneas contaminadas provenientes de zonas de poca profundidad.
- El descenso excesivo del nivel freático de sistemas acuíferos confinados no consolidados, que puede dar como resultado la pérdida permanente de agua de horizontes de acuitardos superyacentes o interestratificados y producir asentamientos graves del terreno.
- La difusión de conos de depresión por bombeo hacia zonas de descarga de manantiales importantes, ya captadas para el abastecimiento de agua.

*El papel de los derechos de extracción de aguas subterráneas comercializables.* La introducción de un sistema de derechos de extracción comercializables puede ser a veces apropiada como instrumento económico complementario para controlar la explotación de las aguas subterráneas. Muchos permisos de extracción son transferibles siempre que no haya ningún cambio en la ubicación, la tasa de bombeo y el uso del agua. Sin embargo, los permisos comercializables van mucho más lejos, ya que permiten el cambio de uso y, en algunos casos, de ubicación, y crean así un mercado de agua. Sin embargo, ese sistema no es un sustituto del establecimiento de arreglos administrativos y reglamentarios correctos. De hecho, sólo puede funcionar efectivamente cuando los derechos de agua están claramente registrados y garantizados.

Los beneficios de la introducción de un sistema de derechos de extracción comercializables son que: a) estimula el registro de todas las extracciones, b) establece un proceso de valoración realista del recurso, c) aumenta la eficiencia

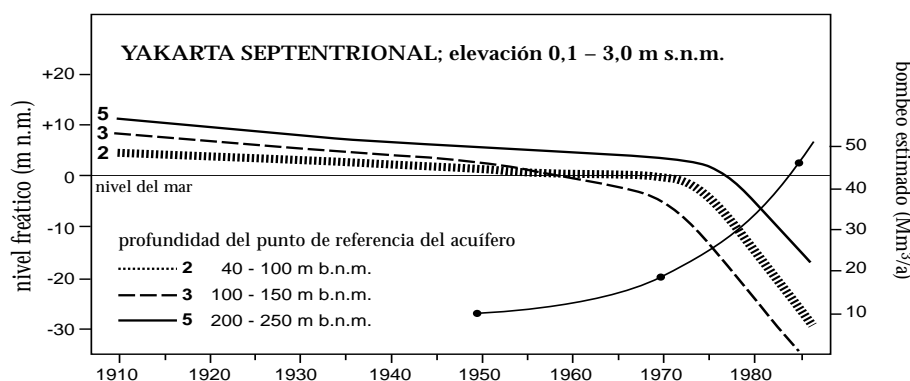
**Recuadro 4.3. Instrumentos económicos y de reglamentación para reducir la extracción de agua subterránea—Yakarta (Indonesia)**

El problema del control del asentamiento del terreno en las ciudades costeras vulnerables se ilustra muy bien en el caso de Yakarta (8,2 millones de habitantes), situada en tierras deltaicas bajas y llanas. El sistema público de agua potable abastece solamente al 46% de la población, en su mayor parte de fuentes superficiales. El resto depende principalmente de aguas subterráneas obtenidas del acuífero freático poco profundo,

donde la extracción ha estado históricamente no controlada.

El bombeo excesivo del acuífero confinado, principalmente por extractores industriales, ha producido el agotamiento del acuífero freático, una intrusión salina grave y asentamientos del terreno (a tasas de 3 a 6 cm/a), con lo cual ha aumentado el riesgo de inundaciones por la marea en la parte norte de Yakarta.

**Gráfico R4.3. Niveles históricos de caída de las aguas subterráneas y aumento de las tasas de extracción en el sistema acuífero de Yakarta. El acuífero confinado No. 2, sujeto a bombeo intensivo, sufre actualmente infiltraciones de arriba y de abajo**



m n.m. = metros con respecto al nivel del mar. m s.n.m. = metros sobre el nivel del mar.  
 m b.n.m. = metros bajo el nivel del mar.

Se ha establecido un sistema de licencias retrospectivas y de cánones con tarifas incrementales para la extracción de los pozos con el fin de hacer frente a la situación. Esto ha sido aceptado por muchos usuarios, pero ciertamente sigue habiendo una extracción ilegal considerable.

Uso de agua	Costo del agua (US\$/m <sup>3</sup> )*	
	Interior de la ciudad (precio más elevado)	Alrededores de la ciudad (precio más bajo)
Doméstico y social	0,16 – 0,40	0,11 – 0,24
Institucional	0,26 – 0,70	0,16 – 0,52
Comercial	0,56 – 0,92	0,38 – 0,64
Hoteles**	1,00 – 1,60	0,66 – 1,00
Industria pesada	1,20 – 1,76	1,00 – 1,44
Industria ligera	0,70 – 1,00	0,48 – 0,72

\* La tasa unitaria aumenta con la cantidad utilizada para las clases en la gama de <50 a >2.500 m<sup>3</sup>/a.

\*\* Tasas considerablemente más altas para los establecimientos de cuatro o más estrellas.

**Cuestiones relacionadas con el abastecimiento de agua**

- La extracción sin restricciones puede causar salinización del agua subterránea, así como asentamientos del terreno en algunos acuíferos costeros.
- La restricción de la extracción municipal de agua subterránea solamente puede reducir su capacidad de satisfacer la demanda y alentar la extracción privada sin restricciones.
- Se necesitan controles efectivos de la extracción para evitar costos adicionales considerables para los usuarios públicos y privados.

**Necesidades relacionadas con la gestión del agua**

- Es preciso controlar la demanda industrial y doméstica, de modo que se necesite extraer una menor cantidad de agua subterránea.
- Deben crearse desincentivos más importantes para los usos industriales no sensibles, a fin de que no se extraiga agua subterránea de alta calidad que es mejor reservar para el abastecimiento potable.
- Debe darse prioridad a las acciones para reducir la carga de contaminantes en el suelo en Yakarta meridional.

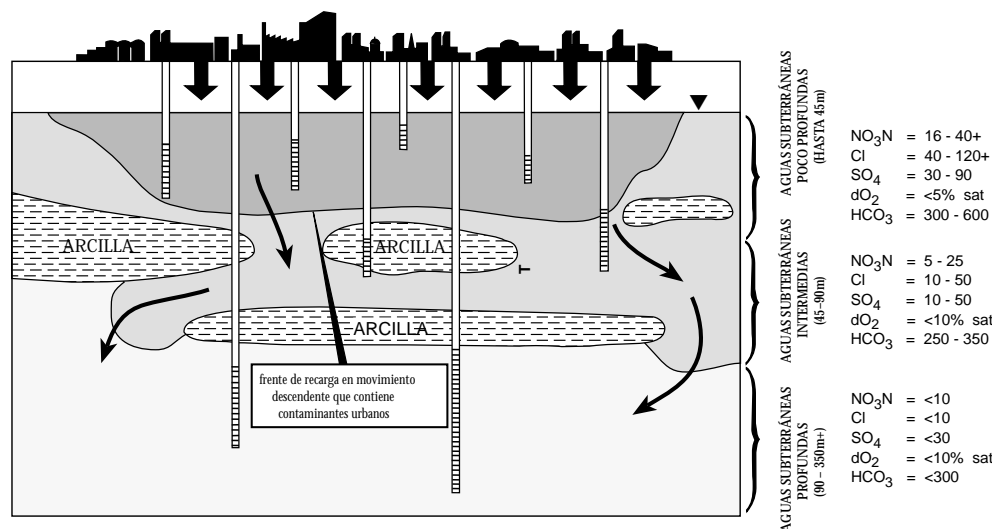
#### Recuadro 4.4. Relación complementaria entre la extracción pública y privada de aguas subterráneas—Santa Cruz (Bolivia)

En el multiacuífero aluvial complejo situado bajo esta ciudad, que depende totalmente del agua subterránea, la mayoría de los pozos privados que suministran agua para la industria, los pequeños comercios y las residencias individuales extraen agua por encima de los 90 metros de profundidad. Por otra parte, la mayor parte del agua utilizada para el abastecimiento público proviene de pozos que sacan agua del acuífero más profundo, situado entre 90 y 350 metros.

La extracción ha inducido un movimiento descendente de contaminantes de la napa freática poco profunda. Sin

embargo, el frente de las aguas contaminadas no parece haber penetrado por debajo de los 90 metros, a pesar del bombeo intensivo de los pozos profundos de abastecimiento público. Apparently, the considerable extraction of the shallower aquifer for private uses provides a certain degree of protection to the deeper municipal wells by intercepting, extracting and recycling part of the contaminated water. This is a management practice that is somewhat casual, but adequate, as long as no part of the supplies from the shallower wells is destined for drinking or sensitive uses.

Gráfico R4.4. Sección transversal esquemática de Santa Cruz en que se ilustran las principales variaciones de la calidad del agua subterránea



#### Cuestiones relacionadas con el abastecimiento de agua y la disposición de las aguas servidas

- La extracción pública y privada de las aguas subterráneas se ha desarrollado sin competencia entre ellas.
- Los efectos en la calidad tardarán probablemente varios años en producirse, a medida que la carga subsuperficial previa al alcantarillado se lixivia a través del sistema del acuífero.
- Los planes de expansión del abastecimiento público de agua potable, basados en la perforación de pozos profundos dentro de los límites de la ciudad, están bien fundados si puede preverse la magnitud del deterioro de la calidad.

#### Necesidades relacionadas con la gestión del agua

- Es preciso extender la red de alcantarillado a las zonas urbanas situadas sobre los estratos de grano grueso más vulnerables y situar las industrias más contaminantes lejos de esas zonas.
- Las zonas de expansión de la ciudad deben establecerse en las zonas menos vulnerables (cubiertas de arcilla).
- Se debe proteger la zona de recarga importante de dunas de arena al sur de la ciudad.
- Se debe evaluar el impacto del sistema de drenaje pluvial en la recarga del acuífero urbano.

#### Recuadro 4.5. Respuesta activa a la extracción excesiva de agua subterránea—Querétaro (México)

Querétaro (700.000 habitantes) está situada en la planicie central árida de México y obtiene la mayor parte de su abastecimiento de agua de 55 pozos de producción que proporcionan 175 ML/d. Sin embargo, la sobreexplotación del acuífero del valle de Querétaro ha hecho que el nivel piezométrico baje más de 100 metros, y exige profundidades de hasta 350 metros para los pozos y alturas de bombeo de entre 130 y 160 metros. La caída constante de los niveles freáticos (3,5 m/a) aumenta los costos de energía para la producción de agua y obliga al redimensionamiento regular de las bombas y a la reorganización del sistema de distribución.

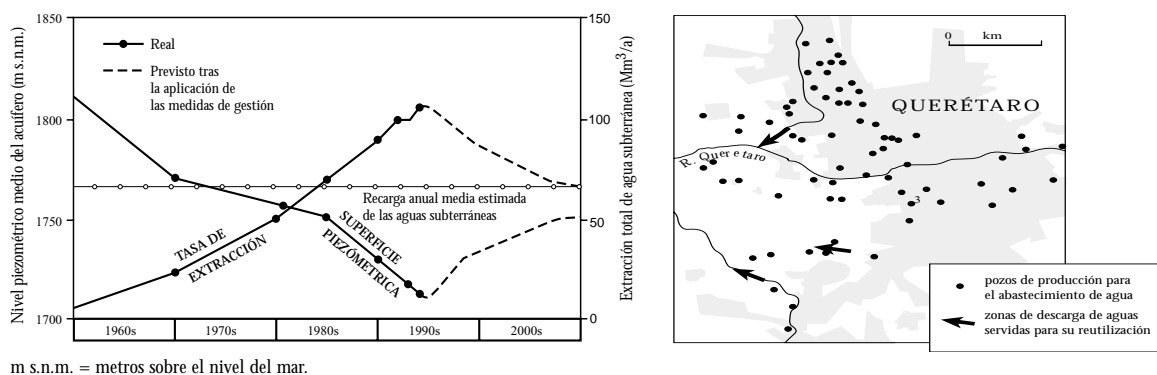
La sobreexplotación del acuífero ha causado también la compactación de la secuencia aluvial/volcánica/lacustre del valle, con asentamientos diferenciales del terreno de entre 0,4 y 0,8 metros a lo largo de las fallas. Los edificios y la infraestructura han sufrido daños considerables (tuberías y alcantarillas municipales/industriales rotas), y la apertura de fisuras verticales ha aumentado la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas.

El organismo municipal de abastecimiento de agua (CEAQ) utiliza alrededor del 70% de las aguas subterráneas

extraídas del acuífero del Valle de Querétaro. Está poniendo en práctica un plan decenal de estabilización del acuífero para reducir la extracción total de 106 a 70 Mm<sup>3</sup>/a mediante las medidas siguientes:

- Un plan de acción de reducción de fugas de las tuberías, incluidas las pérdidas en las instalaciones del usuario.
- La mejora de la eficiencia operacional (microvigilancia del sistema de abastecimiento, automatización, optimización).
- La gestión de la demanda, aumentando la conciencia del público sobre la escasez del agua y el aumento de los precios.
- El financiamiento de mejoras de la tecnología del riego, la eficiencia en el uso del agua y la introducción de modificaciones en las prácticas de cultivo en el sector agrícola a cambio de la renuncia voluntaria a los derechos de agua.
- El suministro de aguas servidas con tratamiento secundario a cambio de derechos de agua de pozo para el riego en las zonas periurbanas.
- La importación limitada de aguas subterráneas (hasta 43 ML/d) de acuíferos de valles vecinos situados a una distancia de hasta 50 kilómetros.

Gráfico R4.5. Extracción de agua subterránea y tendencias en los niveles del acuífero de Querétaro, con predicciones de recuperación como resultado de un plan de gestión de las aguas subterráneas



#### Cuestiones relacionadas con el abastecimiento de agua y la disposición de las aguas servidas

- Las demandas insostenibles para el abastecimiento público, las industrias urbanas y los sectores agrícolas periurbanos han llevado a una sobreexplotación grave del acuífero.
- Los tres sectores compiten por recursos muy limitados, y hay pocas oportunidades de aumento de la recarga proveniente de las lluvias o los ríos.
- La red de alcantarillado tiene una cobertura inferior al 90% (sólo 50% con tratamiento secundario); todos los efluentes se usan para el riego agrícola.
- La CEAQ está preocupada por la posibilidad de que el agua de riego contamine los suministros existentes de agua subterránea potable, poniendo aún más presión sobre el recurso.

#### Necesidades relacionadas con la gestión del agua

- Se necesita un apoyo concertado a las iniciativas del organismo de agua potable por parte de todos los usuarios del agua.
- Hace falta una mejor comprensión del sistema del acuífero y de los efectos posibles del asentamiento del terreno en la penetración vertical de contaminantes.
- Deben apreciarse mejor las amenazas de contaminación del agua subterránea y el impacto futuro probable en la calidad del agua para los usuarios públicos y privados.



del uso del agua y d) proporciona un mecanismo a través del cual es posible una reducción proporcional de las extracciones cuando ello se justifica técnicamente. Esto último se logra mediante la disminución progresiva a lo largo de un período de años del volumen total autorizado de acuerdo con cálculos de los recursos de agua subterránea disponibles. El sistema no protege así en exceso los derechos preexistentes.

Sin embargo, la introducción de permisos comercializables para la extracción de agua subterránea puede plantear varios problemas. Un cambio de un uso esencialmente no consuntivo a un uso consuntivo de agua subterránea puede tener consecuencias inaceptables para los usuarios situados aguas abajo, como también puede tenerlas un cambio en la forma en que se realizan las extracciones a lo largo del tiempo. Los intercambios deberán a menudo limitarse considerablemente para evitar a) impactos indeseables sobre zonas ambientalmente sensibles alimentadas por descargas naturales de aguas subterráneas, y b) problemas de equidad para los pequeños productores con pozos poco profundos. Además, la limitada experiencia internacional no es enteramente positiva en cuanto a los resultados de la acumulación especulativa de permisos y a los extractores de bajos ingresos que venden sus permisos para obtener inmediatamente una suma de dinero y crean así un problema social posterior.

### *Control de la carga subsuperficial de contaminantes*

La mayoría de los recursos de agua subterránea tienen su origen en el exceso de agua de lluvia que se infiltra bastante localmente en la superficie. Así pues, muchas actividades que se llevan a cabo en la superficie ponen en peligro la calidad de las aguas subterráneas y la disponibilidad de los recursos. La tarea de mejorar la protección de las aguas subterráneas contra una contaminación grave es difícil y polifacética. La mayoría de los planificadores del uso de la tierra y los encargados de adoptar decisiones sobre el medio ambiente no tienen todavía suficiente conciencia de la necesidad de proteger las aguas subterráneas ni de los métodos para hacerlo.

En vista del tiempo que puede transcurrir hasta que los acuíferos respondan a las cargas de contaminantes y a la deficiencia generalizada de las redes de vigilancia y los programas de supervisión del abastecimiento de agua, no es sensato esperar a que haya indicios de contaminación para controlar la carga de contaminantes. Los gerentes de los recursos hídricos deben hacer todos los esfuerzos razonables para prevenir el deterioro ulterior de la calidad del agua e introducir mejoras cuando resulte posible. El tratamiento en el punto de extracción es la respuesta ineludible para hacer frente a las normas de calidad del agua potable una vez que ha habido contaminación, pero no es una base sostenible para la gestión de los recursos de agua subterránea.

En la elaboración de estrategias para el control de la contaminación de las aguas subterráneas, es importante distinguir entre la amenaza al recurso o al acuífero en su totalidad y a fuentes individuales de abastecimiento de agua potable. Esto exige un equilibrio realista entre las necesidades de protección del recurso y las necesidades de protección de las fuentes, según las circunstancias locales. Aunque en teoría es posible gestionar el uso de la tierra exclusivamente en interés de las aguas subterráneas, eso es poco aceptable por razones socioeconómicas. En la práctica, los encargados de la reglamentación generalmente tienen que establecer estrategias de protección de las aguas subterráneas que, a la vez que limitan las actividades de uso de la tierra, buscan negociar intereses conflictivos.

Para aplicar con eficacia esas estrategias, es preciso tener en cuenta las necesidades y los procesos hidrogeológicos en las políticas de uso de la tierra. Esas políticas, cuando existen, suelen estar basadas en sólidas razones económicas (y a veces emocionales). Es preciso encarar el problema de que las diferentes profesiones no entienden las metodologías o las prioridades de las demás. Deben establecerse matrices sencillas y firmes que indiquen qué actividades son posibles con un riesgo aceptable para las aguas subterráneas. Cuando las municipalidades no han establecido políticas de uso de la tierra, éste será el primer paso para la protección de los recursos y/o las fuentes de aguas subterráneas.

En lugar de aplicar controles universales sobre el uso de la tierra o del suelo y sobre la descarga de efluentes, debe recurrirse a un enfoque más eficaz y menos perjudicial para el desarrollo económico. Este enfoque puede incluir el uso de la capacidad natural de atenuación de los contaminantes de los estratos situados por encima del acuífero saturado. Además, debe reconocerse que sólo se necesitan los controles más rigurosos en las zonas más vulnerables. Para lograr un progreso lógico en la protección de las aguas subterráneas, será entonces indispensable asignar prioridades. Será preciso delimitar zonas sobre la base de criterios sencillos pero coherentes, posiblemente mediante el trazado de mapas en que se indique la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos. El concepto de vulnerabilidad no es científicamente preciso y tiene algunas limitaciones graves desde el punto de vista científico. Sin embargo, proporciona un marco general dentro del cual puede basarse la política de protección de las aguas subterráneas y es un paso clave en el proceso de planificación del uso de la tierra.

En esta división de la superficie de la tierra, pueden establecerse zonas especiales de protección alrededor de las fuentes públicas de abastecimiento de agua potable (Recuadro 4.6). Con este fin, se está adoptando ahora un sistema

híbrido basado en estimaciones de la captación de aguas subterráneas y los tiempos de flujo de las zonas saturadas. Una vez más, sin embargo, la complejidad de los flujos de aguas subterráneas y del transporte de contaminantes hace que éste sea un enfoque algo impreciso.

Los dos enfoques para la división en zonas de la superficie del terreno a fin de prevenir la contaminación de las aguas subterráneas (protección de los recursos y de la fuente) son complementarios, y el énfasis que se pone en uno u otro depende de la situación en que se encuentra el aprovechamiento de la fuente y de las condiciones hidrogeológicas imperantes. Las estrategias que se orientan predominantemente hacia la fuente son más adecuadas para los acuíferos más uniformes, no consolidados, explotados mediante un número relativamente pequeño y fijo de pozos municipales de alto rendimiento con regímenes de bombeo estables. No pueden aplicarse tan fácilmente en situaciones donde hay un número considerable y creciente de extractores individuales, que hace impracticable la consideración de las fuentes individuales y el establecimiento de zonas fijas. Además, las deficiencias en los datos y las incertidumbres científicas, especialmente en los acuíferos heterogéneos, pueden hacer que la estimación de las dimensiones requeridas para las zonas de protección sea muy difícil sin un trabajo previo costoso sobre el terreno.

Cuando se considera una estrategia para el control de la contaminación es fundamental diferenciar entre la contaminación proveniente de puntos fácilmente identificables y la contaminación de fuentes esencialmente difusas. El enfoque práctico que se adopta para hacer frente a la contaminación proveniente de puntos definidos difiere también considerablemente según que se trate de fuentes que existían antes de la aplicación de la política de protección y fuentes surgidas posteriormente. La primera situación implica por lo general la preparación de un inventario de fuentes posibles de contaminación, la inspección de los lugares y la vigilancia de las aguas subterráneas para determinar los impactos y negociar modificaciones operacionales cuando se consideran necesarias. Es más fácil controlar el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en la etapa de planificación, cuando es posible oponerse a las actividades de alto riesgo o éstas pueden someterse a modificaciones de diseño o a requisitos de vigilancia estrictos.

Las aguas subterráneas poco profundas de las zonas urbanas suelen estar contaminadas, especialmente cuando no hay una red de alcantarillado con cobertura total. En esas circunstancias, se recomienda evitar las cargas excesivas de contaminantes persistentes que pueden transferirse a acuíferos más profundos, menos vulnerables a largo plazo. En el medio urbano, la carga de contaminantes de los acuíferos vulnerables puede limitarse mediante:

- La asignación de prioridad a la ampliación de la red de alcantarillado a las zonas de alta vulnerabilidad de las aguas subterráneas y/o las zonas de protección de la fuente.
- La restricción de la densidad del desarrollo residencial con servicios de saneamiento *in situ*.
- La ubicación de los rellenos sanitarios de desechos sólidos en zonas de baja vulnerabilidad de las aguas subterráneas.
- La limitación de la descarga de efluentes industriales en el suelo en las zonas vulnerables mediante la introducción de permisos para la descarga de efluentes, con incentivos apropiados para favorecer el reciclado, la reducción de los desechos o la disposición en zonas menos vulnerables.
- La introducción de medidas especiales para el manejo de los productos químicos y los efluentes en los sitios industriales situados en zonas vulnerables.
- La mejora de la ubicación y la calidad de la descarga de aguas servidas de las redes de alcantarillado teniendo en cuenta los impactos potenciales sobre los campos de pozos municipales periurbanos y los que se encuentran aguas abajo.

En algunos casos, es útil establecer zonas de protección alrededor de los pozos municipales y los campos de pozos. Además, en los sitios periurbanos, es esencial delimitar, en la mayor medida posible, la zona total de captación y una línea isócrona clave (como el tiempo de recorrido horizontal medio en un período de 50 días). En situaciones de extrema vulnerabilidad del acuífero, es necesario establecer esas zonas de protección como zonas de conservación y evitar en ellas la mayor parte de las formas de desarrollo económico. Esto sólo es posible en algunas situaciones periurbanas y fuera de las ciudades.

En algunas circunstancias, los órganos de reglamentación deben reconocer la posibilidad de que no se justifique la protección de algunos acuíferos, ya sea porque su potencial de abastecimiento o la calidad del agua subterránea es insuficiente, o porque ya han sufrido un deterioro excesivo. En esos casos, una estrategia consiste en prohibir la explotación del agua para usos potables o sensibles y promover el uso del suelo para la disposición de efluentes con un bajo costo. Sin embargo, esas estrategias deben pensarse cuidadosamente si se quieren evitar algunos problemas, como los siguientes:

- El uso en tiempos de sequía, cuando hay una gran demanda y el abastecimiento es limitado, de pozos que plantean peligros graves para la salud pública.
- Los posibles cambios en la dirección de los flujos de las aguas subterráneas, que pueden poner en peligro fuentes situadas fuera de la zona afectada.
- La contaminación de las redes de agua potable como resultado del aumento del nivel de las aguas subterráneas contaminadas.

El problema de las tierras que se han contaminado en el pasado apenas empieza a afectar a las zonas urbanas establecidas hace más tiempo y los centros mineros en los países en desarrollo. Esas tierras plantean un riesgo de contaminación importante para las aguas subterráneas y crean problemas especiales en términos de control de la contaminación, porque es posible que ésta sea anterior a las leyes encaminadas a controlar la contaminación del suelo y del agua. Suele ser entonces muy difícil probar la responsabilidad, cualquiera sea el estado actual de la legislación nacional o local en materia de protección del medio ambiente.

Una forma útil de clasificar las tierras contaminadas es de acuerdo con su situación operacional, a saber:

- En uso activo y que posiblemente siguen recibiendo contaminación adicional.
- Abandonadas o inactivas.
- Vueltas a aprovechar para usos diferentes.

Si el nuevo aprovechamiento entraña una perturbación significativa del lugar, es posible que se remuevan los contaminantes y que la actividad requiera así un control especial en interés de la protección de las aguas subterráneas.

La insistencia en una limpieza general de las tierras contaminadas puede no ser económicamente realista. En términos de la protección del agua subterránea, un enfoque lógico, pero pragmático, sería el siguiente:

- La identificación de las tierras potencialmente contaminadas asociadas con las industrias que plantean la mayor amenaza para la calidad de las aguas subterráneas, especialmente las situadas en zonas de alta vulnerabilidad y/o protección de la fuente.
- Esfuerzos por eliminar la contaminación continuada del suelo y/o las aguas subterráneas si el sitio está en uso activo.
- La vigilancia de la calidad del agua subterránea y la evaluación de las condiciones hidrogeológicas para determinar si hay contaminantes que migran lateralmente en cualquier nivel del acuífero.

Si se detecta una contaminación grave, será preciso hacer un estudio detallado del lugar para identificar sitios importantes de contaminación del suelo. Además, deberá decidirse si es necesario y factible reducir la contaminación mediante la eliminación de esos sitios, si los procesos naturales de atenuación en el lugar resolverán el problema, o si será menos costoso tratar el abastecimiento de agua subterránea.

### **El camino futuro: Realismo político y medidas prácticas**

En razón de que las aguas subterráneas son un recurso fundamental para toda la vida humana y la actividad económica en muchas regiones, las políticas para su asignación, su gestión y su protección tienen dimensiones sociopolíticas inherentes. El hecho de que un organismo de reglamentación haya establecido una política hidrogeológica y económicamente racional para la gestión de las aguas subterráneas no siempre significa que esa política se aplicará. Por muy racional que parezca, puede ocurrir que no resulte atractiva o aceptable desde el punto de vista político, especialmente en el caso de las aguas subterráneas que no se ven y no están presentes en consecuencia en la conciencia pública. Además, hay grupos de presión industriales o agrícolas poderosos que interfieren muchas veces con el proceso de reglamentación.

Para los políticos o los responsables de formular políticas que se preocupan por el medio ambiente, la cuestión consiste generalmente en intervenir o no intervenir. Para la mayoría de los dirigentes políticos, la promoción de un apoyo firme o de la asignación de financiamiento adicional para la adopción de medidas de protección de las aguas subterráneas sólo será posible si una mayoría del público percibe claramente los beneficios. En el caso del agua subterránea, esto presenta problemas especiales. A menudo, los beneficios de la política de intervención se obtendrán esencialmente a largo plazo y no se percibirán hasta algún momento en el futuro, en tanto que la intervención, en términos de restric-

**Cuadro 4.2.** *Etapas prácticas para llegar a definir y promover una política de gestión de los recursos de aguas subterráneas en el medio urbano*

<i>Fortalecimiento del marco institucional</i>	<i>Evaluación de las condiciones hidrogeológicas</i>
Examen de las responsabilidades institucionales y las disposiciones jurídicas	Estudio rápido de la extracción y la utilización de agua subterránea
Identificación o consulta con los interesados <ul style="list-style-type: none"> <li>● Usuarios de agua</li> <li>● Grupos ecologistas</li> <li>● Posibles contaminadores</li> </ul>	Evaluación de la situación del acuífero y de la susceptibilidad a los efectos secundarios relacionados con la explotación
Promoción de una conciencia política y pública	Evaluación del riesgo de contaminación del agua subterránea <ul style="list-style-type: none"> <li>● Vulnerabilidad a la contaminación del acuífero</li> <li>● Carga de contaminantes subsuperficiales</li> <li>● Zonas de protección del abastecimiento público de agua potable y estudios sanitarios de campo</li> </ul>
Promoción de un plan de gestión de acciones con los interesados	Identificación de las acciones prioritarias <ul style="list-style-type: none"> <li>● Para el control de la extracción</li> <li>● Para la protección de los recursos/las fuentes</li> </ul>

ción del acceso a los recursos de agua subterránea o de la descarga de efluentes y desechos en el suelo afecta a algunas personas inmediatamente. Los dirigentes políticos pueden estar expuestos a la tentación de aplazar esas medidas hasta que la magnitud de la degradación de los recursos hídricos sea tal que la preocupación del público en general y/o de los grupos de intereses los empuje a insistir en que se tomen medidas. Sin embargo, el aplazamiento de la protección de los recursos de agua subterránea lleva normalmente a problemas más costosos y difíciles de resolver a largo plazo.

Así pues, para encontrar el camino correcto (Cuadro 4.2), los organismos de reglamentación deben establecer un consenso social para superar la resistencia a la introducción de políticas científica y económicamente lógicas y utilizar sus facultades de reglamentación eficazmente. Un factor clave es la formación de grupos bien informados de usuarios de agua interesados, junto con grupos más generales de personas que tienen interés en el agua subterránea. Esos grupos pueden actuar como vehículo para la aplicación de las políticas y la gestión operacional a nivel práctico cuando están adecuadamente coordinados por la autoridad reguladora nacional, estatal o municipal.

Una necesidad crucial en este contexto será la explicación clara de las consecuencias de la falta de intervención. Las aguas subterráneas se degradan muchas veces por culpa de la falta de conocimiento del sistema acuífero y/o la explotación no controlada de las aguas subterráneas. No se tiene casi en cuenta el costo que puede tener la inversión del proceso de deterioro o la sustitución de los activos perdidos. El costo marginal de las fuentes de sustitución es invariablemente alto, y las medidas para invertir el proceso de degradación, en particular cuando está muy avanzado, por lo general son prolongadas y costosas. En algunos casos, la corrección completa puede ser prohibitivamente cara, incluso para el abastecimiento público de agua de mucho valor. Es por eso importante no sólo reconocer los indicios de deterioro incipiente de los recursos de agua subterránea, sino también tener plena conciencia del costo de las medidas correctivas, que aumenta a medida que el problema se agrava.

Un requisito indispensable para la definición práctica y la aplicación de políticas de gestión de las aguas subterráneas (Cuadro 4.2) consiste en establecer prioridades en forma sistemática y clara. Con este fin, los primeros pasos esenciales son los siguientes:

- Definir la escala y el valor de la utilización de los recursos de aguas subterráneas y el nivel de susceptibilidad a los efectos secundarios de la explotación, para lo cual pueden elaborarse técnicas simplificadas de evaluación rápida.
- Evaluar la vulnerabilidad de los sistemas de acuíferos a la contaminación y el nivel del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas que plantean las cargas reales de contaminantes subsuperficiales, para lo cual es posible también elaborar técnicas simplificadas de evaluación rápida.

En un futuro trabajo que acompañaría a éste podría incluirse una guía de las metodologías para esos estudios. La realización de esas evaluaciones rápidas también puede servir indirectamente para identificar a los principales interesados, tanto en términos del uso de las aguas subterráneas como de la amenaza de contaminación de esas aguas.

**Recuadro 4.6. Zonas de protección de las fuentes de agua subterránea periurbanas—Bridgetown (Barbados)**

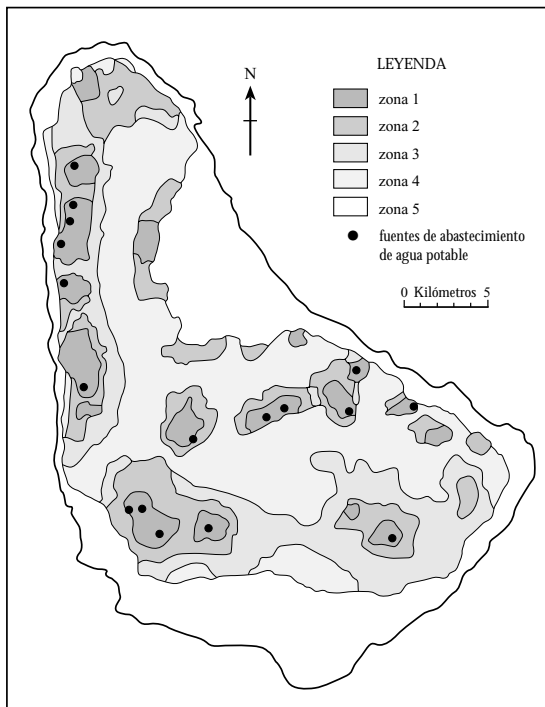
La isla caribeña de Barbados depende totalmente del agua subterránea para el abastecimiento público; se extraen 115 ML/d de 17 pozos de producción, que extraen agua de calizas cársticas porosas no confinadas. La extrema vulnerabilidad de este acuífero se ha reconocido desde hace muchos años y en 1963 una legislación previsorá estableció Zonas de Control del Desarrollo alrededor de las fuentes existentes y propuestas de abastecimiento público. Esas zonas se basaban en conceptos simplificados de los tiempos de desplazamiento de los posibles contaminantes a través del acuífero.

Las actividades residenciales e industriales dentro de cada zona están sujetas a controles jerárquicos, que son cada vez más estrictos a medida que disminuye el tiempo de

desplazamiento. La política de protección del agua subterránea incluye también medidas de prevención de la intrusión salina mediante regímenes de extracción cuidadosos en cada pozo.

Ambos elementos de la política se han hecho cumplir durante más de 30 años, pese al desarrollo y las presiones demográficas crecientes. En un estudio detallado realizado en 1987-90 se llegó a la conclusión de que había varias posibles amenazas que necesitaban controles adicionales (como el paso del cultivo de caña de azúcar a los cultivos comerciales, la extensión de los suburbios de Bridgetown hacia las zonas de captación de aguas subterráneas y el aumento de las pequeñas industrias), pero el sistema había servido para proteger las aguas subterráneas de Barbados.

**Gráfico R4.6. Zonas de desarrollo controlado sobre la base del agua subterránea en Barbados**



Características principales de las zonas de desarrollo controlado				
Zona	Definición del límite exterior	Profundidad máxima de los sumideros de aguas servidas	Controles domésticos	Controles industriales
1	Tiempo de desplazamiento 300 días	No permitidos	No se permiten nuevas casas. No se permiten cambios en la disposición actual de las aguas servidas	No se permiten nuevos desarrollos industriales
2	Tiempo de desplazamiento 600 días	6,5 m	Tanque séptico con sumideros separados para los efluentes de retretes y otras aguas servidas domésticas; no se permiten las escorrentías pluviales a los sumideros del alcantarillado; no se permiten los tanques de combustible.	La disposición de todos los desechos líquidos industriales debe hacerse según lo especificado por la Dirección General de Aguas, con profundidades máximas para los sumideros iguales que para el uso doméstico
3	Tiempo de desplazamiento 5 a 6 años	13 m	Como lo que antecede para las aguas servidas domésticas; los tanques de combustible deben tener un diseño a prueba de fugas aprobado	
4	Todas las tierras altas	sin límite	No hay restricciones para la disposición de aguas servidas domésticas, tanques de combustible con diseño a prueba de fugas aprobado	
5	Tierras onteras	sin límite	No hay restricciones para la disposición de aguas servidas domésticas; instalación de nuevos tanques de almacenamiento de combustible sujeta a aprobación	

**Cuestiones relacionadas con el abastecimiento de agua y la disposición de las aguas servidas**

- Dependencia total de las aguas subterráneas para el abastecimiento público, con saneamiento *in situ* generalizado.
- Economía en transición del monocultivo de caña de azúcar a la horticultura intensiva.
- El suministro alternativo mediante desalinización del agua salobre es muy costoso.

**Necesidades relacionadas con la gestión del agua**

- Es preciso desarrollar fuentes adicionales de agua subterránea en zonas ya protegidas (todavía rurales).
- Se debe mejorar el sistema de distribución para reducir las fugas.
- Se debe extender la red de alcantarillado a las zonas más sensibles de desarrollo controlado alrededor de Bridgetown.

## Referencias y bibliografía

La mayor parte de la información citada en este trabajo se ha obtenido de informes de proyectos e investigaciones no publicados, y no se consideró práctico ni útil para los lectores citarlos específicamente. Cuando las ilustraciones se obtuvieron directamente de fuentes publicadas, se indican a continuación las referencias correspondientes. Se proporciona también una lista de material de lectura.

### Referencias

- Alderwish, A.M., y J. Dottridge. 1996. "Recharge Components in a Semi-Arid Area: The Sana'a Basin". Trabajo presentado en la conferencia sobre geociencia aplicada, Warwick, Reino Unido, 15 a 18 de abril.
- Foster, S.S.D., y R.A. Hirata. 1988. *Groundwater Pollution Risk Assessment: A Methodology Using Available Data*. Lima, Perú: Organización Mundial de la Salud/Organización Panamericana de la Salud/Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS).
- Foster, S.S.D., y A.R. Lawrence. 1995. "Groundwater Quality in Asia: An Overview of Trends and Concerns". Comisión Económica y Social para Asia y el Pacífico (NU-CESPAP). *Water Resources Journal Series C* 184:97-110.
- Foster, S.S.D., B.L. Morris y A.R. Lawrence. 1993. "Effects of Urbanisation on Groundwater Recharge". Institution of Civil Engineers (ICE) International Conference on Groundwater Problems in Urban Areas, Londres, págs. 43-63.
- Mazari, M. y D.M. Mackay. 1993. "Potential for Groundwater Contamination in Mexico City". *Environmental Science and Technology* 27:749-802.

### Material de lectura

- Banco Mundial. 1993. *Water Resources Management*, Washington, D.C.
- Black, M. 1994. *Mega-Slums: The Coming Sanitary Crisis*. Londres: WaterAid.
- Briscoe, J. 1993. "When the Cup Is Half Full". *Environment* 35:7-37.
- Consejo Nacional de Investigación (CNI). 1995. *Mexico City's Water Supply: Improving the Outlook for Sustainability*. Washington, D.C.: National Academy Press.
- Foster, S.S.D., Bo Adams, M. Morales y S. Tenjo. 1993. *Groundwater Protection Strategies: A Guide Towards Implementation*. Organización Mundial de la Salud/Organización Panamericana de la Salud/Centro Panamericano de Ingeniería Santaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Lima, Perú.
- Lewis, W.J., S.S.D. Foster y B. Drasar. 1982. *The Risk of Groundwater Pollution by On-site Sanitation in Developing Countries*. Informe 01-82. Dubendorf, Suiza: Centro Internacional de Referencia para Evacuación de Desechos de la Organización Mundial de la Salud (OMS-CIRED).
- Lindh, G. 1993. *Water and the City*. París: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).



# Glosario sobre aguas subterráneas

## Español - Inglés

<b>abastecimiento con aguas subterráneas</b> <i>groundwater supply</i>	<b>canon</b> <i>levy</i> En Argentina, se recomienda utilizar este vocablo (canon), para diferenciarlo del "derecho" legal a utilizar agua. La tarifa es el valor numérico que se le asigna al derecho o al canon.	<b>derechos preexistentes</b> <i>prior rights</i>
<b>abatimiento del cono de depresión</b> <i>drawdown</i>		<b>derramamiento</b> <i>overflow; spillage</i>
<b>acuífero no confinado, acuífero libre</b> <i>unconfined aquifer</i>	<b>cánones con tarifas incrementales</b> <i>tiered abstraction charges</i>	<b>desagüe pluvial</b> <i>stormwater drain</i>
<b>agentes patógenos, organismos patógenos</b> <i>pathogens</i>	<b>carga</b> <i>head</i>	<b>descarga de efluentes en suelo</b> <i>effluent land discharge</i>
<b>aguas cloacales</b> <i>wastewater</i>	<b>caudal sobrante</b> <i>excess flow</i>	<b>disposición</b> <i>disposal</i> Si bien es un anglicismo, se entiende o usa en el medio técnico, "eliminación", en cambio, da una idea equivocada. Se utilizó este último término en el Capítulo 3, porque el autor de la versión inglesa usó <i>elimination</i> por oposición a <i>disposal</i> .
<b>aguas negras</b> <i>wastewater</i>	<b>circundar</b> <i>by-pass</i>	<b>drenaje</b> <i>drainage</i>
<b>aguas residuales</b> <i>wastewater</i>	<b>circunvalación</b> <i>by-pass</i>	<b>elución</b> <i>elution</i>
<b>aguas servidas</b> <i>wastewater</i>	<b>cloro</b> <i>chlorine</i>	<b>empresa de agua potable y alcantarillado</b> <i>water company, water utility</i>
<b>aguas servidas, aguas residuales, aguas cloacales</b> <i>sewage</i>	<b>cloruro</b> <i>chloride</i>	<b>escorrentía, escurrimiento</b> <i>runoff</i>
<b>alcantarillado</b> <i>sewers</i>	<b>colectores de drenaje pluvial</b> <i>mains pluvial drainage</i>	<b>estiaje</b> <i>dry season</i>
<b>aplicación</b> <i>enforcement</i>	<b>colmatación de los pozos</b> <i>well clogging</i>	<b>estrategia</b> <i>policy strategy</i>
<b>aprovechamiento excesivo</b> <i>overdevelopment</i>	<b>complejación</b> <i>complexation</i>	<b>filtración</b> <i>filtration</i>
<b>arenisca</b> <i>sandstone</i>	<b>cuenca</b> <i>basin; catchment</i>	<b>flujo base</b> <i>baseflow</i>
<b>asentamiento del terreno</b> <i>land subsidence</i>	<b>cuerpo de agua</b> <i>water body</i>	<b>flujo de aguas subterráneas</b> <i>groundwater flow</i>
<b>basamento de roca</b> <i>bedrock</i>	<b>deposición atmosférica</b> <i>aerial fallout</i>	<b>flujo de desechos</b> <i>waste stream</i>
<b>cabezal del pozo</b> <i>wellhead</i>	<b>derecho</b> <i>levy</i> En México, se trata de un impuesto que se paga cuando existe una contraprestación que otorga el Estado o por el privilegio de utilizar un recurso, que por tratarse de un bien público como el agua, es propiedad de todos.	<b>flujo hidrológico equivalente</b> <i>hydrological equivalent rate</i>
<b>caliza</b> <i>limestone</i>		
<b>campo de pozos</b> <i>wellfield</i>		



<b>flujo, caudal</b> <i>flow</i>	<b>letrina de pozo</b> <i>pit latrine</i>	<b>red pública de abastecimiento de agua potable</b> <i>reticulated public water supply</i>
<b>fuelle de contaminación longitudinal</b> <i>line source pollution</i>	<b>limo</b> <i>silt</i>	<b>redes de agua potable</b> <i>water supply mains</i>
<b>fuelle de contaminación puntual</b> <i>point source pollution</i>	<b>lodo proveniente de agua residual</b> <i>slurry</i>	<b>relleno sanitario</b> <i>landfill</i>
<b>fuga (de una tubería)</b> <i>leakage</i>	<b>lodo proveniente de agua residual doméstica</b> <i>sewage sludge</i>	<b>remediación</b> <i>remediation</i>
<b>gerente</b> <i>manager</i>	<b>manantial</b> <i>spring</i>	<b>responsable de formular políticas</b> <i>policymaker</i>
<b>gestión</b> <i>management</i>	<b>manto freático</b> <i>water table</i>	<b>salina</b> <i>saline</i>
<b>gestión de la demanda</b> <i>demand management, demand-side management</i>	<b>napa freática</b> <i>water table</i>	<b>salobre</b> <i>brackish</i>
<b>gradiente arriba</b> <i>upgradient</i>	<b>organismo de reglamentación</b> <i>regulating agency</i>	<b>sistemas de saneamiento in situ</b> <i>on-site sanitation systems</i>
<b>grupos ecologistas</b> <i>environmental groups</i>	<b>organismos patógenos</b> <i>pathogens</i>	<b>sobreexplotación</b> <i>overexploitation</i>
<b>humedal</b> <i>wetland</i>	<b>peligro</b> <i>hazard</i>	<b>sobreextracción</b> <i>overabstraction</i>
<b>hundimiento del terreno</b> <i>land settling</i>	<b>pozo</b> <i>well, borehole</i> En inglés se usa indistintamente well y borehole, aunque a veces borehole se refiere a un pozo somero cavado a mano. En este caso, en México se le llama noria. El autor, en la versión en inglés, utilizó en el Recuadro 2.2 shallow wells y production boreholes.	<b>sorción</b> <i>sorption</i>
<b>infiltración</b> <i>infiltration, seepage</i>	<b>pozo negro</b> <i>cesspit</i>	<b>sostenible</b> <i>sustainable</i>
<b>infiltración (por ejemplo, de un acuífero superior a uno inferior)</b> <i>leakage</i>	<b>pozo para capturar agua indeseable</b> <i>scavenger borehole</i>	<b>succión</b> <i>up-coning</i>
<b>intemperizado</b> <i>weathered</i>	<b>protozoarios</b> <i>protozoa</i>	<b>sumidero</b> <i>soakaway</i>
<b>interesados</b> <i>stakeholders</i>	<b>prueba de bombeo en un pozo</b> <i>well pumping test</i>	<b>tanque séptico</b> <i>septic tank</i>
<b>laguna de efluentes</b> <i>effluent lagoon</i>	<b>recursos hídricos</b> <i>water resources</i>	<b>tramo de curso de agua</b> <i>watercourse section</i>
<b>laguna de lodos</b> <i>sludge lagoon</i>	<b>red de agua potable</b> <i>mains water supply</i>	<b>tubería de alcantarillado</b> <i>mains sewerage</i>
<b>laguna de oxidación</b> <i>oxidation lagoon</i>	<b>red de alcantarillado</b> <i>mains sewerage</i>	<b>tuberías de agua potable</b> <i>water supply mains</i>
<b>laguna de tratamiento</b> <i>treatment lagoon</i>		<b>uso conjunto de los recursos de agua superficial y subterránea</b> <i>conjunctive use of water resources</i>
<b>lavado de tuberías de agua potable mediante descarga de agua</b> <i>mains flushing</i>		<b>vertedero a cielo abierto</b> <i>open dump</i>

**GROUNDWATER  
GLOSSARY  
ENGLISH-SPANISH**

<b>aerial fallout</b> <i>deposición atmosférica</i>	<b>disposal</b> <i>disposición</i> Si bien disposición es un anglicismo, se entiende en el medio técnico; si se utilizara "eliminación" daría una idea equivocada. Sin embargo, se utiliza este último término en el Capítulo 3, donde el autor de la versión inglesa emplea <i>elimination</i> por oposición a <i>disposal</i> )	<b>infiltration</b> <i>infiltración</i>
<b>baseflow</b> flujo base	<b>drainage</b> <i>drenaje</i>	<b>land settling</b> <i>hundimiento del terreno</i>
<b>basin</b> <i>cuenca</i>	<b>drawdown</b> <i>abatimiento del cono de depresión</i>	<b>land subsidence</b> <i>asentamiento del terreno</i>
<b>bedrock</b> <i>basamento de roca</i>	<b>dry season</b> <i>estiaje</i>	<b>landfill</b> <i>relleno sanitario</i>
<b>borehole</b> <i>pozo; noria (México)</i> En inglés se usa <i>borehole</i> y <i>well</i> indistintamente, aunque a veces <i>borehole</i> se refiere a un pozo somero cavado a mano. En este caso, en México se le llama noria. En la versión en inglés, en el Recuadro 2.2, el autor utilizó <i>shallow wells</i> y <i>production boreholes</i> .	<b>effluent lagoon</b> <i>laguna de efluentes</i>	<b>leakage</b> <i>fuga (de una tubería); infiltración (por ejemplo, de un acuífero superior a uno inferior)</i>
<b>brackish</b> <i>salobre</i>	<b>effluent land discharge</b> <i>descarga de efluentes en suelo</i>	<b>levy</b> <i>canon, derecho</i> En Argentina, se recomienda utilizar canon para diferenciarlo del "derecho" legal a utilizar agua. La tarifa es el valor numérico que se le asigna al derecho o al canon. En México, se utiliza derecho y se trata de un impuesto que se paga cuando existe una contraprestación que otorga el Estado o por el privilegio de utilizar un recurso que por tratarse de un bien público, como el agua, es propiedad de todos.
<b>by-pass</b> <i>circundar; circunvalación</i>	<b>elution</b> <i>elución</i>	<b>limestone</b> <i>caliza</i>
<b>catchment</b> <i>cuenca</i>	<b>enforcement</b> <i>aplicación</i>	<b>line source pollution</b> <i>fuentes de contaminación longitudinal</i>
<b>cesspit</b> <i>pozo negro</i>	<b>environmental groups</b> <i>grupos ecologistas</i>	<b>mains flushing</b> <i>lavado de tuberías de agua potable mediante descarga de agua</i>
<b>complexation</b> <i>complejación</i>	<b>excess flow</b> <i>caudal sobrante</i>	<b>mains pluvial drainage</b> <i>colectores de drenaje pluvial</i>
<b>conjunctive use of water resources</b> <i>uso conjunto de los recursos de agua superficial y subterránea</i>	<b>filtration</b> <i>filtración</i>	<b>mains sewerage</b> <i>red de alcantarillado; tubería de alcantarillado</i>
<b>chloride</b> <i>cloruro</i>	<b>flow</b> <i>flujo, caudal</i>	<b>management</b> <i>gestión</i>
<b>chlorine</b> <i>cloro</i>	<b>groundwater flow</b> <i>flujo de aguas subterráneas</i>	<b>manager</b> <i>gerente</i>
<b>demand management</b> <i>gestión de la demanda</i>	<b>groundwater supply</b> <i>abastecimiento con aguas subterráneas</i>	<b>on-site sanitation systems</b> <i>sistemas de saneamiento in situ</i>
<b>demand-side management</b> <i>gestión de la demanda</i>	<b>hazard</b> <i>peligro</i>	<b>open dump</b> <i>vertedero a cielo abierto</i>
	<b>head</b> <i>carga</i>	<b>overabstraction</b> <i>sobreextracción</i>
	<b>hydrological equivalent rate</b> <i>flujo hidrológico equivalente</i>	

<b>overdevelopment</b> <i>aprovechamiento excesivo</i>	<b>sewage</b> <i>aguas servidas, aguas residuales, aguas cloacales</i>	<b>water body</b> <i>cuerpo de agua</i>
<b>overexploitation</b> <i>sobreexplotación</i>	<b>sewage sludge</b> <i>lodo proveniente de agua residual doméstica</i>	<b>water company</b> <i>empresa de agua potable y alcantarillado</i>
<b>overflow</b> <i>derramamiento</i>	<b>sewers</b> <i>alcantarillado</i>	<b>water resources</b> <i>recursos hídricos</i>
<b>oxidation lagoon</b> <i>laguna de oxidación</i>	<b>silt</b> <i>limo</i>	<b>water supply mains</b> <i>redes de agua potable; tuberías de agua potable</i>
<b>pathogens</b> <i>agentes patógenos; organismos patógenos</i>	<b>sludge lagoon</b> <i>laguna de lodos</i>	<b>water table</b> <i>manto freático, napa freática</i>
<b>pit latrine</b> <i>letrina de pozo</i>	<b>slurry</b> <i>lodo proveniente de agua residual</i>	<b>water utility</b> <i>empresa de agua potable y alcantarillado</i>
<b>point source pollution</b> <i>fuelle de contaminación puntual</i>	<b>soakaway</b> <i>sumidero</i>	<b>watercourse section</b> <i>tramo de curso de agua</i>
<b>policy strategy</b> <i>estrategia</i>	<b>sorption</b> <i>sorción</i>	<b>weathered</b> <i>intemperizado</i>
<b>policymaker</b> <i>responsable de formular políticas</i>	<b>spillage</b> <i>derramamiento</i>	<b>well</b> <i>pozo</i> En inglés se usa well y borehole indistintamente.
<b>prior rights</b> <i>derechos preexistentes</i>	<b>spring</b> <i>manantial</i>	<b>well clogging</b> <i>colmatación de los pozos</i>
<b>protozoa</b> <i>protozoarios</i>	<b>stakeholders</b> <i>interesados</i>	<b>well pumping test</b> <i>prueba de bombeo en un pozo</i>
<b>regulating agency</b> <i>organismo de reglamentación</i>	<b>stormwater drain</b> <i>desagüe pluvial</i>	<b>wellfield</b> <i>campo de pozos</i>
<b>remediation</b> <i>remediación</i>	<b>sustainable</b> <i>sostenible</i>	<b>wellhead</b> <i>cabezal del pozo</i>
<b>reticulated public water supply</b> <i>red pública de abastecimiento de agua potable</i>	<b>tiered abstraction charges</b> <i>cánones con tarifas incrementales</i>	<b>wetland</b> <i>humedal</i>
<b>risk</b> <i>riesgo</i>	<b>treatment lagoon</b> <i>laguna de tratamiento</i>	
<b>runoff</b> <i>escorrentía, escurrimiento</i>	<b>unconfined aquifer</b> <i>acuífero no confinado, acuífero libre</i>	
<b>saline</b> <i>salina</i>	<b>up-coning</b> <i>succión</i>	
<b>sandstone</b> <i>arenisca</i>	<b>upgradient</b> <i>gradiente arriba</i>	
<b>scavenger borehole</b> <i>pozo para capturar agua indeseable</i>	<b>waste stream</b> <i>flujo de desechos</i>	
<b>seepage</b> <i>infiltración</i>	<b>wastewater</b> <i>aguas cloacales, aguas negras, aguas residuales, aguas servidas</i>	

## Distribuidores de las publicaciones del Banco Mundial

Los precios y condiciones de pago varían según el país. Antes de hacer un pedido consultar al distribuidor pertinente.

**ALEMANIA**  
UNO-Verlag  
Poppenbüttel Allee 55  
53115 Bonn  
Tel.: (49 228) 949020  
Fax: (49 228) 217492  
URL: <http://www.uno-verlag.de>  
Correo electrónico: [unovet@uni.com](mailto:unovet@uni.com)

**ARGENTINA**  
Oficina del Libro Internacional  
Av. Córdoba 1877  
1120 Buenos Aires  
Tel.: (54 1) 815-8354  
Fax: (54 1) 815-8156

**AUSTRALIA, FIJI, ISLAS SALOMÓN, PAPUA NUEVA GUINEA, SAMOA OCCIDENTAL, Y VANUATU**  
D.A. Information Services  
648 Whitehorse Road  
Mitcham 3132  
Victoria  
Tel.: (61) 3 9210 7777  
Tel.: (61) 3 9210 7788  
Correo electrónico: [services@adinf.com.au](mailto:services@adinf.com.au)  
URL: <http://www.adinf.com.au>

**AUSTRIA**  
Arendt and Co.  
Wellinggasse 26  
A-1150 Viena  
Tel.: (43 1) 512 47 31-0  
Fax: (43 1) 512 47 31-29  
URL: <http://www.gendoc.com/at/online>

**BANGLADESH**  
Micro Industries Development  
Assistance Society (MIDAS)  
House 5, Road 16  
Dharmendra R/Area  
Dacca 1209  
Tel.: (880 2) 826427  
Fax: (880 2) 811188

**BELGICA**  
Jean De Lannoy  
Av. du Roi 202  
1060 Bruselas  
Tel.: (32 2) 538-5169  
Fax: (32 2) 538-0841

**BRASIL**  
Publicações Técnicas Internacionais Ltda.  
Rua Pexoto Gomes, 209  
14069 São Paulo, SP  
Tel.: (55 11) 259-6644  
Fax: (55 11) 258-6980  
Correo electrónico: [postmaster@pti.oul.br](mailto:postmaster@pti.oul.br)  
URL: <http://www.oul.br>

**CANADÁ**  
Renart Publishing Co. Ltd.  
5369 Canotek Road  
Ottawa, Ontario K1J 9J3  
Tel.: (613) 745-2665  
Fax: (613) 745-7660  
Correo electrónico: [order.dpt@renartbooks.com](mailto:order.dpt@renartbooks.com)  
URL: <http://www.renartbooks.com>

**CHINA**  
China Financial & Economic Publishing House  
8, Da Fa Si Dong Jie Beijing  
Tel.: (86 10) 6333-8257  
Fax: (86 10) 6401-7365

**CHIPRE**  
Center of Applied Research  
Cyprus College  
c. Digenes Street, Engomi  
P.O. Box 2006  
Nicosia  
Tel.: (357 2) 44-1730  
Fax: (357 2) 46-2051

**COLOMBIA**  
Infancia y Lida.  
Carrera 6 No. 51-21  
Apartado Aéreo 34270  
Santafé de Bogotá, D.C.  
Tel.: (57 1) 285-2788  
Fax: (57 1) 285-2788

**COREA, REPUBLICA DE**  
Daegun Trading Co. Ltd.  
P.O. Box 54, Yoida, 706 Seoun Bldg  
44-6 Yoido-Dong, Yeongtonggu-Ku  
Seoul  
Tel.: (82 2) 785-1631/4  
Fax: (82 2) 784-0315

**CÔTE D'IVOIRE**  
Centre d'Édition et de Diffusion Africaines  
(CEDA)  
04 B.F. 541  
Abidjan 04  
Tel.: (225) 24-6510, 24-6511  
Tel.: (225) 25-0567

**DINAMARCA**  
Samlangs Litteratur  
Rosenørns Alle 11  
DK-1970 Frederiksberg C  
Tel.: (45 31) 351942  
Fax: (45 31) 357822  
URL: <http://www.sl.chs.dk>

**ECUADOR**  
Libri Mundi  
Librería Internacional  
P.O. Box 17-01-3029  
Juan León Mera 851  
Quito  
Tel.: (593 2) 504 209  
Fax: (593 2) 504 209  
librimundi@librimundi.com.ec  
librimundi2@librimundi.com.ec

**EGIPTO, REPUBLICA ARABE DE**  
Al Altam Distribution Agency  
Al Galaa Street  
El Cairo  
Tel.: (20 2) 578-6083  
Fax: (20 2) 578-6833

**The Middle East Observer**  
41, Sherif Street  
El Cairo  
Tel.: (20 2) 393-9732  
Fax: (20 2) 393-9732

**ESLOVENIA**  
Geoposki Vestnik Publishing Group  
Dunajska cesta 5  
1000 Ljubljana  
Tel.: (386 61) 133-80-30  
Fax: (386 61) 133-80-30  
Correo electrónico: [repanskj@guestnik.si](mailto:repanskj@guestnik.si)

**ESPAÑA**  
Mundi-Pressa Libros, S.A.  
Ceballos 37  
28001 Madrid  
Tel.: (34 1) 375-3998  
Fax: (34 1) 375-3998  
Correo electrónico: [libreria@mundiprensa.es](mailto:libreria@mundiprensa.es)  
URL: <http://www.mundiprensa.es/>

**Mundi-Pressa Barcelona**  
08009 Barcelona  
Tel.: (34 3) 488-5482  
Fax: (34 3) 487-7659  
Correo electrónico: [barcelona@mundiprensa.es](mailto:barcelona@mundiprensa.es)

**FEDERACIÓN DERUSIA**  
Isdatel'svo <Ves Mir>  
9a, Kolpachinski Perebuk  
Moscu 101831  
Tel.: (7 095) 917-87-49  
Fax: (7 095) 917-92-59

**FILIPINAS**  
International Booksource Center Inc.  
1127-A Antipolo St., Barangay, Venezuela  
Makati, Metro Manila  
Tel.: (63 2) 896-6501; 6505; 6507  
Fax: (63 2) 896-1741

**FINLANDIA**  
Akateeminen Kirjakauppa  
P.O. Box 128  
FIN-00101 Helsinki  
Tel.: (358 10) 121-4418  
Fax: (358 10) 121-4435  
Correo electrónico: [akateilans@stockmann.fi](mailto:akateilans@stockmann.fi)  
URL: <http://www.akateeminen.com/>

**FRANCIA**  
Vendit Benoit Publications  
68, rue de la République  
75118 Paris  
Tel.: (33 1) 46 49 30 56 57  
Fax: (33 1) 46 49 30 48

**GRECIA**  
Papastron S.A.  
68, rue de l'Avenir  
106 82 Athens  
Tel.: (30 1) 384 1826  
Fax: (30 1) 384 8254

**HAITI**  
Culture Diffusion  
5, Rue Piquet  
C.P. 257  
Puerto Principe  
Tel.: (509) 23 9280  
Fax: (509) 23 4858

**HONG KONG, MACAO**  
Asia 2000 Ltd.  
Sales & Circulation Department  
Seahard House, unit 1101-102  
22, 28 Wyndham Street  
Central Hong Kong  
Tel.: (852) 2520-1409  
Fax: (852) 2520-1107  
Correo electrónico: [sales@asia2000.com.hk](mailto:sales@asia2000.com.hk)  
URL: <http://www.asia2000.com.hk>

**HUNGRÍA**  
Euro Inter Service  
Művelődési Értékpapí Ház  
H-1138 Budapest  
Tel.: (36 1) 111-6081  
Fax: (36 1) 302-5035  
Correo electrónico: [curinfo@mail.mata.hu](mailto:curinfo@mail.mata.hu)

**INDIA**  
Allied Publishers Ltd.  
751 Mount Road  
Madras - 600 005  
Tel.: (91 44) 852-3938  
Fax: (91 44) 852-0649

**INDONESIA**  
Pt. Indra Limited  
Jalan Boreubud 20  
P.O. Box 181  
Yakarta 10320  
Tel.: (62 21) 330-2772  
Fax: (62 21) 330-4241

**MALASIA**  
University of Malaya Cooperative  
Bookshop, Limited  
P.O. Box 1127  
Jalan Panat Baru  
59100 Kuala Lumpur  
Tel.: (60 3) 758-4424  
Fax: (60 3) 758-4424  
Correo electrónico: [uniooop@tm.net.my](mailto:uniooop@tm.net.my)

**MEXICO**  
INFOTEC  
Av. San Fernando No. 37  
Col. Iturbide Guerra  
14050 México, D.F.  
Tel.: (52 5) 624-2822  
Fax: (52 5) 624-2800  
Correo electrónico: [infotec@tm.net.mx](mailto:infotec@tm.net.mx)  
URL: <http://tm.net.mx>

**NEPAL**  
Everest Media International Services (P) Ltd.  
GPO Box 5443  
Kathmandu  
Tel.: (977 1) 472-152  
Tel.: (977 1) 224-431

**NIGERIA**  
University Press Limited  
Three Crowns Building, Jericho  
Private Mail Bag 5065  
Ibadan  
Tel.: (234 223 41-1356  
Tel.: (234 223 41-2056  
Fax: (234 223 41-2056

**NORUEGA**  
Nico Ltd AS  
Book Dept  
P.O. Box 6512 Etstrand  
N-0602 Oslo  
Tel.: (47 22) 97 4500  
Fax: (47 22) 97 4545

**NOUEVA ZELANDIA**  
Private Mail Bag 99814  
Auckland  
Tel.: (64 9) 524-8119  
Tel.: (64 9) 524-8067  
Fax: (64 9) 524-8067

**PAISES BAJOS**  
De Lindeboom/InO-Publicaties  
P.O. Box 202  
7480 AE Haaksbergen  
Tel.: (31 53) 574-0004  
Fax: (31 53) 572-9296  
Correo electrónico: [lindeboo@worldonline.nl](mailto:lindeboo@worldonline.nl)  
URL: <http://www.worldonline.nl/~lindeboo>

**PAKISTAN**  
Mirza Book Agency  
65, Shahrab-e-Quaid-e-Azam  
Lahore 54000  
Tel.: (92 42) 735-3601  
Fax: (92 42) 576-3714  
Correo electrónico: [ouppak@TheOffice.net](mailto:ouppak@TheOffice.net)  
URL: <http://www.bekkom.com.pk/streets>

**PERU**  
Editorial Desarrollo SA  
Apartado 3824  
Lima 1  
Tel.: (51 1) 286380  
Tel.: (51 1) 880-1448  
Fax: (51 1) 880-6248  
Correo electrónico: [ass@sa.co.za](mailto:ass@sa.co.za)

**POLONIA**  
International Publishing Service  
Ul. Phokna 31/57  
00-577 Warszawa  
Tel.: (48 2) 628-0089  
Fax: (48 2) 628-7255  
Correo electrónico: [books%ips@kp.atm.com.pl](mailto:books%ips@kp.atm.com.pl)  
URL: <http://www.ipsk.waw.pl/ips/export/>

**PORTUGAL**  
Livraria Portugal  
Apartado 2881, Rua Do Comoro 70-74  
1200 Lisboa  
Tel.: (0) 347-4982  
Fax: (0) 347-0264

**REINO UNIDO**  
Microfilm Ltd.  
P.O. Box 3  
Alton, Hampshire GU34 2PG  
Inglaterra  
Tel.: (44 1420) 86848  
Tel.: (44 1420) 89888  
Correo electrónico: [whank@ukmfinfo.demon.co.uk](mailto:whank@ukmfinfo.demon.co.uk)  
URL: <http://www.microfilm.co.uk>

**REPUBLICA CHECA**  
National Information Center  
Polepna, Kovytkska 5  
CS-116 57 Praha 1  
Tel.: (42 2) 3422 9433  
Fax: (42 2) 2422 1484  
URL: <http://www.niscz/>

**RUMANIA**  
Compani De Librari Bucuresti S.A.  
Str. Lipsicani no. 26, sector 3  
Bucarest  
Tel.: (40 1) 613-9645  
Correo electrónico: [info@trinidad.net](mailto:info@trinidad.net)

**UGANDA**  
Gastro Ltd.  
P.O. Box 9987, Madhvani Building  
Plot 16/4 Jinja Rd.  
Kampala  
Tel.: (256 41) 251-467  
Fax: (256 41) 251-468  
Correo electrónico: [gus@swiftgan-da.com](mailto:gus@swiftgan-da.com)

**VENEZUELA**  
Tercer Ciencia Libros, S.A.  
Centro Ciudad Comercial Tamaraco Nivel C2  
Caracas  
Tel.: (58 2) 959-5547; 5085; 0016  
Fax: (58 2) 959-5636

**PARÁ**  
International Subscription Service  
P.O. Box 41095  
Craighall  
Johannesburgo 2024  
Tel.: (27 11) 880-1448  
Fax: (27 11) 880-6248  
Correo electrónico: [ass@sa.co.za](mailto:ass@sa.co.za)

**SUECIA**  
Wingmans-Williams AB  
P.O. Box 1306  
S-171 25 Solna  
Tel.: (46 8) 705-97-50  
Fax: (46 8) 707-00-71  
Correo electrónico: [mail@wvi.se](mailto:mail@wvi.se)

**SUIZA**  
Librarie Payot Service Institutionnel  
Cotes-de-Montbenon 30  
1002 Lansana  
Tel.: (41 21) 341-3229  
Fax: (41 21) 341-3235

**TÉCNICAS**  
Adeco Van Diemen Editions  
Alton, Hampshire GU34 2PG  
Inglaterra  
Tel.: (41 21) 943-2673  
Tel.: (41 21) 943-3605

**Tailandia**  
Central Books Distribution  
306 Silom Road  
Bangkok 10500  
Tel.: (66 2) 235-5400  
Tel.: (66 2) 237-8321

**TRINIDAD Y TABAGO, EL**  
CARIBE  
Systematics Studies Ltd.  
St. Augustine Shopping Center  
Eastern Main Road, St. Augustine  
Trinidad y Tabago, Antillas  
Tel.: (868) 645-8466  
Fax: (868) 645-8467  
Correo electrónico: [info@trinidad.net](mailto:info@trinidad.net)

**UGANDA**  
Gastro Ltd.  
P.O. Box 9987, Madhvani Building  
Plot 16/4 Jinja Rd.  
Kampala  
Tel.: (256 41) 251-467  
Fax: (256 41) 251-468  
Correo electrónico: [gus@swiftgan-da.com](mailto:gus@swiftgan-da.com)

**VENEZUELA**  
Tercer Ciencia Libros, S.A.  
Centro Ciudad Comercial Tamaraco Nivel C2  
Caracas  
Tel.: (58 2) 959-5547; 5085; 0016  
Fax: (58 2) 959-5636

**ZAMBIA**  
University Bookshop, University of Zambia  
Great East Road Campus  
P.O. Box 32379  
Lusaka  
Tel.: (260 1) 252-576  
Fax: (260 1) 252-952

**IRAN**  
Kieab Sara Co. Publishers  
Khalab Ekamholl Ave., 6th Street  
Dafarooz Alley No 8  
Tel.: (98 21) 8717819; 8716104  
Fax: (98 21) 8712479

**Kowkabh Publishers**  
P.O. Box 1875-511  
Tehran  
Tel.: (98 21) 258-3723  
Fax: (98 21) 258-3723

**IRLANDIA**  
Government Supplies Agency  
Oifig an tSoláitair  
4-5 Harcourt Road  
Dublin 2  
Tel.: (353 1) 661-3111  
Fax: (353 1) 475-2670

**ISRAEL**  
Yozmot Literature Ltd.  
P.O. Box 50055  
3 Yohanan Haxandalar Street  
Ibadan  
Tel.: (972 3) 5285-387  
Tel.: (972 3) 5285-397  
R.O.Y. International  
P.O. Box 13956  
Tel Aviv 61130  
Tel.: (972 3) 546142  
Fax: (972 3) 546142  
Correo electrónico: [roy@netvision.net.il](mailto:roy@netvision.net.il)

**ÍNDIA**  
Index Information Services  
P.O. Box 19502, Jerusalem  
Tel.: (972 2) 6271219  
Tel.: (972 2) 6271634

**ITALIA**  
Liros Commissionaria Sansoni SPA  
Via Duce Di Calabria, 1/1  
Casella Postale 552  
50125 Florencia  
Tel.: (55) 645-415  
Fax: (55) 641-257  
Correo electrónico: [lirosa@fbcc.it](mailto:lirosa@fbcc.it)  
URL: <http://www.fbcc.it/lirosa>

**JAMAICA**  
Ian Rendle Publishers Ltd.  
206 Old Hope Road  
Kingston 6  
Tel.: (876) 927-2085  
Fax: (876) 977-0243  
Correo electrónico: [irpl@colts.com](mailto:irpl@colts.com)

**JAPÓN**  
Eastern Book Service  
3-13 Hongg 3 chome, Bunkyo-ku  
Tokio 113  
Tel.: (81 3) 3818-0861  
Fax: (81 3) 3818-0864  
Correo electrónico: [order@svt-obs.co.jp](mailto:order@svt-obs.co.jp)  
URL: <http://www.bekkom.com.jp/streets>

**KENYA**  
Africa Book Service (E.A.) Ltd.  
Quaran House, Mwingano Street  
Jalan Boreubud 20  
P.O. Box 181  
Yakarta 10320  
Tel.: (62 21) 330-2772  
Fax: (62 21) 330-4241

**REPÚBLICA DE KENYA**  
Africa Book Service (E.A.) Ltd.  
Quaran House, Mwingano Street  
Jalan Boreubud 20  
P.O. Box 181  
Yakarta 10320  
Tel.: (62 21) 330-2772  
Fax: (62 21) 330-4241

**REPÚBLICA DE KENYA**  
Africa Book Service (E.A.) Ltd.  
Quaran House, Mwingano Street  
Jalan Boreubud 20  
P.O. Box 181  
Yakarta 10320  
Tel.: (62 21) 330-2772  
Fax: (62 21) 330-4241

**REPÚBLICA DE KENYA**  
Africa Book Service (E.A.) Ltd.  
Quaran House, Mwingano Street  
Jalan Boreubud 20  
P.O. Box 181  
Yakarta 10320  
Tel.: (62 21) 330-2772  
Fax: (62 21) 330-4241

**REPÚBLICA DE KENYA**  
Africa Book Service (E.A.) Ltd.  
Quaran House, Mwingano Street  
Jalan Boreubud 20  
P.O. Box 181  
Yakarta 10320  
Tel.: (62 21) 330-2772  
Fax: (62 21) 330-4241

**REPÚBLICA DE KENYA**  
Africa Book Service (E.A.) Ltd.  
Quaran House, Mwingano Street  
Jalan Boreubud 20  
P.O. Box 181  
Yakarta 10320  
Tel.: (62 21) 330-2772  
Fax: (62 21) 330-4241

**REPÚBLICA DE KENYA**  
Africa Book Service (E.A.) Ltd.  
Quaran House, Mwingano Street  
Jalan Boreubud 20  
P.O. Box 181  
Yakarta 10320  
Tel.: (62 21) 330-2772  
Fax: (62 21) 330-4241

**REPÚBLICA DE KENYA**  
Africa Book Service (E.A.) Ltd.  
Quaran House, Mwingano Street  
Jalan Boreubud 20  
P.O. Box 181  
Yakarta 10320  
Tel.: (62 21) 330-2772  
Fax: (62 21) 330-4241